

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RICARDO BATISTA DOS SANTOS

O NASCIMENTO DA CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA:
UM ESTUDO SOBRE O PROGRAMA METODOLÓGICO DOS *PRINCIPIA* DE ISAAC
NEWTON

EM DOIS VOLUMES,
Paginados e capitulados continuamente.

VOL.1

CURITIBA

2021

RICARDO BATISTA DOS SANTOS

O NASCIMENTO DA CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA:
UM ESTUDO SOBRE O PROGRAMA METODOLÓGICO DOS *PRINCIPIA* DE ISAAC
NEWTON

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Filosofia do Setor de Ciências Humanas, Letras e Artes
da Universidade Federal do Paraná, como requisito
parcial à obtenção do grau de doutor em Filosofia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Salles de Oliveira Barra

VOL.1

CURITIBA

2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA

Santos, Ricardo Batista dos

O nascimentos da ciência empírico-matemática : um estudo sobre o programa metodológico dos *Principia* de Isaac Newton. / Ricardo Batista dos Santos. – Curitiba, 2021.

1 recurso on-line : PDF.

Doutorado (Tese em Filosofia) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Filosofia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Salles de Oliveira Barra.

1. Newton, Isaac Sir, 1642-1727. 2. Ciência - Filosofia. 3. Ciência – Metodologia. 4. Razão prática. 5. Mecânica celeste. I. Barra, Eduardo Salles de Oliveira, 1964-. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Filosofia. III. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em FILOSOFIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **RICARDO BATISTA DOS SANTOS** intitulada: **O Nascimento da Ciência Empírico-Matemática: Um Estudo sobre o Programa Metodológico dos Principia de Isaac Newton**, sob orientação do Prof. Dr. EDUARDO SALLES DE OLIVEIRA BARRA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 10 de Fevereiro de 2021.

Assinatura Eletrônica

22/03/2021 14:10:33.0

EDUARDO SALLES DE OLIVEIRA BARRA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

22/03/2021 19:28:45.0

ALEX CALAZANS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

25/03/2021 11:31:36.0

NICCOLO GUICCIARDINI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE MILÃO)

Assinatura Eletrônica

29/03/2021 12:11:21.0

RONEI CLECIO MOCELLIN

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

24/03/2021 10:33:03.0

IVÂ GURGEL

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP)

Ofereço esse trabalho ao meu pai – que embora tenha acompanhado entusiasmado o seu início, não teve a oportunidade de ver o o seu fim.

AGRADECIMENTOS

Várias pessoas contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desse trabalho, a quem dedico os meus sinceros agradecimentos. Agradeço ao meu amigo e colega de profissão William Stubert, pelas várias conversas e orientações informais, que me ajudaram na transição para o campo da filosofia. Agradeço aos colegas de grupo de estudo da UFPR, especialmente Alex e Verônica Calazans, e Luiz Felipe Sigwalt de Miranda, por compartilharem do desafio, às vezes desesperador, de compreender a matemática de Newton. Sozinho, dificilmente teria coragem de enfrentar esse desafio. Agradeço ao professor Eduardo Barra por orientações precisas que determinaram rumos relevantes dessa pesquisa. Em particular, a orientação sobre a importância de se aprofundar na história da ciência para a compreensão da sua filosofia, e também sobre a necessidade de investigar a matemática de Newton para compreender a sua ciência, foi fundamental para os resultados que se alcançaram no primeiro volume. Da mesma forma, a orientação para tentar compreender a relação entre os aspectos empíricos e matemáticos no método de Newton, e para refletir sobre o que ele estava fazendo do ponto de vista da filosofia da ciência, foi fundamental para os resultados que se alcançaram no segundo volume. Agradeço também aos professores Niccolò Guicciardini, Ivã Gurgel, Alex Calazans e Ronei Mocellin, que gentilmente aceitaram o convite para participar da banca de defesa pública dessa tese, e fizeram relevantes observações que contribuíram para a articulação dos conteúdos que compõem sobretudo o segundo volume. Por fim, mas não menos importante, agradeço a aqueles que não contribuíram diretamente com os conteúdos desse trabalho, mas que tornaram a sua execução possível: a minha família. Aos meus pais, Robiran e Raquel, meus irmãos, e minha esposa Priscila, por todo suporte e apoio ao longo desses anos.

*O destino da nossa jornada deve ser
Chegar ao ponto de partida
E, pela primeira vez,
Reconhecer esse lugar.*

T. S. Eliot, 1943

RESUMO

O presente trabalho investiga o programa metodológico dos *Principia* de Isaac Newton tanto do ponto de vista histórico quanto do ponto de vista da filosofia da ciência, com o objetivo de iluminar problemas desse último campo, e em especial o problema da racionalidade científica. Do ponto de vista histórico, o tratado de Newton e a sua teoria da gravitação universal são detalhadamente apresentados e analisados, e se defende que nessa obra Newton elaborou um novo plano de investigação da natureza que levou, por fim, ao sepultamento definitivo da antiga filosofia natural aristotélica. O célebre “*hypotheses non fingo*” é entendido, nesse contexto, como uma eloquente exaltação da epistemologia rigidamente empirista dessa distinta abordagem, que convenientemente foi aqui chamada de um programa de uma *ciência empírico-matemática*. Do ponto de vista da filosofia da ciência, defende-se que o referido programa de Newton se fundamenta numa ampla e sofisticada estrutura confirmacionista de investigação da natureza, estrutura que não padece dos conhecidos problemas vinculados aos vários modelos de confirmação H-D esmiuçados e desacreditados no último século, e que é capaz de produzir genuínas e suficientes confirmações qualitativas por meio da convergência indutiva. Argumenta-se que esse programa foi responsável pelo surgimento da física teórica que, por sua vez, impulsionou a delineação do próprio programa de ciência empírica natural atual. A análise detalhada dos fundamentos desse programa mostra que ele foi incorporado pelos sucessores de Newton até os nossos dias, e revela novos parâmetros para compreender a estrutura e funcionamento da ciência, viabilizando uma perspectiva de resposta diferenciada para vários problemas de grande repercussão da filosofia da ciência, tais como, o problema do impregnacionismo teórico, dos experimentos cruciais, do progresso científico, do realismo científico, do estatuto epistemológico das teorias, além de um encaminhamento distinto para o famoso problema da indução. As referidas análises reforçam a viabilidade de se resgatar a confiança em uma ciência objetiva, progressiva e realista, substantivamente fundada em parâmetros aceitáveis de racionalidade.

Palavras-chave: Isaac Newton. *Principia*. Método científico. Confirmacionismo. Racionalidade da ciência.

ABSTRACT

The present work investigates the methodological program of Newton's *Principia* both from a historical point of view and from the point of view of the philosophy of science, in order to illuminate enduring problems of this field, and particularly the problem of scientific rationality. From the historical perspective, Newton's treatise and his theory of universal gravitation are presented and analyzed in detail, and it is argued that he organized, in this work, a new scheme for the investigation of natural phenomena that ultimately led to the demolition of ancient aristotelian natural philosophy. The famous statement “*hypotheses non fingo*” is understood, in this context, as an eloquent praise to the rigid empiricist epistemology of this distinct approach, which was conveniently called here a program of an *empirical-mathematical science*. From the perspective of philosophy of science, it is argued that this program is based on a broad and sophisticated confirmationist apparatus, which is not plagued with the known problems of the various H-D confirmation models scrutinized and discredited in the last century, and that it is capable of producing genuine and sufficient qualitative confirmations through inductive convergence. It is argued that this program was responsible for the emergence of theoretical physics which, in turn, propelled the delineation of the current empirical natural science program itself. A detailed analysis of the foundations of this program shows that it was incorporated by the posterior science to the present day, and reveals new parameters to understand the structure and functioning of science, enabling a different response to several problems of significant importance in philosophy of science, such as the problem of theory-ladenness, the problem of crucial experiments, of scientific progress, of scientific realism, of the epistemological status of scientific theories, as well as a new direction of understanding for the famous problem of induction. These analyses strengthen the viability of restoring confidence in an objective, progressive and realist science, substantially founded on acceptable grounds of rationality.

Key-Words: Isaac Newton. *Principia*. Scientific Method. Confirmationism. Rationality of science.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DO MOVIMENTO UNIFORMEMENTE ACELERADO DE GALILEU. FONTE: <i>DISCORSI</i> [CROW E SALVIO], p.173.	80
FIGURA 2: REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DO MOVIMENTO UNIFORMEMENTE ACELERADO DE BARROW. FONTE: <i>LECTIONES</i> , p. 40.	81
FIGURA 3: UM CONE GERADO PELA ROTAÇÃO DE UMA EXTREMIDADE DE UMA RETA, MANTENDO A OUTRA FIXA. FONTE: <i>LECTIONES</i> , p. 44.	82
FIGURA 4: ILUSTRAÇÃO DE NEWTON NO ESCÓLIO DAS LEIS DO MOVIMENTO EXEMPLIFICANDO OS EXPERIMENTOS DE COLISÃO USANDO PÊNDULOS.	171
FIGURA 5: DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE FORÇAS ATUANDO DURANTE O IMPACTO ENTRE DOIS CORPOS, A E B.	174
FIGURA 6: DIAGRAMA DE FORÇAS DURANTE O IMPACTO ENTRE DOIS CORPOS, A E B, CONSIDERANDO APENAS AS FORÇAS <i>IMPRESSAS</i>	176
FIGURA 7 – DOIS CORPOS ELÁSTICOS COLIDINDO PODEREM SER COMPARADOS A DOIS CORPOS COLIDINDO COM UMA MOLA ENTRE ELES. FONTE: O AUTOR.....	177
FIGURA 8 – MESMO EM CORPOS ELÁSTICOS, PARA QUE A FORÇA DE RESISTÊNCIA OCORRESSE TAL COMO OBSERVADA NOS EXPERIMENTOS DEVERIA HAVER UMA RESISTÊNCIA ATUANDO JÁ NO PRIMEIRO CONTATO NÃO ELÁSTICO ENTRE AS PARTÍCULAS DAS SUPERFÍCIES DOS CORPOS.....	178
FIGURA 9 – INTERPRETAÇÃO MAIS ACABADA DE NEWTON PARA O FENÔMENO DA COLISÃO ENTRE DOIS CORPOS. DURANTE A COLISÃO SURTIRÃO FORÇAS IGUAIS E OPOSTAS – A AÇÃO E REAÇÃO.	180
FIGURA 10 – MINHA ILUSTRAÇÃO MANUAL DA DESCRIÇÃO OFERECIDA POR NEWTON NO ESCÓLIO DA PROPOSIÇÃO 4 DO LIVRO I.....	186
FIGURA 11: ILUSTRAÇÃO DE NEWTON NO <i>DE MUNDI SYSTEMATE</i> . O PROJÉTIL LANÇADO DE CIMA DA MONTANHA PERCORRE UMA DISTÂNCIA CADA VEZ MAIOR ATÉ PERMANECER EM ÓRBITA. FONTE: <i>DE MUNDI SYSTEMATE</i> , p.551.....	188
FIGURA 12: UM CORPO EM MOVIMENTO SEM QUALQUER AÇÃO DE FORÇAS, OU COM UMA FORÇA RESULTANTE NULA, GERA UMA LINHA RETA. FONTE: O AUTOR.	199
FIGURA 13: UM CORPO EM MOVIMENTO QUE SOFRE A AÇÃO DE UMA FORÇA CONTÍNUA E CONSTANTE PERPENDICULAR AO MOVIMENTO DO CORPO GERA UMA LINHA CURVA SEMI-PARÁBOLICA. FONTE: O AUTOR.....	199

FIGURA 14: UM CORPO EM MOVIMENTO SOB A AÇÃO DE UMA FORÇA CENTRÍPETA CONSTANTE IRÁ PRODUZIR UMA TRAJETÓRIA CIRCULAR. FONTE: O AUTOR.....	201
FIGURA 15: ILUSTRAÇÃO DO PROBLEMA 4.	202
FIGURA 16: FIGURA DA PROPOSIÇÃO 8 DO LIVRO I DOS <i>PRINCIPIA</i> . ADAPTADO PELO AUTOR. .	202
FIGURA 17: FIGURA DA PROPOSIÇÃO 9 DO LIVRO I DOS <i>PRINCIPIA</i> . ADAPTADO PELO AUTOR. .	203
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DE NEWTON DA PROPOSIÇÃO 1 DO LIVRO I.	210
FIGURA 19 – MINHA ILUSTRAÇÃO MANUAL DO PROCEDIMENTO DE NEWTON NA PROPOSIÇÃO 1 DO LIVRO I.	211
FIGURA 20 – DESTAQUE DOS PRIMEIROS DOIS TRIÂNGULOS DA FIGURA ANTERIOR. PELA “PROPRIEDADE DA MEDIANA” A ÁREA DOS DOIS TRIÂNGULOS RECORTADOS POR SB SÃO IGUAIS. FONTE: O AUTOR	211
FIGURA 21 – OS TRIÂNGULOS SBC E SBC TÊM A MESMA BASE E A MESMA ALTURA, PORTANTO POSSUEM ÁREAS IGUAIS.....	212
FIGURA 22 – ILUSTRAÇÃO MINHA DA PROPOSIÇÃO 38 DE EUCLIDES.	212
FIGURA 23 – ILUSTRAÇÃO DO COROLÁRIO 1 DA PROPOSIÇÃO 1 DO LIVRO I. SA’ E SG’ SÃO AS DISTÂNCIAS PERPENDICULARES ATÉ O PROLONGAMENTO DAS TANGENTES NOS PONTOS A E G. FONTE: O AUTOR.....	214
FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO DA <i>SAGITTA</i> , QUE É A DISTÂNCIA DELIMITADA PELO ARCO AC. A FORÇA CENTRÍPETA É PROPORCIONAL À <i>SAGITTA</i> . FONTE: <i>MC</i> , p.40. ADAPTADO PELO AUTOR.	216
FIGURA 25 – A REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DA PROPOSIÇÃO 2 É IGUAL À PROPOSIÇÃO 1. .	218
FIGURA 26 – PELA PROPOSIÇÃO 40 DE EUCLIDES BV ESTÁ NA DIREÇÃO DO PONTO S.	219
FIGURA 27 – ILUSTRAÇÃO MINHA DA PROPOSIÇÃO 4 DO LIVRO I.....	220
FIGURA 28 – <i>SAGITTA</i> DE UM ARCO QUALQUER NUM CÍRCULO.	221
FIGURA 29 – <i>SAGITTA</i> EM ASSOCIAÇÃO COM UM TRIÂNGULO RETÂNGULO INSCRITO NUMA CIRCUNFERÊNCIA.....	222
FIGURA 30 – ILUSTRAÇÃO MINHA DO COROLÁRIO 9 DA PROP. 4 DO LIVRO I.	227
FIGURA 31 – SUBTENSA DA TANGENTE NO PONTO P DE UM CÍRCULO.	228
FIGURA 32 – REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DE NEWTON NA PROPOSIÇÃO 4 DO LIVRO I NA PRIMEIRA EDIÇÃO DOS <i>PRINCIPIA</i>	228
FIGURA 33 – REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DE NEWTON NA PROP.6 DO LIVRO I.	231
FIGURA 34 – PRINCIPAIS SEGMENTOS DE UMA ELIPSE.	233
FIGURA 35 – DISTÂNCIAS FOCALIS DE UMA ELIPSE.....	234
FIGURA 36 – TANGENTE E DISTÂNCIAS FOCALIS EM UM PONTO DA ELIPSE.	234

FIGURA 37 – RETA NORMAL À TANGENTE NUMA ELIPSE.....	235
FIGURA 38 – TANGENTES EM PONTOS OPOSTOS NUMA ELIPSE.	236
FIGURA 39 – DIÂMETROS CONJUGADOS NUMA ELIPSE.	236
FIGURA 40 – PARALELOGRAMOS CIRCUNSCRITOS NUMA ELIPSE.....	237
FIGURA 41 – ORDENADA DOS EIXOS DE UMA ELIPSE.....	238
FIGURA 42 – ORDENADAS DOS DIÂMETROS CONJUGADOS DE UMA ELIPSE.....	239
FIGURA 43 – CORPO P SE MOVENDO NUMA TRAJETÓRIA ELÍPTICA. S E H SÃO OS FOCOS DA ELIPSE, EQUANTO C É O CENTRO. AA' E BB' SÃO OS EIXOS PRINCIPAL E SECUNDÁRIO.	
FONTE: O AUTOR.....	240
FIGURA 44 – CONSTRUÇÃO GEOMÉTRICA ENSINADA NAS PROP. 4 E 6 DOS <i>PRINCIPIA</i>	241
FIGURA 45 – DCK E PCG SÃO OS DIÂMETROS CONJUGADOS DA ELIPSE.	242
FIGURA 46 – PS E PH SÃO AS CORDAS FOCALIS DA ELIPSE.	242
FIGURA 47 – FIGURA DE NEWTON NA PROP. 11 DOS <i>PRINCIPIA</i>	243
FIGURA 48 – SEGMENTO SEIP RETIRADO DA FIGURA ANTERIOR	244
FIGURA 49 – MOVIMENTO RETRÓGRADO DE MARTE	264
FIGURA 50 – SISTEMA DE COORDENADAS ECLÍPTICAS	266
FIGURA 51 – SÍMBOLOS DAS 12 CONSTELAÇÕES DO ZODÍACO	267
FIGURA 52 – PRECESSÃO DOS EQUINÓCIOS	268
FIGURA 53 – DIAGRAMA DE KEPLER PARA O MOVIMENTO DE MARTE NUM SISTEMA GEOCÊNTRICO.....	269
FIGURA 54 – MOVIMENTO RETRÓGRADO DE MARTE EXPLICADO PELA PERSPECTIVA HELIOCENTRISTA	270
FIGURA 55 – O SISTEMA GEO-HELIOCÊNTRICO DE TYCHO BRAHE	271
FIGURA 56 – LEI DAS ÁREAS DE KEPLER NUMA TRAJETÓRIA ELÍPTICA. FONTE: HARPER, 2011, p.12.	272
FIGURA 57 – REGISTROS DAS OBSERVAÇÕES TELESCÓPICAS DE GALILEU DAS LUAS DE JÚPITER, COMPILADAS PELOS JESUÍTAS ASTRÔNOMOS DO COLÉGIO ROMANO. FONTE: HARPER, 2011, p.52.	275
FIGURA 58 – FASES DE VÊNUS EXPLICADA DE MODO SATISFATÓRIO PELO SISTEMA COPERNICANO, MAS NÃO PELO SISTEMA PTOLOMAICO. FONTE: HARPER, 2011, p. 58.	275
FIGURA 59 – TELESCÓPIO DE 123 PÉS DE HUYGENS	276
FIGURA 60 – MODELO DOS VÓRTICES DE DESCARTES.....	278
FIGURA 61 – SEGUNDA PARTE DO <i>HOROLOGIIUM</i> DE HUYGENS NA PUBLICAÇÃO ORIGINAL EM LATIM.	284

FIGURA 62 – HIPÓTESES DO LIVRO III DOS <i>PRINCIPIA</i> NA PRIMEIRA EDIÇÃO EM LATIM.	285
FIGURA 63 – ANOTAÇÕES DE NEWTON NA SUA PRIMEIRA EDIÇÃO PARTICULAR DOS <i>PRINCIPIA</i> VISANDO AS ALTERAÇÕES PARA A SEGUNDA EDIÇÃO.	287
FIGURA 64 – ÂNGULO DE ELONGAÇÃO DE UM DOS SATÉLITES DE JÚPITER	301
FIGURA 65 – SOMBRAS DOS SATÉLITES DE JÚPITER EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE POSIÇÃO RELATIVAS.....	306
FIGURA 66 – ÂNGULO DE ELONGAÇÃO MÁXIMA ENTRE VÊNUS E O SOL.	307
FIGURA 67 – APSIDES DAS ÓRBITAS DA TERRA E DA LUA. OBS.: FIGURA FORA DE ESCALA.....	324
FIGURA 68 – ÓRBITA GIRATÓRIA.	325
FIGURA 69 – ÂNGULO DE PRECESSÃO DA ÓRBITA GIRATÓRIA	326
FIGURA 70 – DIAGRAMA VETORIAL DO PROBLEMA DOS TRÊS CORPOS. PROP. 66, LIVRO I.....	334
FIGURA 71 – DIAGRAMA VETORIAL DA “FORÇA ESTRANHA” DO SOL ATUANDO NA LUA	336
FIGURA 72 – “FORÇA ESTRANHA” DURANTE A <i>SIZÍGIA</i>	339
FIGURA 73 – EXPERIMENTO IMAGINADO POR MERSENE PARA DETERMINAR <i>S1seg</i>	345
FIGURA 74 – DIAGRAMA DO COR.4, PROP.9 DO LIVRO I.....	353
FIGURA 75 – AÇÃO E REAÇÃO EM DIFERENTES SITUAÇÕES.	376
FIGURA 76 – ATRAÇÃO DAS PARTES DE A EM DIREÇÃO A B E DAS PARTES DE B EM DIREÇÃO A A.	399
FIGURA 77 – ATRAÇÃO DE CADA PARTE DE A EM DIREÇÃO A CADA PARTE DE B, E VICE-VERSA.	400
FIGURA 78 – ATRAÇÃO ENTRE AS PARTES DA TERRA E DA LUA HIPOTETICAMENTE IMAGINADAS COM 9 E 4 PARTES RESPECTIVAMENTE. CADA PARTE DA TERRA ATRAI TODAS AS PARTES DA LUA. E CADA PARTE DA LUA ATRAI TODAS AS PARTES DA TERRA. FONTE: O AUTOR	406
FIGURA 79 – FORÇA ABSOLUTA ENTRE A E B.	406
FIGURA 80 – FORÇA ENTRE A PARTE ‘1’ DA TERRA E A PARTE ‘2’ DA LUA.	407
FIGURA 81 – DESLOCAMENTO DA TERRA EM RELAÇÃO A UMA ESTRELA FIXA MUITO AFASTADA. A FIGURA ESTÁ FORA DE ESCALA.....	416
FIGURA 82 – DIAGRAMA DOS DOIS GLOBOS GIRANTES SUGERIDO NO ESCÓLIO DAS DEFINIÇÕES.	420
FIGURA 83 – CORPO DE MESMA MASSA A IGUAL DISTÂNCIA DO SOL E DOS PLANETAS.	427
FIGURA 84 – DIAGRAMA PARA DETERMINAR A RAZÃO ENTRE AS FORÇAS ACELERATIVAS EM DIREÇÃO AO SOL E A JÚPITER A UMA MESMA DISTÂNCIA DO CENTRO DESSES ASTROS. FONTE: O AUTOR.....	429
FIGURA 85 – ELONGAÇÃO MÁXIMA DE VÊNUS NA SUA ÓRBITA EM TORNO DO SOL.	431

FIGURA 86 – ELONGAÇÃO MÁXIMA DE CALISTO EM RELAÇÃO À TERRA E EM RELAÇÃO AO SOL.	432
FIGURA 87 – DETERMINAÇÃO DO RAIO DA ÓRBITA DE CALISTO EM TORNO DE JÚPITER EM UNIDADES ASTRONÔMICAS.	433
FIGURA 88 – ÂNGULO DE PARALAXE SOLAR.....	434
FIGURA 89 – CENTRO DE GRAVIDADE DO SOL E JÚPITER. FIGURA FORA DE ESCALA.	436
FIGURA 90 – CENTRO DE GRAVIDADE DO SOL E SATURNO. FIGURA FORA DE ESCALA.....	437
FIGURA 91 – CENTRO DE GRAVIDADE DO SOL E DOS PLANETAS. FIGURA FORA DE ESCALA.....	437
FIGURA 92 – ESTRUTURA IDEALIZADA DO MUNDO, SOB A TESE DA SIMPLICIDADE DA NATUREZA	451
FIGURA 93 – VARIEDADE DE PROPRIEDADES DOS CORPOS SOB A TESE DA SIMPLICIDADE DA NATUREZA	452
FIGURA 94 – HIERARQUIA DAS CAUSAS E EFEITOS DE ACORDO COM PRINCÍPIO DA SIMPLICIDADE DA NATUREZA.....	457
FIGURA 95 – APLICAÇÃO DAS REGRAS 3 E REGRA 4 ÀS INTERAÇÕES DA NATUREZA	473
FIGURA 96 – MÉTDO INDUTIVO E DEDUTIVO DE ARISTÓTELES. FONTE: LOSEE, 2001, p.5.	590
FIGURA 97 – PIRÂMIDE INDUTIVA DE BACON. FONTE: LOSEE, 2001, p.58.....	596
FIGURA 98 – DIFERENÇA DOS MODELOS NAS ETAPAS DA ANÁLISE E SÍNTESE NOS <i>PRINCIPIA</i> . FONTE: O AUTOR.....	682
FIGURA 99 – DIAGRAMA COMPARATIVO DO ESTILO NEWTONIANO. FONTE: O AUTOR.....	686
FIGURA 100 – DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE MODELOS NA ANÁLISE E SÍNTESE. FONTE: O AUTOR.	687
FIGURA 101 – DIAGRAMA DE ELIMINAÇÃO DE HIPÓTESES E CONFIRMAÇÃO NA CIÊNCIA. FONTE: O AUTOR.	787
FIGURA 102 – DIAGRAMA DE ELIMINAÇÃO DE HIPÓTESES NOS <i>PRINCIPIA</i> . FONTE: O AUTOR. ..	788
FIGURA 103 – DIAGRAMA DA SÍNTESE. FONTE: O AUTOR.	788
FIGURA 104 – DIAGRAMA DA ANÁLISE E SÍNTESE NA BUSCA DE UMA CAUSA MAIS GERAL.	789
FIGURA 105 – DIAGRAMA DA ANÁLISE E SÍNTESE NUMA ETAPA MAIS GERAL. FONTE: O AUTOR.	789
FIGURA 106 – PROCESSO DE CONFIRMAÇÃO DA HIPÓTESE DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS. FONTE: O AUTOR.....	792
FIGURA 107 – PROCESSO DE ANÁLISE DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS. FONTE: O AUTOR.....	793
FIGURA 108 – PROCESSO DE ANÁLISE DA LEI DA RELATIVIDADE. FONTE: O AUTOR.....	794

FIGURA 109 – PROCESSO DE CONFIRMAÇÃO COM BASE NA RELATIVIDADE GERAL. FONTE: O AUTOR.	796
FIGURA 110 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE UNIFICAÇÃO NA FÍSICA. FONTE: O AUTOR.	800
FIGURA 111 – DIAGRAMA DO PROCESSO DE UNIFICAÇÃO NA FÍSICA INCLUINDO A MECÂNICA QUÂNTICA. FONTE: O AUTOR.	802
FIGURA 112 – GRÁFICO DAS FORÇAS INTERATÔMICAS. FONTE: DOMÍNIO PÚBLICO.	804
FIGURA 113 – CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA COGNITIVA. FONTE: O AUTOR.	843
FIGURA 114 – EXPERIMENTO DO PLANO INCLINADO DE GALILEU PARA EVIDÊNCIAR O MOVIMENTO HORIZONTAL UNIFORME. FONTE: DOMÍNIO PÚBLICO	885
FIGURA 115 – CENTRO DE GRAVIDADE NUMA BALANÇA.	920
FIGURA 116 – CENTRO DE GRAVIDADE DE DUAS ESFERAS COLIDINDO.....	921
FIGURA 117 – DURANTE A COLISÃO DE DOIS CORPOS O CENTRO A POSIÇÃO DO CENTRO DE GRAVIDADE PERMANECE EM REPOUSO. FONTE: O AUTOR.	921
FIGURA 118 – DOIS CORPOS DE MASSAS UNITÁRIAS.	922
FIGURA 119 – DOIS CORPOS DE MASSAS DIFERENTES.	923
FIGURA 120 – DOIS CORPOS DE MASSAS IGUAIS DESCREVENDO ÓRBITAS CIRCULARES EM TORNO DO CENTRO DE GRAVIDADE. FONTE: O AUTOR.	924
FIGURA 121 – DOIS CORPOS DE MASSAS DIFERENTES.	925
FIGURA 122 – DOIS CORPOS DE MASSAS IGUAIS SOB AÇÃO DE UMA FORÇA DE ATRAÇÃO PROPORCIONAL À DISTÂNCIA.	926
FIGURA 123 – DOIS CORPOS DE MASSAS IGUAIS SOB AÇÃO DE UMA FORÇA DE ATRAÇÃO PROPORCIONAL AO QUADRADO DA DISTÂNCIA. FONTE: O AUTOR.	926
FIGURA 124 – DISTORÇÃO DESPREZÍVEL NAS ÓRBITAS DOS SATÉLITES DE JÚPITER E SATURNO.	930
FIGURA 125 – CENTRO DE GRAVIDADE DO SISTEMA TERRA, LUA E SOL.	932
FIGURA 126 – ESTUDOS DE ARQUIMEDES SOBRE O CENTRO DE GRAVIDADE EM BALANÇAS ESTÁTICAS	953
FIGURA 127 – COMPARAÇÃO ENTRE DOIS CORPOS NUMA BALANÇA ESTÁTICA E COLIDINDO FRONTALMENTE.....	954

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ALTERAÇÕES DAS HIPÓTESES E REGRAS NAS TRÊS EDIÇÕES DOS <i>PRINCIPIA</i>	288
TABELA 2 – TEMPOS PERIÓDICOS DOS SATÉLITES DE JÚPITER	300
TABELA 3 – ÂNGULO DE ELONGAÇÃO DOS SATÉLITES DE JÚPITER	302
TABELA 4 – ELONGAÇÕES DOS QUATRO SATÉLITES DE JÚPITER DE ACORDO COM VÁRIOS ASTRÔNOMOS	303
TABELA 5 – COMPARAÇÃO ENTRE A MÉDIA DA ELONGAÇÃO DOS QUATRO SATÉLITES DE JÚPITER OBTIDAS PELA OBSERVAÇÃO DIRETA E PELA REGRA DOS PERÍODOS DE KEPLER	304
TABELA 6 - ESPAÇO PERCORRIDO EM 1s DE QUEDA, POR VÁRIOS EXPERIMENTADORES NO SÉC. XVII.....	350
TABELA 7 – DISTÂNCIA TERRA-LUA POR VÁRIOS ASTRÔNOMOS, INFORMADO POR NEWTON NOS <i>PRINCIPIA</i>	352
TABELA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESPAÇO PERCORRIDO EM 1s PELO PÊNDULO DE HUYGENS E O TESTE DA LUA	357
TABELA 9 – QUANTIDADE DE MATÉRIA DO SOL E PLANETAS	435

LISTA DE ABREVIATURAS

- Correspondence** – *The Correspondence of Isaac Newton* (A correspondência de Isaac Newton). Coletânea das correspondências de Newton editadas por H. W. Turnbull, J. F. Scott, A. R. Hall, and L. Tilling, em 7 volumes. Newton, 1959–1977.
- De Gravitatione** – *De Gravitatione et Aequipondio Fluidorum*. Manuscrito de Newton publicado postumamente, editado por Andrew Janiak em *Newton Philosophical Writings*, 2004 (p.12-39).
- De Mundi Systemate** – *De Mundi systemate liber Isaaci Newtoni*. Manuscrito de Newton publicado postumamente em 1728. Uma tradução inglesa desse texto foi incluída por Florian Cajori em sua edição do *Principia* de 1934 (vol. 2, p. 549-626). Newton, 1974.
- De Quadratura** – *De Quadratura Curvarum*. Tratado matemático de Newton sobre as quadraturas de curvas publicado como apêndice da *Óptica* em 1704.
- Dialogo** – *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (Diálogo sobre os dois máximos sistemas de mundo). Publicado em 1632. Usei a tradução para o inglês de Stillman Drake, de 1953 e revisada em 1967, e principalmente a tradução para o português, de Pablo Rubén Mariconda (2011). Galileu, 1953, 1967; Galileu, 2011.
- Discorsi** – *Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica & i movimenti locali* (Discursos e demonstrações matemáticas em torno das duas novas ciências da mecânica e do movimento local), publicado por Galileu Galilei em 1638. Nesse trabalho utilizei as traduções para o inglês de Henry Crew e Alfonso de Salvio, de 1914, e de Stillman Drake, de 1989. Galilei, 1914; Galileu, 2008.

- Horologium –** *Horologium Oscilatorium* (O Relógio de Pêndulo). Obra de Christiaan Huygens, publicada em 1673. Uso o original em latim e a tradução para o inglês de Richard Blackwell, de 1986. Huygens, 1673; Huygens, 1986.
- Lectioes –** *Lectioes Geometricae* (Curso de Geometria). Conjunto de *lectures* sobre a geometria depositadas em Cambridge por Isaac Barrow, e publicadas por volta de 1673. Nesse trabalho utilizo a tradução para o inglês de James Child, de 1916, sob o título de *Geometrical Lectures of Isaac Barrow*. Barrow, 1916.
- MP –** *The Mathematical Papers of Isaac Newton* (Os trabalhos matemáticos de Isaac Newton). Coletânea de escritos matemáticos de Newton editados, traduzidos e comentados por Derek T. Whiteside em 8 volumes. Whiteside, 2008.
- Opticks -** *Opticks: Or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light* (*Óptica*: ou um tratado sobre as reflexões, refrações, inflexões e cores da luz). Publicado por Newton em 1704 (primeira edição), em inglês, e em 1706 em latim. Nesse trabalho usei a terceira edição de 1721.
- Principia –** *Philosophia Naturalia Principia Mathematica* (Princípios Matemáticos da Filosofia Natural), de 1687. Nesse trabalho utilizei com mais frequência as traduções para o inglês de Andrew Motte, de 1729, adaptada por Florian Cajori em 1934, e a tradução de I. Bernard Cohen e Anne Whitman de 1999. Em algumas situações, devidamente indicadas, ofereço uma tradução diretamente do original em latim, que também podem receber a distinção referente as edições: primeira edição (1ed), e segunda edição (2ed). Distingo as citações traduzidas das edições de Mote-Cajori e de Cohen-Whitman pelas iniciais *MC* e *CW*, respectivamente, nesse trabalho.

MC –	Tradução dos <i>Principia</i> de Motte-Cajori. Newton, 1934.
CW –	Tradução dos <i>Principia</i> de Cohen-Whitman. Newton, 1999.
Princípios –	<i>Princípios de Filosofia</i> , influente obra de Rene Descartes publicada em 1644, e que teve grande influência no cenário filosófico e científico do século XVII.
Prefácio (1ed) –	<i>Auctoris Praefatio ad Lectorem</i> . Prefácio do autor à primeira edição dos <i>Principia</i> , de 1686.
Prefácio (2ed) –	<i>Editoris Praefatio</i> . Prefácio de Roger Cotes à segunda edição dos <i>Principia</i> , de 1713.
Usefulness –	<i>The Usefulness of mathematical Learning</i> (A utilidade do aprendizado da matemática). Série de <i>lectures</i> de Isaac Barrow proferidas para o grande público sobre a importância do estudo da matemática, depositadas em Cambridge sob o título de <i>Lectiones Mathematicae</i> , e publicadas no início da década de 1680. Utilizo a tradução para o inglês de John Kirkby, em 1734, e por vezes a versão em latim na edição das obras matemáticas de Barrow por Whewel, em 1860. Barrow, 1734; Barrow, 1860.

SUMÁRIO

VOLUME I

O método dos *Principia* de Newton – da perspectiva histórica

INTRODUÇÃO 26

NOTAS HISTORIOGRÁFICAS 38

Parte 1.

O prefácio aos Principia - A mecânica universal.....54

1 PRELIMINARES AO PREFÁCIO 60

1.1 A MECÂNICA DOS ANTIGOS 60

1.2 A MATEMATIZAÇÃO DA NATUREZA DOS MODERNOS 67

1.2.1 A Filosofia Natural Escolástica 67

1.2.2 A Filosofia Mecânica..... 71

1.2.3 A nova Ciência do Movimento..... 74

1.3 A GEOMETRIA MECÂNICA DE BARROW 77

1.3.1 O método cinemático no *Lectiones Geometricae*..... 79

1.3.2 As vantagens do método geométrico cinemático 83

1.3.3 A matemática causal..... 85

2 EXPOSIÇÃO DO PREFÁCIO 89

2.1 OBJETIVO E PERTINÊNCIA DA OBRA 90

2.2 O OBJETIVO DA FILOSOFIA NATURAL DE NEWTON 92

2.3 A ORIGEM MECÂNICA DA GEOMETRIA 94

2.4 CONSEQUÊNCIAS DA ORIGEM MECÂNICA DA GEOMETRIA 96

2.5 A MECÂNICA RACIONAL DE NEWTON 98

2.6 A EXATIDÃO GEOMETRICA DA NATUREZA..... 100

2.7 DIVISÕES E MÉTODO 104

2.7.1 Análise e Síntese..... 105

2.7.2 Um novo programa metodológico de filosofia natural..... 109

3 DISCUSSÃO SOBRE O PREFÁCIO 112

3.1	GEOMETRIA, MECÂNICA E EMPIRISMO	112
3.1.1	A concepção matemática de Hobbes	115
3.1.2	As concepções matemáticas de Barrow e Newton	117
3.2	NATUREZA, MECÂNICA E DEUS.....	121
3.3	A MECHANICAE UNIVERSALIS	123
3.4	PRINCÍPIOS MATEMÁTICOS: EM QUE SENTIDO?.....	128
3.5	REFLEXÕES PRELIMINARES SOBRE O MÉTODO DOS <i>PRINCIPIA</i>	132

Parte 2.

<i>O Livro I dos Principia - A geometria mecânica de forças.....</i>	<i>134</i>

4 O MÉTODO AXIOMÁTICO DOS *PRINCIPIA* 139

4.1	O MÉTODO AXIOMÁTICO	139
4.2	ELEMENTOS DO MÉTODO AXIOMÁTICO.....	142
4.3	A ESTRUTURA AXIOMÁTICA DOS <i>PRINCIPIA</i>	146

5 OS PRINCÍPIOS MATEMÁTICO-MECÂNICOS 149

5.1	LEIS DO MOVIMENTO	150
5.1.1	Primeira lei do Movimento.....	150
5.1.2	Força Inata e Força Impressa.....	154
5.1.3	Segunda lei do movimento	156
5.1.4	Terceira lei do movimento.....	159
5.1.5	O paralelogramo de Newton.....	161
5.2	FUNDAMENTOS EMPÍRICOS DAS LEIS DO MOVIMENTO	164
5.2.1	Galileu e Huygens	164
5.2.2	Wren, Huygens e Wallis sobre as leis dos impactos	169
5.2.3	Contribuições de Newton na análise dos impactos	173
5.2.4	A terceira lei nas atrações.....	181
5.3	A FORÇA CENTRÍPETA.....	185
5.3.1	Def. 5: a definição geral de força centrípeta.....	185
5.3.2	Def. 6-8: quantidade absoluta, acelerativa e motriz da força centrípeta.....	189

6 A CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA MECÂNICA DE FORÇAS 197

6.1	AXIOMAS DA GEOMETRIA MECÂNICA DE NEWTON.....	197
6.2	APLICAÇÃO DA GEOMETRIA MECÂNICA DE FORÇAS	201

7	A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE HOOKE	205
7.1	O PROBLEMA DE HOOKE.....	205
7.2	PROP. 1 E 2: LEI DAS ÁREAS E FORÇA CENTRÍPETA	209
7.2.1	Características gerais da força centrípeta	209
7.2.2	O significado dinâmico da lei das áreas	217
7.3	PROP. 4: FORÇA CENTRÍPETA NUMA TRAJETÓRIA CIRCULAR	220
7.3.1	Demonstração da proposição 4.....	221
7.3.2	Possibilidades de leis de força para o movimento circular.....	223
7.3.3	Sagitta e Subtensa	226
7.4	PROP. 6: FORÇA CENTRÍPETA NUMA TRAJETÓRIA QUALQUER.....	229
7.5	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DAS ELIPSES	232
7.6	PROP. 11: FORÇA CENTRÍPETA PARA TRAJETÓRIAS ELÍPTICAS.....	240
7.7	PARA ALÉM DO PROBLEMA DE HOOKE.....	247

Parte 3.

	<i>O Livro III dos Principia - A gravitação universal e o sistema do mundo.....</i>	257

8 PRELIMINARES AO LIVRO III 261

8.1	O PROBLEMA DO SISTEMA DO MUNDO	261
8.1.1	A astronomia	263
8.1.2	O telescópio	274
8.1.3	Causas físicas dos movimentos planetários.....	277
8.2	O MÉTODO AXIOMÁTICO NA FILOSOFIA NATURAL	280

9 PRINCÍPIOS DO LIVRO III 290

9.1	REGRAS PARA FILOSOFAR	290
9.1.1	Regras 1 e 2: sobre as causas das coisas naturais	291
9.1.2	A simplicidade da natureza	293
9.1.3	Regra 2: causas e efeitos de mesma espécie.....	295
9.2	FENÔMENOS	297
9.2.1	Fen. 1 e 2: satélites de Júpiter e Saturno	299
9.2.2	Fen. 3 e 4: planetas primários, Terra e Sol	305
9.2.3	Fen. 5 e 6: a lei das áreas nos planetas primários e na Lua	308
9.2.4	Caracterização dos Fenômenos	310

9.3	PRINCÍPIOS MATEMÁTICO-MECÂNICOS E TEOREMAS DERIVADOS.....	313
10	O ARGUMENTO DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL	316
10.1	PROP. 1: A FORÇA CENTRÍPETA ATUANDO NOS SATÉLITES DE JÚPITER E SATURNO .	316
10.2	PROP. 2: A FORÇA CENTRÍPETA ATUANDO NOS PLANETAS PRIMÁRIOS	321
10.3	PROP. 3: A FORÇA CENTRÍPETA ATUANDO NA LUA	328
10.3.1	A hipótese da “força estranha” do Sol atuando a Lua	333
10.4	PROP. 4: A GRAVIDADE COMO CAUSA DA FORÇA CENTRÍPETA DA LUA.....	340
10.4.1	O Pêndulo e o Fenômeno da queda dos corpos	342
10.4.2	O teste da Lua	351
10.4.3	Aplicação das Regras 1 e 2.....	358
10.5	PROP. 5: GRAVIDADE EM DIREÇÃO A JÚPITER, SATURNO E SOL	362
10.5.1	Cor. 1: a gravidade em direção a todos os planetas.....	364
10.5.2	Hipóteses para a causa da gravidade	370
10.5.3	Cor.1-3: a gravidade como atração mútua entre os planetas	380
10.5.4	O problema da demonstração da atração mútua entre os planetas	383
10.6	PROP. 6: A QUANTIDADE MOTRIZ DA FORÇA DA GRAVIDADE	388
10.6.1	A proporcionalidade entre a gravidade e a quantidade de matéria.....	388
10.6.2	A gravidade como atração mútua entre os planetas e todos os corpos.....	393
10.7	PROP. 7: A GRAVIDADE COMO ATRAÇÃO MÚTUA ENTRE TODOS OS CORPOS	395
10.7.1	A quantidade absoluta da força da gravidade.....	401
10.7.2	A gravidade como interação fundamental	405
11	O SISTEMA DO MUNDO	410
11.1	O ESCÓLIO DAS DEFINIÇÕES.....	412
11.2	A SÍNTESE	422
11.3	A DETERMINAÇÃO DAS QUANTIDADES DE MATÉRIA DOS PLANETAS	427
11.4	A DETERMINAÇÃO DO PONTO IMÓVEL DO MUNDO	436
11.5	A DETERMINAÇÃO DOS VERDADEIROS MOVIMENTOS PLANETÁRIOS	440
 <i>Parte 4.</i>		
<i>Segunda e terceira edição - o método dos Principia.....</i>		<i>443</i>
12	REGRAS 3 E 4: A EPISTEMOLOGIA DOS <i>PRINCIPIA</i>	445
12.1	REGRA 3: O FUNDAMENTO DE TODA A FILOSOFIA	445

12.1.1	Indução e simplicidade da natureza.....	450
12.1.2	A transmutação e a hipótese 3	459
12.1.3	A aplicação da Regra 3 para o caso da gravidade	461
12.2	REGRA 4: CONTRA-EXEMPLOS E HIPÓTESES CONTRÁRIAS	466
13	O ESCÓLIO GERAL E A FILOSOFIA EXPERIMENTAL	477
13.1	A DEDUÇÃO A PARTIR DOS FENÔMENOS.....	480
13.2	HYPHOTHESES NON FINGO	489
13.2.1	Filosofia Experimental e Filosofia Especulativa	491
13.2.2	A defesa da filosofia experimental dos <i>Principia</i>	498
13.2.3	Do hypotheses non fingo ao nascimento de uma ciência empírica	503
14	O MÉTODO DA ANÁLISE E SÍNTESE DOS <i>PRINCIPIA</i>	513
14.1	O PREFÁCIO À SEGUNDA EDIÇÃO E O MÉTODO DA ANÁLISE E SÍNTESE	513
14.2	A ANÁLISE DEMONSTRATIVA DOS <i>PRINCIPIA</i>	524
	REFERÊNCIAS	541

VOLUME II

O método dos principia - da perspectiva da filosofia da ciência

INTRODUÇÃO 585

15	FILOSOFIA DA CIÊNCIA E SEUS PROBLEMAS	589
15.1	TEORIAS DO MÉTODO DA CIENCIA DA ANTIGUIDADE ATÉ O SÉC. XVII	589
15.2	FUNDAMENTAÇÃO DA CIÊNCIA EMPÍRICA NOS SÉC. XVII E XVIII.....	597
15.3	FILOSOFIA DA CIÊNCIA DO SÉC. XX: O POSITIVISMO LÓGICO E SEUS CRÍTICOS.....	603
15.4	OS PROBLEMAS DO FALSEACIONISMO	611
15.5	THOMAS KUHN E A HISTÓRIA DA CIÊNCIA	613
15.6	FILOSOFIA DA CIÊNCIA NAS DÉCADAS DE 1970 E 1980	619
15.7	DISCUSSÕES ATUAIS DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA	621
16	A TRADIÇÃO COHENIANA E O MÉTODO DOS <i>PRINCIPIA</i>	628
16.1	COHEM E O ESTILO NEWTONIANO.....	628
16.2	GEORGE SMITH E UM MÉTODO DISTINTO DO HIPOTÉTICO-DEDUTIVO.....	637
16.3	HARPER, DUCHEYNE E UM MÉTODO MAIS SOFISTICADO QUE O H-D PADRÃO	647
16.4	DISCUSSÃO, ANÁLISE E CRÍTICAS À TRADIÇÃO COHENIANA	655

17	UMA ALTERNATIVA À TRADIÇÃO COHENIANA	664
17.1	A HIERARQUIA DAS CAUSAS	664
17.2	DICREPÂNCIAS, NOVOS FENÔMENOS E MODELOS	675
17.3	IMPLICAÇÕES PARA A FILOSOFIA DA CIÊNCIA.....	683
18	O CONFIRMACIONISMO DE NEWTON	689
18.1	CRITÉRIOS DE CONFIRMAÇÃO DE NEWTON.....	691
18.2	CONFIRMAÇÃO E FALSEAÇÃO	698
18.3	CONFIRMAÇÃO E INDUÇÃO	708
18.4	CONFIRMAÇÃO, CONVERGÊNCIA E MATEMÁTICA	716
18.5	IMPLICAÇÕES PARA A FILOSOFIA DA CIÊNCIA	723
18.5.1	Ponderações sobre o problema da indução.....	723
18.5.2	O realismo convergente	729
18.5.3	O programa da ciência teórica dos <i>Principia</i>	730
19	A CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA APÓS OS <i>PRINCIPIA</i>	734
19.1	A CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA NO SÉC. XVIII.....	735
19.2	A CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA DO SÉC. XIX.....	740
19.2.1	Panorama histórico	740
19.2.2	A continuidade do programa metodológico dos <i>Principia</i> no séc. XIX	743
19.3	A CIÊNCIA EMPÍRICO MATEMÁTICA NO SÉC. XX.....	751
19.3.1	Panorama histórico	751
19.3.2	Transição da gravitação universal para a relatividade geral.....	754
19.3.3	Observações sobre a transição da gravitação para a relatividade geral	769
19.4	IMPLICAÇÕES PARA A FILOSOFIA DA CIÊNCIA.....	781
20	O PROGRAMA DA CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA	784
20.1	SÍNTESE DO PROGRAMA METODOLÓGICO DOS <i>PRINCIPIA</i>	784
20.2	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO PROGRAMA METODOLÓGICO DOS <i>PRINCIPIA</i>	790
20.3	IMPLICAÇÕES PARA A FILOSOFIA DA CIÊNCIA	805
21	UMA IMAGEM DA CIÊNCIA INSPIRADA NOS <i>PRINCIPIA</i>	817
21.1	A RACIONALIDADE DO CONHECIMENTO.....	818
21.2	UM ESBOÇO DE IMAGEM DO CONHECIMENTO E DA CIÊNCIA	823

CONCLUSÃO 846

REFERÊNCIAS 855

APÊNDICE A – FUNDAMENTOS EMPÍRICOS DA PRIMEIRA LEI DO MOVIMENTO	881
APÊNDICE B – O LIVRO II DOS <i>PRINCIPIA</i>	899
APÊNDICE C – A HIPÓTESE DA ATRAÇÃO INTERPLANETÁRIA	916
APÊNDICE D – A DEFINIÇÃO DE QUANTIDADE DE MATÉRIA DOS <i>PRINCIPIA</i>	940
APÊNDICE E – VERSÃO ALTERNATIVA DO ESCÓLIO DAS DEFINIÇÕES	959
ANEXO A – Prob. 9 dos <i>Principia</i> : Força centrípeta numa espiral equiangular.....	966
ANEXO B – Prob. 5 dos <i>Principia</i> : Força centrípeta em relação ao centro de uma elipse	967
ANEXO C – Prob.6 dos <i>Principia</i> : Força centrípeta em relação a um dos focos da elipse.	968

OBRAS CONSULTADAS, POR CATEGORIA 969

INTRODUÇÃO

O brilhante filósofo da ciência argentino Mario Bunge – falecido coincidentemente no mesmo ano em que reviso esta introdução – já na década de 1980 falava do surgimento de uma *crise epistêmica* no mundo. Diante do relativismo trazido pela emergência das novas correntes da sociologia da ciência, dizia ele em tom dramático que “o grande dilema do nosso tempo é a racionalidade e realismo ou extinção”¹. À época, ele não foi bem compreendido. Hoje, pouco mais de três décadas depois, não nos é difícil perceber que não só existe uma crise epistêmica em curso, como essa crise parece se aproximar do seu auge. Observamos frequentemente uma guerra de *verdades*, onde o subjetivismo e o relativismo se tornaram a tônica predominante. A possibilidade de um conhecimento objetivo, que tornaria menos complexos os conflitos humanos, parece um ideal distante, no qual simplesmente deixamos de acreditar. Na esteira do que Bunge parecia sugerir, penso que ao menos em parte essa crise foi alimentada pelo fracasso histórico da filosofia em esclarecer um dos problemas centrais da epistemologia: o *problema da racionalidade científica*. O que distingue um conhecimento *racional* de outro *não-racional*? Há conhecimentos genuinamente *verdadeiros*? Se há, como justificá-los? É possível estabelecer critérios para um conhecimento objetivo? Há, de fato, um conhecimento objetivo?

Como se sabe, o problema da racionalidade da ciência passou a ser investigado sistematicamente no início do séc. XX, com os chamados *positivistas lógicos*. Impulsionados pelo sucesso do empreendimento científico, eles se lançaram na tarefa de estabelecer uma linha demarcatória entre os conhecimentos genuinamente racionais e aqueles que não são. Para tanto, tentaram evidenciar no que consistia a validade do nosso maior exemplar de conhecimento racional: a ciência. Inicialmente, acreditavam que os enunciados científicos eram *verdadeiros*, portanto poderiam ser atestados por adequados critérios de *verificação*. Mas Karl Popper mostrou que os enunciados científicos universais se fundavam, em última análise, na indução, e esta não poderia ser justificada nem pela lógica nem pela experiência.² Por essa razão, alguns positivistas passaram a acreditar que os enunciados científicos não eram estritamente verdadeiros, mas eram ao menos *mais prováveis* que os demais. Esse encaminhamento, contudo, também encontrou dificuldades para se estabelecer. Popper argumentou convincentemente que a probabilidade de verdade de um enunciado científico universal era praticamente igual a zero. Esse fato o levou a propor um novo modelo de

¹ Bunge, 1985, p.173.

² Popper, 1974.

racionalidade, que ficou conhecido como *falseacionismo*.³ De fato, os enunciados científicos não poderiam ser demonstrados *verdadeiros*, nem *mais prováveis* que outros, mas ao menos poderiam ser demonstrados *falsos*. A racionalidade da ciência residiria, portanto, no processo de *falseação*. Todavia o modelo de Popper também encontrou dificuldades em se sustentar. Thomas Kuhn mostrou que a falseação da maneira como Popper propusera simplesmente não era praticada na ciência. Um cientista jamais abandona uma teoria, ou uma hipótese de uma lei científica universal, a partir de alguns exemplos contrários. Em vez disso, uma teoria tende a resistir aos contra-exemplos até um certo limite, a partir do qual passa literalmente por uma revolução.⁴ A análise de Kuhn, entretanto, não ofereceu uma resposta ao problema da racionalidade; pelo contrário, o que fez foi agravá-lo. As suas teses levaram muitos à conclusão que nem a lógica nem o método tinham papel determinante nesse processo, e que as nossas noções de continuidade e progresso científico seriam frequentemente enganosas. Depois de Kuhn, a própria ideia de racionalidade da ciência passou a ser questionada. Alguns filósofos, como Feyrabend, passaram a fazer apologia aberta contra o método e a sua racionalidade.⁵ Outros, que continuaram acreditando na ciência como um empreendimento essencialmente racional, – como o próprio Kuhn – mudaram o foco da busca da racionalidade. Em vez de buscar a racionalidade nos enunciados, método e lógica da ciência, passaram a buscar nos critérios de escolha dos cientistas ou da comunidade de cientistas. Ainda assim, não foi possível encontrar critérios que fossem consensuais e suficientes claros para a escolha teórica.

Atualmente, o foco de análise mudou dos *enunciados* da ciência para *teorias científicas*, e os chamados *realistas* reconhecem que as teorias não podem ser consideradas estritamente verdadeiras, nem mais prováveis que outras, mas defendem que, ainda assim, elas podem ser consideradas “aproximadamente verdadeiras”. Por essa razão podemos acreditar que elas se referem genuinamente à realidade, e progridem ao longo do tempo. Mas como se funda essa noção de *verdade aproximada* dos realistas? Até hoje não se esclareceu. No seu famoso artigo *A Confutation of Convergent Realism*, o filósofo estadunidense Larry Laudan contestou vigorosamente os realistas mostrando que, a menos que eles ofereçam “uma análise mais clara de verdade aproximada” e uma “coerente teoria de confirmação”, dificilmente tal posição pode ser sustentada.⁶ Em suma, mesmo hoje o problema da racionalidade da ciência permanece em aberto. Apesar do sucesso inegável do

³ Ibid.

⁴ Kuhn, 1998.

⁵ Feyrabend, 1993.

⁶ Laudan, 1981a.

empreendimento científico, as tentativas de explicar claramente a sua racionalidade sistematicamente fracassaram.

Ofereço essa breve e superficial contextualização histórica apenas para ressaltar que a tese central desse trabalho tem como uma das suas principais consequências uma proposta de enfrentamento ao problema da racionalidade científica. E isso através da investigação da racionalidade do famigerado *método científico*. Digo “famigerado” porque reconheço que discutir o método científico pode parecer um tanto antiquado para os padrões de alguns filósofos da ciência contemporâneos. A própria ideia da possibilidade de um método universal da ciência entrou em declínio após a derrocada do projeto dos positivistas lógicos e a publicação das teses de Thomas Kuhn. Simplesmente não é mais consensual se acreditar que uma eventual racionalidade da ciência resida em um suposto método. Apesar disso, nesse trabalho parto de uma premissa que contesta essa conclusão. A meu juízo, trata-se de uma conclusão precipitada. Precipitada porque, em primeiro lugar, a busca por um conhecimento racional associado à lógica e um determinado método não iniciou com os positivistas lógicos no início do séc. XX. Na verdade, pode-se encontrar as origens dessa associação desde antes de Aristóteles, passando pela tradição medieval, entrando nas tentativas de codificação de um novo método durante a revolução científica, até chegar à estruturação do empreendimento científico que se desenvolveu depois disso, diante dos quais os positivistas se debruçaram para tentar compreender. A associação entre a racionalidade e o método é uma construção histórica que se desenvolveu seguramente por mais de dois mil anos. Em oposição a esse fato, as teses de Kuhn, que colocaram em dúvida essa relação, têm pouco mais de 50 anos. Não é possível deixar de considerar precipitada a tendência de tão apressadamente desvincular o tema da racionalidade do conhecimento da ideia de método específico. Questionar que o método não se fundamente em elementos *puramente* racionais é uma coisa, e perfeitamente plausível diga-se de passagem; supor que ele não se fundamente em elementos *predominantemente* racionais é outra bem diferente.

Há outras razões, todavia, para considerar essa tendência precipitada. Não se pode esquecer que as teses de Kuhn foram duramente criticadas em sua época, e ele próprio não ofereceu respostas satisfatórias para boa parte dessas críticas. Se a ciência é racional, e esta racionalidade não está no método e nem na lógica, onde então estaria? Basicamente, ele não respondeu essa questão de maneira convincente. E a sugestão de que a resposta estaria numa certa racionalidade, não claramente identificável, na escolha teórica dos cientistas – ou da comunidade científica – a partir de supostos critérios, não se mostra mais tão promissora quanto pareceu há algumas décadas atrás. Que critérios seriam esses? As respostas

permanecem vagas. Por outro lado, supõe-se que hajam influências psicológicas, sociológicas, de valoração, na escolha das teorias – o que parece razoável – mas também não se consegue precisar qual é o grau de determinação dessas influências. Sem mencionar que é altamente questionável que o estudo do método não tenha uma particular utilidade na compreensão da racionalidade científica. Porque mesmo que o foco da racionalidade não esteja contido no método em si, naturalmente seria plausível supor que ela ao menos se manifeste por meio dele. E nesse caso, o estudo do método ainda seria o melhor caminho para se investigar a racionalidade da ciência. Por todas essas razões, considero no mínimo precipitada a tendência de afastar o problema da racionalidade do projeto de investigação do método da ciência.

Em vista do que foi exposto acima, nesse trabalho procuro me voltar aos estudos sobre o método da ciência. Não considero um tema superado. Com efeito, nesse trabalho sigo a mesma linha de pesquisadores que já têm retomado os estudos sobre o método, baseados, suponho, em ponderações semelhantes às que apresentei nos parágrafos precedentes. Mas é preciso enfatizar que esses estudos não se propõem a retomar as investigações sobre o método da ciência exatamente da mesma perspectiva que esse tema foi estudado no início do século passado. Na verdade, eles se propõem a investigar o método de uma perspectiva nova, de uma perspectiva *histórica*. E esse ponto faz bastante diferença.

Em um dos seus livros, Laudan ensina que para enfrentar o problema da racionalidade temos três opções básicas.⁷ A primeira opção seria propor pequenos ajustes nos modelos de racionalidade já apresentados ao longo da história. Ele esclarece que essa opção já foi exaustivamente explorada pelos filósofos, portanto considera pouco promissora. A segunda opção seria abandonar a busca pela racionalidade da ciência e simplesmente admitirmos que a ciência é, na sua maior parte, um empreendimento não racional. Também, vários filósofos já seguiram essa opção. Ele a considera prematura. E a terceira opção seria “abandonar alguns dos conceitos e linguagem tradicionais” (i.e., da filosofia da ciência tradicional), procurando novos elementos que possam fazer emergir uma perspectiva diferente do conhecimento científico e, conseqüentemente, da sua racionalidade. Ou seja, a terceira opção seria oferecer um modelo de racionalidade a partir de *novos pressupostos*, desprendendo-se daqueles já exaustivamente explorados. Diante do fracasso dos filósofos em trilhar o primeiro caminho, e da precipitação de outros em optar pelo segundo, ele considera essa terceira via a mais promissora. Entretanto, alguém poderia se perguntar: que “novos pressupostos” seriam esses a partir dos quais se poderia oferecer outra perspectiva do conhecimento científico?

⁷ Id, 1977, p.3-4.

Laudan tentou seguir a referida “terceira via” no seu livro *Science and its problems*, no qual procurou compreender a ciência como uma atividade fundamentalmente de *resolução de problemas* (“problem-solving activity”), sendo esse o fio condutor da sua racionalidade ao longo do tempo e suas mudanças teóricas.⁸ Para o autor, a investigação da ciência como “problem-solving activity” seria um desses “novos pressupostos”, que ainda não haviam sido suficientemente explorados. Entretanto, apesar dessa perspectiva certamente ter trazido alguns *insites* bastante interessantes para o autor, a bem da verdade penso que ela não se funda em pressupostos tão novos quanto talvez Laudan mesmo gostaria que fossem. Outro caminho se faz necessário. E acredito que o próprio filósofo o tenha sugerido em outro lugar – ainda que talvez sem essa intenção. Na resenha *Teorias do método científico de Platão a Mach*, Laudan sinaliza que o ponto de convergência entre a história da ciência e a filosofia da ciência é o tema da *história método científico*. Afirma ele: “A história do método científico é uma das áreas em que inegavelmente convergem os interesses do historiador da ciência e do filósofo da ciência (...) a ponte mais importante, talvez, entre a história da ciência e a sua filosofia”.⁹

A afirmação de Laudan acima me levou supor que talvez somente partindo de uma investigação profunda do método científico *do ponto de vista histórico* seria possível chegar aos novos pressupostos que ele deseja para analisar o tema da racionalidade, pressupostos que eventualmente não foram considerados durante a história da filosofia da ciência. E é precisamente este o caminho que me proponho a seguir nesse trabalho: investigar o tema do método da ciência *do ponto de vista histórico*, com o objetivo de iluminar problemas da filosofia da ciência e, em especial, o próprio problema da racionalidade científica. Ou melhor, pretendo me aliar às variadas pesquisas históricas que tem ressurgido com o objetivo de investigar o método da ciência.

Mas qual seria o recorte histórico mais adequado? Que período? Que teorias? Sem dúvida, construir uma história do método científico de Platão até Mach não é uma tarefa viável para uma única pessoa, como Laudan bem sabia, razão pela qual apenas se limitou a apresentar um esboço muito superficial. Para compreender realmente o método da ciência é preciso mais que uma visão panorâmica. É preciso adentrar nos detalhamentos muitas vezes meticulosos das teorias. Necessariamente, um recorte histórico precisa ser delimitado. A revolução científica dos séculos XVI e XVII é sem dúvida um período chave na consolidação da ciência. Mas ainda assim é um período demasiado extenso para ser analisado em profundidade. Basta ver a abundância de material já produzido sobre esse momento histórico.

⁸ Ibid.

⁹ Id, 2000, p.11.

Por essa razão resolvi direcionar os meus esforços para o estudo do método de em um único tratado da revolução científica, um clássico da ciência, escrito em de 1687, por Isaac Newton – os *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*), também conhecido como *Principia Mathematica*, ou simplesmente *Principia*. Um tratado que, a despeito da sua fama, raras vezes tem sido investigado com a profundidade que merece. Trata-se de uma das principais peças da revolução científica e é considerada por alguns como o mais brilhante tratado científico já produzido pelo intelecto humano. Foi nesse tratado, por exemplo, que Newton apresentou ao mundo a famosa teoria da gravitação universal e resolveu, de uma única vez, dois dos mais difíceis problemas científicos da história da ciência, o *problema da causa da gravidade*, isto é, o problema de determinar a causa do movimento de queda dos corpos em direção à superfície da Terra; e o *problema do sistema do mundo*, que visava determinar se era a Terra ou o Sol que ocupava o centro do universo. Além disso, nesse tratado Newton ofereceu o que seria, segundo ele, um novo modo de investigação da natureza, um “modo mais seguro” de investigar os fenômenos naturais, o que torna esse recorte ainda mais interessante para os propósitos aqui almejados. Se há algum tratado particular que tem o potencial de muito oferecer à compreensão da ciência em geral, e em especial do seu método e racionalidade, esse tratado é os *Principia* de Newton.

Mas depois de cerca de 4 anos de estudo detalhado e minucioso do método dos *Principia* fui surpreendido por uma conclusão inesperada. Uma conclusão que considerei de grande repercussão para o tema em questão. Uma conclusão que me levou a vislumbrar resultados bem além dos inicialmente imaginados – de oferecer uma modesta contribuição para a história do método científico. Ao investigar os *Principia* a fundo, concluí que ele não foi apenas um dos principais tratados da revolução científica, ou talvez um dos mais brilhantes tratados científicos já produzidos; concluí que o novo programa metodológico apresentado por Newton nos *Principia* se tratava da estrutura do programa que hoje conhecemos pelo nome de *física teórica*, e que por sua vez impulsionou a assim chamada “segunda revolução científica” do séc. XIX, que culminou no próprio surgimento do modelo atual das ciências naturais. Em outras palavras, percebi que o programa metodológico dos *Principia* foi em grande medida responsável pelo surgimento da própria ciência, tal como a conhecemos hoje.

Uma das teses fundamentais em que se sustenta esse trabalho, portanto, pode ser resumida em uma única sentença: *a estrutura do programa da ciência natural atual surgiu com a ciência empírico-matemática dos Principia de Isaac Newton*. É evidente que essa tese conduz a desdobramentos de grande impacto tanto para a história da ciência, como para a

filosofia da ciência. Não se deve subestimar a amplitude dessas implicações. Localizando-se a origem desse programa nos *Principia* de Newton, a investigação desse tratado, dos seus fundamentos, da sua estrutura, método, funcionamento, enfim, da sua racionalidade, conduz a conclusões de grande repercussão para a compreensão da estrutura e racionalidade da própria ciência em geral. Mais adiante volto a essas conclusões. No momento, convém esclarecer melhor a tese fundamental que estrutura esse trabalho.

É realmente crível que o programa da ciência natural tenha surgido a partir dos *Principia* de Newton? A verdade é que essa tese não é, nem um pouco, trivial. Em primeiro lugar, porque desde antes de Kuhn já soava inusual se argumentar que a ciência natural surgiu com uma única pessoa, e menos ainda em um único tratado. É praticamente consensual entre os historiadores o entendimento de que a ciência é resultado de um esforço coletivo que envolveu muitos pensadores, filósofos, matemáticos, durante um tempo considerável durante a história. Seria inútil – e até ingênuo – tentar localizar uma origem exata para a ciência. Defender a tese contrária parece caminhar na contramão da história. Em segundo lugar, essa tese não é trivial porque ainda que fosse o caso de se procurar a origem da ciência natural em um personagem específico, a primeira opção não seria Newton. Há muitos outros personagens que historicamente têm sido mais cotados que o próprio Newton para esse papel. Personagens como Roger Bacon, Galileu, Descartes, Francis Bacon e até Copérnico. Em outras palavras, ainda que buscássemos um grande articular do programa da ciência natural que substituiu a filosofia natural aristotélica, Newton sequer seria a primeira opção. Em terceiro lugar, essa não é uma tese trivial porque já houve quem a defendesse, e mesmo assim ela nunca se estabeleceu solidamente. Em 1980, Isaac Bernard Cohen defendeu, em seu *Newtonian Revolution*, que a física-matemática que deu origem às ciências naturais como conhecemos hoje surgiu com os *Principia* de Newton, e essa tese foi seguida por alguns historiadores desde então. Nesse trabalho, chamei esses historiadores de “tradição coheniana”. Mas o fato é que eles não conseguiram estabelecer essa tese solidamente, razão pela qual acabou não ganhando muita repercussão.

Para esclarecer precisamente a principal tese desse trabalho é preciso que se diga, antes de tudo, que em nenhum lugar sustentarei que a ciência natural seja fruto do gênio de um único intelecto. Como se mostrará ao longo do trabalho, muitos foram aqueles que contribuíram para a consolidação da ciência como conhecemos hoje. Por outro lado, o que estou sustentando é que o programa da ciência natural teve, sim, apesar disso, um início bem demarcado no tempo e no espaço, e esse início se encontra nos *Principia* de Newton. Embora eu próprio tenha considerado esse ponto improvável, convenci-me com essa pesquisa

histórica que a realidade nem sempre respeita as probabilidades, e por isso somos frequentemente surpreendidos por ela. De fato, é improvável que a ciência natural tenha esse início tão bem demarcado, e não seria recomendável essa defesa – a menos que seja mesmo verdade. Mas para que essa conclusão se estabeleça solidamente para o leitor, deve-se mostrar duas coisas. Primeiro, deve-se mostrar como, exatamente, o programa de Newton se distingue dos seus *antecessores*. Segundo, deve-se mostrar como, exatamente, o seu programa foi incorporado pelos seus *sucessores*, até chegar aos dias atuais. A tradição coheniana não foi capaz de mostrar nem uma coisa nem outra. Evidentemente, afirmar que Newton incorporou a matemática na filosofia natural, ou no estudo da natureza, não é suficiente para defender que com ele surgiu o programa da ciência natural. Muitos outros, como Galileu, Mersenne, Huygens, Kepler, e até Descartes, já estavam fazendo isso em abundância durante a revolução científica. Sem um nítido esclarecimento do que há no programa de Newton que o distingue inequivocamente dos seus antecessores, essa tese fica prejudicada. Da mesma forma, sem um nítido esclarecimento de que esse programa inequivocamente foi incorporado e passou a ser reproduzido desde então, essa tese também não se sustenta.

Mostrar de modo claro os dois polos da questão levantada no parágrafo anterior, entretanto, depende de outra tese fundamental. Depende de uma caracterização precisa do programa metodológico dos *Principia*. E, sem dúvida, esse é o ponto mais problemático desse trabalho. A obra magna de Newton é cercada de variadas dificuldades interpretativas. São três séculos de investigação sobre o método de Newton sem que se tenha chegado a um consenso. Em certa medida, essas dificuldades decorrem de motivos óbvios da complexidade do próprio tema de se propor um método para investigar os fenômenos da natureza. O tema, em si, já é altamente complexo, o que envolve evidentemente dificuldades de toda ordem, tanto para quem formula quanto para quem interpreta. Mas aliado a essas dificuldades naturais há outras relacionadas com algumas particularidades do próprio Newton e dos *Principia*. Em primeiro lugar, Newton possuía algumas restrições quanto ao uso da álgebra moderna, o que o levou a escrever todo o seu tratado à maneira matemática dos antigos. Ou seja, usando quase que exclusivamente demonstrações geométricas e teoria das proporções. Nem mesmo para os padrões do séc. XVII isso era comum, e muito menos para os intérpretes dos séculos seguintes. Não há dúvida que isso obscureceu o entendimento do tratado durante um bom tempo. Além disso, Newton tinha um interesse proposital de ocultar certos princípios dos seus leitores. Isso decorria provavelmente de vários motivos como, por exemplo, questões de prioridade de descobertas, o que o levava à dissimulação de intenções e procedimentos; o uso de novas ferramentas que não haviam sido adequadamente justificadas à época, o que também

o levava à sua ocultação; e principalmente em razão de algumas posturas sectárias que ele próprio adotava, que o levava a compartilhar certos princípios somente com um pequeno círculo fechado de colaboradores e iniciados, encobrendo-os do grande público. É evidente que essas idiossincrasias de Newton dificultam muito o trabalho do historiador. Mas, por fim, uma das particularidades que talvez tenha gerado maiores dificuldades interpretativas – agora no tema específico do *método* dos *Principia* – é fato de Newton ter geralmente evitado esclarecer o seu próprio procedimento no tratado. E nas poucas vezes em que o fez, tenha produzido mais polêmicas do que esclarecimentos. Isso porque os seus pronunciamentos sobre o método com frequência parecem não estar em harmonia com o que ele efetivamente fez nos *Principia*. Não é de se admirar, portanto, que a caracterização do método de Newton tem sido tão problemática nos últimos três séculos, e seja um dos pontos mais sensíveis desse trabalho.

Como procurei superar as referidas dificuldades interpretativas nessa pesquisa? Em primeiro lugar, ofereci uma caracterização do método dos *Principia* a partir de um quadro geral dessa obra. Em outras palavras, a partir de um estudo completo dos *Principia*, do seu conteúdo, estrutura, contexto, interlocutores, pressupostos metafísicos, epistemológicos e metodológicos. Busquei um estudo orgânico desse tratado, não compartimentalizado, como muitas vezes se tem feito. Há uma inter-relação dificilmente separável entre o método e os seus pressupostos epistemológicos e metafísicos, razão pela qual não procurei desassociá-los aqui. Em segundo lugar, procurei superar as mencionadas dificuldades interpretativas com base em uma clara separação de uma análise a partir dos pressupostos do próprio Newton – evitando anacronismos – e uma análise mais abertamente retrospectiva, do ponto de vista dos problemas da filosofia da ciência atual. Uma das dificuldades que percebi com a tradição coheniana é uma ausência de distinção mais clara entre essas duas abordagens. Não creio haver um problema essencial em oferecer uma análise diretamente do ponto de vista contemporâneo. A própria ideia de que é possível uma interpretação totalmente livre de anacronismo já é, por si só, ingênua. No entanto, isso levou alguns historiadores ao outro extremo de não mais se preocuparem em tentar compreender e reconstruir os trabalhos históricos a partir do seu próprio contexto e pressupostos *antes* de prosseguir com uma análise a partir de seu próprio contexto e interesses. Acredito que isso pode trazer alguns prejuízos interpretativos, principalmente num tratado cercado de tantas dificuldades.

Com base nos encaminhamentos interpretativos esclarecidos no parágrafo anterior, chegou-se à caracterização geral do método dos *Principia* que ora apresento nesse trabalho. Ofereço essa caracterização do método tanto do ponto de vista histórico, nos termos do

próprio Newton, quanto de um ponto de vista mais contemporâneo, olhando pelas lentes da filosofia da ciência. Do ponto de vista histórico, sustento que *Newton lançou um novo programa de investigação da natureza capaz de determinar as causas dos fenômenos naturais sem recurso direto à especulação filosófica*. Argumento que esse programa foi construído com sucesso principalmente pela articulação de três tradições metodológicas que funcionavam de maneira relativamente independente no séc. XVII, a filosofia experimental dos ingleses – uma abordagem rigorosamente empirista da natureza; a tradição das ciências matemáticas, especialmente a chamada *matemática mista*, que também lidava com os fenômenos naturais de forma abstrata, associada ao platonismo e ao pitagorismo; e a tradição escolástica de lógica e método, ligada ao aristotelismo. Em outras palavras, Newton criou um novo programa de investigação da natureza capaz de estabelecer as causas dos fenômenos naturais pela articulação de uma filosofia rigorosamente empirista com a lógica e a matemática. Em razão disso, tal iniciativa pode ser convenientemente classificada como a construção do programa de uma *ciência empírico-matemática*. De que maneira Newton realizou precisamente a articulação entre esses domínios é um dos pontos que esse trabalho se dispõe a revelar. No entanto, importa dizer que antes dos *Principia* não havia qualquer tradição, ou pensador, que propôs um programa que pudesse explicar as causas ocultas de fenômenos da natureza sem entrar no campo especulativo; e aqueles que tentavam investigar a natureza sem ingressar na especulação ficavam simplesmente no nível descritivo dos fenômenos, não sendo capazes de lidar com causas mais gerais. Como se poderá depreender desse trabalho, nos *Principia* Newton apresentou o primeiro programa da história em que foi possível lidar com causas mais gerais da natureza sem recurso direto à especulação, ou seja, satisfazendo rigorosamente os critérios empíricos da filosofia experimental. Com os *Principia* nasceu a *ciência empírico-matemática*.

Estabelecida a caracterização histórica do programa de Newton, ofereci, também, a partir dela, uma caracterização do ponto de vista da filosofia da ciência. Dessa perspectiva, defendo que Newton construiu um legítimo programa *confirmacionista* de investigação da natureza, no qual seria possível proceder à eliminação de hipóteses alternativas com o auxílio de leis empírico-matemáticas previamente estabelecidas. Procuro esclarecer esse programa e discutir os seus fundamentos, enfatizando principalmente que ele seria capaz de produzir efetivas *confirmações qualitativas* de hipóteses causais, apesar de todas as dificuldades já conhecidas em relação às teses confirmacionistas. A partir dessa caracterização, procuro mostrar que há evidências históricas de que a estrutura básica desse programa confirmacionista foi incorporada e aprofundada pela ciência empírico-matemática nos séc.

XVIII e XIX, e foi responsável pelas transformações que consolidaram o surgimento tanto da física teórica quanto do programa da ciência natural atual. Procuro mostrar, ademais, que há evidências significativas de que a própria teoria da relatividade, já no séc. XX, também foi formulada a partir desse programa, colocando em discussão a famosa tese de ruptura entre o programa de Newton e o de Einstein, proposta por Thomas Kuhn.¹⁰ Essa análise do ponto de vista da filosofia da ciência fecha o círculo para estabelecer que, em suas linhas gerais, o programa metodológico da ciência empírico-matemática dos *Principia* é uma boa representação da estrutura básica da ciência empírico-matemática atual, e, conseqüentemente, do próprio programa da ciência natural que vigora ainda hoje. Ele não apenas se distingue nitidamente dos métodos dos antecessores de Newton, como também foi incorporado pelos seus sucessores desde então.

Nesse ponto já estamos em condições de retornar a algumas implicações dessa tese para o problema da racionalidade da ciência. Não é difícil perceber que dessa investigação surgem novos elementos para enfrentar o problema da racionalidade, elementos que cobrem – coincidentemente, ou não – as próprias advertências mencionadas por Laudan: uma “coerente teoria de confirmação” e um esclarecimento da noção de “verdade aproximada”. Isso porque o próprio confirmacionismo de Newton se fundamenta numa noção de verdade aproximada. Nesse trabalho mostro que esse programa se fundamenta, em última análise, numa noção de conhecimento aproximadamente verdadeiro que emerge dos *Principia*. No que exatamente se apoia essa noção, o leitor também terá que acompanhar por si mesmo no trabalho a seguir. Mas é possível adiantar que essa noção conduz, de fato, a uma nova imagem da ciência. Uma imagem de ciência que é *confirmacionista*, *progressivista* e *realista*; sem se alinhar, contudo, às análises malfadadas empreendidas pelos positivistas históricos, por um lado, ou esbarrar nas dificuldades enfrentadas pelos atuais *realistas*, por outro. Uma imagem de ciência que é, basicamente, *racional*. Portanto – diria eu a Bunge – nem tudo está perdido. Haveria um conhecimento genuinamente objetivo; e a ciência dos *Principia* nos ajudaria a percebê-lo com mais clareza.

Em relação divisões desse trabalho, para a comodidade do leitor fragmentei os conteúdos a serem desenvolvidos em dois volumes, ainda que continuamente paginados e capitulados. No *primeiro volume*, apresento e analiso o método dos *Principia da perspectiva histórica*. Essa análise depende, naturalmente, da apresentação e discussão do tratado de Newton em toda a sua extensão, do prefácio à primeira edição até o seu texto conclusivo, o

¹⁰ Kuhn, 1998.

escólio geral. As divisões desse volume obedecem às divisões do próprio tratado de Newton, devidamente indicadas nos títulos dos capítulos e seções. No *segundo volume*, analiso o método dos *Principia da perspectiva da filosofia da ciência*. Nesse caso, o objeto de análise é o programa da ciência empírico-matemática de Newton já delineado no primeiro volume, a partir do qual avanço no tempo desde a publicação dos *Principia* até os dias atuais. Ainda no segundo volume, apresento, analiso e critico a “tradição coheniana” de interpretação do método de Newton, e ofereço uma interpretação alternativa a ela. Dessa interpretação alternativa é que retiro a caracterização do programa metodológico da ciência empírico-matemática que leva às principais conclusões desse trabalho, inclusive aquelas sobre a racionalidade científica. Para aqueles mais interessados na filosofia da ciência é possível iniciar a leitura diretamente do segundo volume, e retornar ao primeiro apenas quando julgar conveniente para o esclarecimento de pontos particulares.

A seguir, apresento ainda algumas observações historiográficas sobre o trabalho. Mas, desde já, ofereço ao leitor *O nascimento da ciência-empírico matemática*.

NOTAS HISTORIOGRÁFICAS

Antes de iniciar o conteúdo desse volume propriamente dito, convém fazer algumas observações historiográficas. Não é difícil perceber que uma grande parte desse trabalho é uma *pesquisa histórica*. E, diante disso, torna-se indispensável esclarecer alguns detalhes técnicos de relevância em qualquer pesquisa histórica, como questões relativas a fontes, traduções, notações, metodologia histórica e assim por diante. Além disso, convém se esclarecer alguns detalhes relativos ao estilo e *forma de apresentação* desse trabalho.

Sobre as questões historiográficas, em primeiro lugar gostaria de mencionar a fonte histórica principal do trabalho: Os *Principia. Philosophia Naturalia Principia Mathematica*. Esse texto foi escrito originalmente em latim, e tem três edições, a primeira publicada em 1687, e as outras duas respectivamente em 1713 e 1726, ambas supervisionadas pelo próprio Newton. Nesse trabalho procurei deixar claro os textos que foram adicionados na segunda e terceira edição, mas para as citações usei quase sempre a redação da terceira edição. Nos momentos em que não o fiz, indiquei devidamente nas notas de rodapé. Ofereci uma tradução diretamente do latim para o prefácio do autor à primeira edição, e alguns outros textos esporádicos de interpretação mais obscura. No entanto, na maior parte dos casos a tradução para o português foi realizada a partir das versões em inglês de Andrew Motte, de 1729, adaptada por Florian Cajori em 1934, e da tradução de I. Bernard Cohen e Anne Whitman de 1999. Não padronizei somente um texto base para as traduções, uma vez que constatei que a tradução mais recente de Cohen faz eventualmente alguns “melhoramentos” que ora se aproximam mais do texto original, ora se afastam. Assim, preferi manter o texto base mais flexível, usando sempre a versão que me parecia mais fiel ao original na passagem considerada. Em certos casos bem específicos, apresentei ao leitor as duas versões, e ainda, algumas vezes, transcrevi o texto em latim em nota de rodapé para facilitar a avaliação do próprio leitor que eventualmente domine o idioma. As traduções diretamente do latim, no entanto, são devidamente indicadas no texto, que também podem eventualmente receber as distinções da primeira edição (*1ed*), e segunda edição (*2ed*). Distingo as citações traduzidas das edições de Mote-Cajori e de Cohen-Whitman pelas iniciais *MC* e *CW*, respectivamente. Ademais, como apoio para traduções diretamente do latim, usei muitas versões e traduções dos *Principia*, inclusive em espanhol e francês, todas devidamente indicadas nas referências.

Outra fonte usada eventualmente nesse trabalho foram os manuscritos de Newton. Esses manuscritos são produzidos geralmente em inglês, o que não gera muitos problemas de tradução. Mas confesso que nesse trabalho evitei introduzir em excesso a citação de

manuscritos, e até de outras obras publicadas de Newton. Procurei manter os limites dessa investigação histórica bem delimitado em torno dos *Principia*. Isso porque acredito que enquanto muitos estudos compartimentalizam demais certas investigações, outros ampliam demais. E acredito que isso tem acontecido algumas vezes com as pesquisas sobre os *Principia*. Além dos *Principia*, Newton escreveu a *Óptica* e algumas dezenas de artigos menores. Mas há, ainda, milhares de páginas de manuscritos, sobre assuntos que vão da alquimia à teologia, que não foram publicados pelo próprio Newton e que hoje se encontram em coletâneas publicadas ou arquivos digitais. Muitas dessas páginas sequer foram digitalizadas e continuam desconhecidas da maior parte dos pesquisadores. E penso que em razão das dificuldades de interpretação já mencionadas sobre os *Principia*, e também em razão do interesse natural que esses manuscritos despertam, muitos historiadores passaram a se dedicar mais à investigação desses escritos marginais do que aos principais textos publicados pelo próprio Newton, dos quais os *Principia* é de longe o mais aclamado. O fato é que Newton era extremamente parcimonioso com suas publicações. Mesmo no caso da *Óptica*, ele a publicou aparentemente apenas porque percebeu que não teria mais tempo de vida suficiente para concluir aquelas investigações. Portanto, os *Principia* é o único trabalho completo e acabado publicado por Newton, e que resume os seus maiores esforços para a construção de um novo programa de investigação da natureza. Não há dúvida de que primeiro devemos compreender claramente a mensagem desse tratado antes de buscar compreender o pensamento de Newton em seus textos marginais.

É claro que vários historiadores buscaram nos escritos marginais de Newton novos elementos para compreender o seu pensamento. Não discuto a importância de se estudar textos paralelos para dirimir dificuldades interpretativas e ampliar a compreensão do pensamento de determinado autor. Mas a questão é que, a meu ver, os *Principia* ainda não foi suficientemente explorado. A interpretação dos *Principia* não foi esgotada. Basta analisar os trabalhos da tradição coheniana, que passaram a investigar especificamente os *Principia*. Cohen se concentrou mais ao contexto histórico do séc. XVII no seu aclamado *Newtonian Revolution*, e passou longe de fazer uma análise completa do método de Newton no seu tratado mais famoso. Por exemplo, o Livro II dos *Principia* sequer foi por ele investigado. George Smith e William Harper, que continuaram o trabalho de Cohen na investigação do método, não se preocuparam em concluir a investigação histórica do método e partiram diretamente para uma análise do ponto de vista da filosofia da ciência. E Steffen Ducheyne, retornou a uma interpretação histórica, mas ampliou a investigação do método para incluir a *Optica* e o outros manuscritos, inclusive os teológicos. Definitivamente, a interpretação dos

Principia nos seus próprios termos sequer foi esgotada, e já se passou à inclusão de materiais complementares. Não tenho certeza da eficiência dessa estratégia para a compreensão específica desse tratado.¹¹ Por essa razão optei por restringir o escopo desse trabalho rigorosamente aos *Principia*. Evitei ingressar em demasiadas análises de manuscritos não publicados, ou mesmo outras obras publicadas. Certamente entrei em contato com elas, mas nesse trabalho optei por aplicar toda a energia e foco para uma interpretação orgânica e completa dos *Principia*, e suscitei outros escritos de Newton apenas em momentos específicos de discussão dos conteúdos, ou quando julguei estritamente necessário para dirimir alguma questão interpretativa pontual. De qualquer modo, quando eventualmente citados, os manuscritos são incluídos no trabalho frequentemente conservando as partes rasuradas ou canceladas por Newton, principalmente quando elas podem auxiliar na compreensão das suas intenções. Não estranhe o leitor, portanto, esse expediente que será devidamente indicado nas notas de rodapé.

Sobre fontes históricas de outros autores que eventualmente foram utilizadas, considerei particularmente importante o contato direto com as obras que tiveram influência nos *Principia*, principalmente, aquelas que são mencionadas diretamente ou aludidas nesse tratado. Entre essas obras, destaco o Livro 8 de Pappus, as obras de Galileu, de Isaac Barrow, *Princípios da Filosofia* de Descartes, *Horologium Oscilatorium* de Huygens, *Novum Organum* de Francis Bacon, as obras de Robert Boyle e Robert Hooke e outros filósofos experimentais ingleses, além de outras. Evidentemente, devido o critério aqui adotado, não me debrucei sobre essas obras da mesma forma que fiz com os *Principia*, mas procurei manter contato direto com as fontes originais desses autores, e citar diretamente alguns trechos de relevância. Quando utilizei mais de uma tradução dessas obras, editei a referência com o nome do tradutor entre colchetes. Nas obras em que não havia tradução em português, ou não tive acesso a uma tradução em português, ofereci na maioria traduções do inglês. Exceto quando expressamente indicado, todas as traduções desse trabalho são minhas.

Outro detalhe historiográfico que merece ser mencionado é a questão do anacronismo e notações. Como já mencionei na introdução, na parte histórica desse trabalho – no volume I – ofereço uma caracterização do método dos *Principia* a partir do contexto do próprio Newton, evitando anacronismos. Por essa razão, procuro evitar incluir ferramentas, técnicas, procedimentos, análises, linguagem estranha ao contexto histórico e pressupostos de Newton.

¹¹ O grande interesse pelo material não publicado de Newton surgiu a partir da doação de muitos manuscritos desconhecidos na posse de John Maynard Keynes e Abraham Yahuda à universidade de Cambridge e à Biblioteca Nacional de Israel, respectivamente, o que desviou a atenção dos pesquisadores nas décadas seguintes do material publicado, em especial dos *Principia*, que ainda não havia sido suficientemente explorado.

No caso da linguagem, por exemplo, evito impor uma terminologia atual para a apresentação e discussão dos *Principia*. Frequentemente Newton afirma “proporcional ao corpo”, ou “proporcional à matéria”, quando diríamos hoje “proporcional à massa”; ou usa “mudança de movimento” para o que hoje nos referimos como “variação de velocidade” ou “variação da quantidade de movimento”; ele chama o princípio da inércia de “força de inércia”, e outras coisas do gênero. Não procurei traduzir essa terminologia de Newton para uma linguagem mais moderna. Adotei esse encaminhamento para permitir ao leitor uma familiaridade maior com texto original, e também para uma percepção mais clara do grau de elaboração que ele tinha cada um desses conceitos à época. Mas principalmente porque alguns conceitos eram usados em sentidos distintos daquele que aplicamos hoje, como é o caso, por exemplo, de termos como “impulso”, “centrípeto”, “gravidade”, entre outros. Portanto, manter os termos originais é importante para evitar a interpretação equivocada do sentido que Newton está aplicando.

No que se refere à matemática – especificamente – evito usar as ferramentas do cálculo diferencial e integral. Como se sabe, embora Newton seja considerado um dos fundadores do cálculo, essa ferramenta atual herdou seus pressupostos mais de Leibniz do que dele. E os pressupostos do cálculo de Leibniz estão extrema oposição às concepções matemáticas de Newton, principalmente na relação da matemática com a sua aplicação ao estudo da natureza. Portanto, penso que usar essas ferramentas causa uma distorção na compreensão do pensamento de Newton e pode afetar a interpretação do seu programa. Consequentemente, essa ferramenta não será usada, salvo em momentos muito particulares, mas com as devidas ressalvas. Por outro lado, as ferramentas que fazem, sim, parte do repertório de Newton serão utilizadas sem restrições. Por exemplo, a linguagem de proporções, a geometria e, em especial, a geometria mecânica.

Isso significa que as *equações*, tão comuns na física hoje em dia, também serão evitadas. Elas simplesmente não estavam bem estabelecidas ao repertório da época, e em especial de Newton. Mas evitarei utilizá-las não por um mero preciosismo historiográfico. Acredito haver também nesse ponto consequências importantes para a interpretação. As equações físicas de hoje dependem geralmente de *constantes* e *unidades de medida* que não se conheciam à época. A teoria das proporções era a forma usada não apenas por Newton, mas pelos matemáticos e filósofos em geral, para contornar esses e outros problemas que hoje sequer percebemos. Ou seja, está vinculada com a própria maneira como a matemática passou a ser utilizada para se referir a conhecimentos empíricos da natureza. Eliminar esse modo de

expressar as coisas traz nítidos prejuízos para a compreensão das origens do programa científico. Assim, em vez de expressar nesse trabalho a lei da queda dos corpos pela equação

$$S = \frac{1}{2}gt^2$$

onde S é o espaço percorrido por um corpo, g é uma constante (a aceleração da gravidade) e t é o tempo de queda do corpo, ela será expressa simplesmente por uma relação de proporcionalidade:

$$S \propto t^2.$$

O espaço percorrido por um corpo caindo é proporcional ao quadrado do seu tempo de queda. Ou ainda, pela proporção:

$$\frac{S_1}{t_1^2} = \frac{S_2}{t_2^2}$$

Ou, simplesmente, por extenso: *o espaço percorrido pelo corpo 1 está para o quadrado do seu respectivo tempo de queda, assim como o espaço percorrido pelo corpo 2 está para o quadrado do seu respectivo tempo de queda.*

A linguagem por extenso acima era a mais utilizada nos tratados desde a antiguidade até a época de Newton, o que torna a investigação desses tratados muitas vezes tediosa e obscura para o leitor atual. No entanto, como disse, são abordagens importantes para compreender os fundamentos do procedimento científico atual. Com uma proporção como a apresentada acima, Galileu, Newton, Huygens, e outros eram capazes de explorar a maior parte das consequências de uma determinada lei, inclusive proceder cálculos bastante específicos, sem que fosse preciso enfrentar a complexa questão de determinar as constantes, ou definir unidades de medida que sequer eram cogitadas à época. De fato, a teoria das proporções não era um problema; era a solução. Assim, vou procurar seguir os parâmetros e pressupostos da teoria das proporções, cujos fundamentos podem ser encontrados do Livro 5 da obra *Elementos* de Euclides.

No entanto, preservar os pressupostos de Newton para evitar distorções na interpretação não significa ficar preso em preciosismos de notação que, muitas vezes, em nada

interferem nessas questões. Por exemplo, raramente se utilizava os símbolos das proporções como fiz logo acima. E quando se utilizava, recorria-se muitas vezes a notações mais antigas, como $S_1: t_1^2 :: S_2: t_2^2$. Mas aqui não me preocupei em preservar a notação particular que era usada, a não ser em alguns momentos, apenas como exemplo. No meu entender, o que interessa mesmo é usar a teoria das proporções, não uma determinada notação dessa teoria. Da mesma forma, também adapto outras notações que podem facilitar o entendimento do leitor, e que na minha concepção não viole a essência básica do tratado.¹²

Além da teoria das proporções, a linguagem fundamental dos *Principia* é a geometria. A ideia básica de Newton era escrever um tratado *geométrico*, à moda dos antigos. E esse projeto não era uma mera idiossincrasia de Newton sem maiores consequências. Como veremos, está intimamente ligado com as concepções de Newton sobre a matemática e a natureza. Somente a geometria seria capaz de captar perfeitamente os elementos da natureza. Assim, com algumas poucas exceções, todos os problemas matemáticos e físicos foram resolvidos por meio de demonstrações geométricas puramente gráficas e usando a teoria das proporções. Essas demonstrações geométricas, no entanto, muitas vezes não são semelhantes a aquelas estamos habituados. Newton usa principalmente a “geometria mecânica”, uma geometria que considera as magnitudes geométricas sendo produzidas pelo movimento. Foi com essa concepção de geometria que ele foi capaz de lidar com os problemas que hoje exigiriam as ferramentas do cálculo diferencial e integral. Na primeira seção do Livro I dos *Principia* Newton apresenta o seu “método das razões primeiras e últimas” para resolver esses problemas matemáticos mais complexos. Como se percebe pelo próprio nome do método, até mesmo nas técnicas equivalentes ao cálculo diferencial, Newton tenta formula-las usando somente a linguagem da geometria e das proporções (ou “razões”). Portanto, também nesse ponto não se procurou traduzir a geometria dos *Principia* para uma linguagem algébrica. Muito pelo contrário. Não apenas mantive esse encaminhamento geométrico como produzi figuras geométricas também manualmente, à maneira dos antigos, usando somente régua, compasso e outros dispositivos mecânicos. Não estranhe, portanto, o leitor, algumas imagens ilustrando desenhos manuais que surgirão ao longo do trabalho. Devido a extrema

¹² Nesse trabalho não pretendo aprofundar na complexa questão da relação de Newton com o seu ideal de uma geometria clássica, e os seus métodos geométricos não tão ortodoxos, influenciados pela *nova análise* moderna, que revelavam que os seus métodos não se enquadravam tão perfeitamente nos padrões dos métodos clássicos, inclusive na teoria das proporções, como talvez o próprio Newton gostaria. Por essa razão também não tenho o objetivo de seguir à risca a teorias das proporções; nem mesmo Newton seguiu. Mas apenas estou alertando o leitor que, em geral, seguirei o estilo matemático clássico dos séculos XVI e XVII, o qual Newton ao menos professava seguir. Para mais detalhes sobre essa complexa relação da matemática de Newton veja Guicciardini (1999), especialmente cap.5, e Guicciardini (2009).

importância que a geometria possuía para o programa de Newton, procurei entrar, eu mesmo, em contato com essa prática antiga, que hoje quase não se realiza mais.

Outra observação historiográfica que gostaria de acrescentar é sobre a conhecida distinção entre *contexto de descoberta* e *contexto de justificação*.¹³ Como se sabe, a referida distinção se desenvolveu principalmente entre os positivistas lógicos com o objetivo de elucidar a lógica da ciência. Do ponto de vista dos positivistas, o contexto de justificação estaria relacionado com a análise da ciência do ponto de vista estritamente lógico, ou melhor, do ponto de vista da sua justificativa estritamente lógica, ignorando, assim, os aspectos psicológicos, históricos ou sociológicos que estariam vinculados ao contexto da descoberta. No entanto, o insucesso dos positivistas em evidenciar claramente esses aspectos lógicos das teorias científicas e, conseqüentemente, a sua validade lógica, colocou em xeque a utilidade dessa distinção. Não defendo, como alguns, que esses contextos sejam inseparáveis, do ponto de vista acima apresentado; para mim está claro que uma teoria científica pode ser avaliada somente a partir da sua justificativa estritamente lógica, embora o próprio projeto de esclarecer a lógica da ciência tenha fracassado a seu tempo. Nada impede que ele seja eventualmente retomado de uma forma modificada, por exemplo, a partir de outras lógicas diferentes da lógica clássica. Ou ainda, nada impede a ciência seja analisada estritamente do ponto de vista da sua *justificativa racional*, seja ela de que natureza for. Portanto, penso que é, sim, possível se falar em contexto de justificação dissociado do contexto de descoberta num sentido semelhante ao aplicado pelos positivistas. Mas a meu ver, numa investigação *histórica* não faz sentido manter essa distinção, uma vez que tal investigação, pela sua própria natureza, deve ser necessariamente holística, posto que já no ponto de partida se admite a ignorância de todos os elementos que estão emaranhados na estrutura da ciência. Ou seja, a investigação histórica do método da ciência implica um passo atrás em relação à essa análise do ponto de vista da lógica ou racionalidade, buscando distinguir quais são os elementos envolvidos na construção científica e suas relações, e analisá-los, inclusive do ponto de vista lógico. A separação dos aspectos lógicos, epistemológicos, psicológicos ou sociológicos pode até ocorrer, mas somente num momento posterior à investigação histórica, e não no momento exato dessa investigação. Em outras palavras, num trabalho histórico sobre o método da ciência, um dos objetivos é precisamente investigar no que consiste a própria racionalidade da ciência, e não assumir que ela se resume a uma determinada lógica, como foi no caso dos positivistas.

¹³ Sobre essa distinção, veja Reichenbach, 1938.

Dito isso, informo ao leitor que, uma vez que o primeiro volume desse trabalho é sobretudo uma pesquisa *histórica*, ignorei largamente a distinção entre os contextos de descoberta e justificação no sentido acima apresentado. Por outro lado, o segundo volume se propõe investigar o método *do ponto de vista da filosofia da ciência*, e nesse caso a separação entre esses dois contextos se tornará mais evidente, embora ainda assim sem uma distinção totalmente nitida. Isso porque o interesse principal do segundo volume é principalmente desvelar a racionalidade envolvida na ciência dos *Principia*, para, em seguida, refletir sobre a racionalidade da própria ciência em geral. Não deixa de ser uma análise da perspectiva do *contexto de justificação*, mas como não se assume um modelo de racionalidade já determinado e plenamente formalizado, a referida separação não é viável. Reiterando, um dos objetivos do trabalho é precisamente avaliar um modelo de racionalidade possível. Diante disso, prefiro simplesmente considerar que todo esse trabalho tem como objetivo analisar o método dos *Principia* da perspectiva da sua justificativa racional, iniciando com uma apresentação histórica no primeiro volume, mas avançando para uma análise dos elementos dessa suposta racionalidade, no segundo volume. Por essa razão, talvez mais conveniente do que usar a distinção entre contexto de descoberta e justificação delineada acima, seja simplesmente afirmar a minha preocupação central nesse trabalho são com os aspectos *internalistas* da ciência, ou seja, a busca pela sua racionalidade.

Como é de amplo conhecimento, dentro das correntes historiográficas da ciência se destacam as abordagens que se convenciou chamar de *externalistas* e *internalistas*, sendo que a primeira seria aquela que tende a ressaltar os fatores *externos* à lógica e racionalidade das teorias científicas, e que influenciam no seu desenvolvimento e aceitação, fatores em geral de ordem sociológica, tais como culturais, econômicos, políticos, éticos, religiosos ou os valores de uma maneira geral. A abordagem *internalista*, por outro lado, tende a ressaltar os aspectos *internos*, quais sejam, aqueles ligados somente à justificação racional da ciência. Como mencionei, embora numa pesquisa histórica como a proposta nesse trabalho todas as cartas devem estar sobre a mesa, ou todas as possíveis influências não devem ser sumariamente descartadas, deixo claro desde já ao leitor que o meu interesse principal são os aspectos *internalistas* da ciência. E com isso não estou afirmando que não hajam influências externas. Estou apenas afirmando que, apesar das influências externas que os cientistas eventualmente são submetidos, considero que em última instância o interesse principal deles é dirigido pelos fatores *internos* da ciência. Como reconheceu o próprio Robert K. Merton – um reconhecido *externalista* – “certas descobertas e invenções específicas pertencem a história interna da ciência, e são largamente independentes de outros fatores que não aqueles puramente

científicos”.¹⁴ Em suma, não admitirei ingenuamente que não hajam influências externas na ciência, mas ainda assim parto da premissa que, mais cedo ou mais tarde, os fatores internos acabam por prevalecer.

Outra maneira de compreender o enfoque metodológico desse trabalho é recorrendo à distinção proposta por John Losee entre as abordagens de filosofias da ciência *descriptivistas*, que são aquelas que se apoiam mais na descrição histórica da ciência, em oposição às abordagens *prescritivistas*, que pretendem prescrever normas sobre como a ciência deveria proceder para ser considerada racional.¹⁵ Losee divide a primeira abordagem em *descriptivismo modesto* e *descriptivismo robusto*, a primeira se preocupando em analisar o método e a racionalidade apenas a partir dos critérios e contexto da própria época em que a obra foi produzida, e a segunda se apoiando nessas descrições para refletir sobre o método da ciência *em geral*, ou melhor, para construir uma teoria geral sobre a ciência. A se basear por essa distinção de Losee, o primeiro volume dessa pesquisa faria as vezes do descriptivismo modesto, enquanto que o segundo volume estaria mais alinhado aos objetivos do descriptivismo robusto.

Para concluir essas observações preliminares, gostaria de mencionar alguns detalhes sobre a forma de apresentação desse trabalho. Em primeiro lugar, informo que mantive a estrutura original do trabalho mesmo depois de conclusões que permitiriam que essa estrutura fosse completamente reorganizada. A tese fundamental desse trabalho – que com os *Principia* surgiu o moderno programa das ciências naturais empíricas – não foi uma hipótese de pesquisa, como já ficou claro na introdução. Foi uma conclusão inesperada. Por essa razão, o texto que já havia sido produzido ao longo da pesquisa deveria sofrer edições para ser apresentado de uma maneira tradicionalmente dedutiva. O que estou informando aqui é justamente que não fiz essa reformulação. E não somente pela extensão desse trabalho, o que levaria a um esforço considerável. Mas principalmente porque acredito que a força daquela conclusão se tornará mais evidente se mantendo o trabalho no seu formato inicial. Portanto, a partir do andamento desse texto o leitor notará que ignoro a tese e as conclusões que apresentei nessas palavras introdutórias. E elas surgirão no trabalho apenas no momento em que as evidências se tornarem fortes o suficiente para ter que as admitir. Penso que manter o trabalho nesse formato mais indutivo, evitando edições mais substantivas, fortalece as teses que aqui se defenderão.

¹⁴ Sobre isso veja Shapin (1988) e Hall (1963).

¹⁵ Losee, 2001, p. 265.

Por fim, também alerto o leitor para um último expediente que utilizei que tem impacto na forma de organização desse trabalho. Com certa frequência retomo e reformulo etapas precedentes do texto à medida que o mesmo avança. À primeira vista o leitor pode supor que se trata de uma repetição, ou de uma mera redundância. Mas não é o caso. Trata-se de novas sínteses, mais elaboradas, das conclusões anteriores. Ou seja: em vez de editar uma formulação anterior a partir de uma compreensão mais aprofundada que surgem de novos elementos que se agregaram no trabalho, decidi não realizar tais edições, oferecendo, em vez disso, novas síntese mais elaboradas em momentos oportunos. Portanto, essas “revisões” de etapas precedentes da argumentação não tem o papel somente de relembrar as etapas anteriores; são reformulação a partir de novos elementos que as tornam mais precisas e amplas gradativamente. As razões para manter esse processo no texto são três. Primeiro, por uma questão de clareza. Esse processo permite ao leitor acompanhar claramente a evolução do pensamento do autor até a conclusão, possibilitando, inclusive, a reconstrução do pensamento sem maiores dificuldades. Essa possibilidade não é interessante somente para o leitor, mas talvez principalmente para o próprio autor. Em segundo lugar, mantenho esse processo no texto por uma questão de didática e hermenêutica. Esse encaminhamento torna os conteúdos mais didaticamente acessíveis, e, principalmente, limita as possibilidades de interpretações equivocadas do pensamento do autor. O pensamento do autor vai avançando gradualmente e restringindo as possibilidades de leitura diversa da sua intenção. Por fim, mantenho esse processo no texto por uma questão de fluência. Talvez um dos principais ganhos dessa técnica é a fluência na leitura do texto, que impede que o leitor tenha que ficar retornando à leitura de frases e passagens a todo momento. Na verdade, a forma de apresentação desse trabalho em geral teve esse norte fundamental: aumentar a fluência da leitura. Esclarecidos esses detalhes técnicos, historiográficos e estilísticos é possível, agora, iniciar o presente trabalho.

Volume I

O método dos *Principia*, do ponto de vista histórico.

“A publicação dos *Principia* de Newton foi central na transformação da filosofia natural em ciência natural como nós conhecemos hoje”.

William L. Harper, 2011, p.1

O objetivo desse volume é investigar o método dos *Principia* de Newton de um *ponto de vista histórico*. Naturalmente, para a compreensão precisa de uma obra de uma perspectiva particular é necessário, antes, a sua compreensão de uma perspectiva geral. Por isso, o primeiro alvo específico aqui é oferecer uma exposição e análise dos *Principia* de uma perspectiva geral, permitindo que os seus fundamentos, quer metafísicos, quer epistemológicos, matemáticos, metodológicos ou de outra natureza qualquer, sejam manifestos à medida que a exposição da obra é feita. Mas o objetivo principal é mesmo ler os *Principia* da perspectiva do *método*. Para tanto, as passagens e trechos que se mostrarem mais relevantes a tal propósito receberão maior destaque e discussão. Considerando esse objetivo, será conveniente ter em vista algumas questões oportunas no nosso horizonte. O que caracteriza fundamentalmente o método de Newton nos *Principia*? O que o distingue da abordagem dos seus contemporâneos, que também foram matemáticos e filósofos de primeira grandeza? Como Newton descreve o seu próprio procedimento? Qual o grau de coerência entre as descrições de Newton do seu método e o seu método efetivo? Essas questões terão um papel importante nesse volume, em primeiro lugar, porque elas ajustam o foco da nossa leitura para o tema da metodologia. Mas em segundo lugar, porque elas delineiam a estratégia de organização geral desse volume, e inclusive das suas divisões. Vale a pena, portanto, fazer algumas breves considerações iniciais sobre essas questões, ainda que voltemos a elas de modo mais aprofundado em partes subsequentes desse trabalho.

No que se refere particularmente às descrições de Newton sobre o seu método, já informei na introdução que se tratam de pronunciamentos que frequentemente não parecem ser muito elucidativos à primeira vista. Laudan chegou a afirmar que, na qualidade de comentador do seu próprio método Newton, teria sido “o mais enigmático dos metodólogos”.¹⁶ Mas, de início, quais pronunciamentos seriam esses? O que dizem? Onde estão localizados? Em que contexto? Por que eles têm gerado tantas controvérsias entre os historiadores?

Os pronunciamentos mais famosos de Newton sobre o seu método se encontram no “Escólio Geral” aos *Principia* e na Questão 31 da *Óptica*, onde se concentram as suas declarações mais polêmicas sobre a “dedução dos fenômenos”, a “indução” e o amplamente difundido “*hypotheses non fingo*” (não invento hipóteses). Para muitos historiadores esses pronunciamentos são enigmáticos porque o uso das hipóteses sempre foi de grande utilidade na ciência, e o próprio Newton as usava, como já nos mostraram diversos estudos;¹⁷ a

¹⁶ Laudan, 2000.

¹⁷ Veja, por exemplo, I. B. Cohen, 1966; Blake, 1960a.

expressão “dedução dos fenômenos”, por sua vez, parece usar os termos de maneira um tanto grosseira ou equivocada; e a indução, além de ser vista com certa suspeita pela filosofia da ciência contemporânea, não parece ter um papel tão significativo nos *Principia*, segundo a visão de muitos historiadores. Para eles, o que é mais admirável nos pronunciamentos de Newton é que não parecem fazer justiça à riqueza do método utilizado na sua obra. Quando confrontados com o que o tratado realmente apresenta, esses pronunciamentos não tocariam nos pontos que seriam os mais originais e fundamentais da ciência desse tratado, precisamente aqueles que envolvem a profícua relação entre a matemática e a investigação das coisas naturais. E haveria uma razão bastante plausível para esse fato.

Os pronunciamentos mais famosos de Newton sobre o método foram escritos principalmente na segunda edição dos *Principia*, em 1713, quase 30 anos depois da produção dos manuscritos para a primeira edição, e num contexto específico repleto de críticas à sua teoria da gravitação universal. A teoria de Newton estava sustentada na suposição que parecia vinculada a uma ação à distância, que era incompatível com a filosofia mecanicista dominante na época, a qual entendia que toda ação inteligível no mundo natural deveria ser explicada pelo contato. Segundo alguns intérpretes, ao ser duramente criticado, Newton lança mão de argumentos metodológicos para defender a sua teoria. De acordo com os padrões mecanicistas da época, uma das teorias mais difundidas para a explicação dos movimentos planetários era a teoria vorticial de Descartes, que se originou de uma abordagem que combinava um tratamento apriorista dos primeiros princípios da ciência e uma admissão mais flexível de hipóteses especulativas na filosofia natural, contanto que essas hipóteses fossem inteligíveis do ponto de vista da filosofia mecânica, e fossem úteis para “salvar os fenômenos”. Ora, esse tipo tradicional de filosofia natural contrastava com a filosofia natural experimental emergente no séc. XVII que, embora admitisse o uso de hipóteses como importantes ferramentas de investigação, impunha outras restrições quanto aos conteúdos que poderiam ser considerados válidos na filosofia natural. Para os filósofos experimentais, além da inteligibilidade, a concordância com a experiência passou a ser um critério decisivo. Ao ser criticado, inclusive por proponentes da própria filosofia experimental, Newton reafirmou repetidas vezes que o seu conceito de gravitação universal surgira estritamente da sua investigação a partir dos fenômenos, ou de conclusões obtidas da generalização a partir dos fenômenos (indução), enquanto que a principal teoria rival se fundamentava em hipóteses imaginadas, sendo insuficientemente sustentada pela experiência. O ponto importante aqui seria que as preocupações de Newton com as hipóteses, a indução, a dedução dos fenômenos, etc, não teriam o objetivo primário de esclarecer o seu método, ou o que ele desenvolveu

efetivamente nos *Principia*. Teriam surgido da atmosfera de críticas que envolvia a sua teoria, e do conflito entre os dois tipos distintos de filosofia natural que disputavam espaço durante a revolução científica: uma filosofia natural mais especulativa, representada principalmente por Descartes e Leibniz, e outra experimental, dominante na Inglaterra. De todo modo, os pronunciamentos de Newton nesse contexto teriam levado tanto cientistas quanto filósofos das gerações seguintes a acreditarem que o que caracterizava o sucesso da ciência poderia ser explicado justamente por esses elementos que foram destacados nos seus escritos tardios e, conforme certos alguns historiadores argumentaram, isso não trouxe resultados muitos positivos para o desenvolvimento da ciência, levando cientistas e filósofos a uma concepção ingenuamente positivista do empreendimento científico.¹⁸

Esse suposto equívoco de se atribuir uma importância exagerada aos elementos destacados por Newton nos seus textos mais tardios poderia ser percebido de maneira ainda mais clara quando comparados com os seus pronunciamentos sobre o método antes desse contexto de críticas. Quando voltamos para os comentários de Newton sobre o seu método à época da primeira edição dos *Principia* – ou mesmo antes – seria possível perceber um quadro totalmente diferente: uma ênfase precisamente nos elementos que de fato se acredita que distinguem o seu trabalho. Uma ênfase na relação entre a matemática e a filosofia natural. É isso que percebemos, por exemplo, na introdução das suas *Lectiones Opticae* (1670-1672), quando 17 anos antes de compor os *Principia* Newton já havia proposto um programa de filosofia natural que permitiria, com a ajuda dos “filósofos geômetras” ou “geômetras filósofos”, alcançar uma ciência da natureza “alicerçada na mais alta evidência”. É isso o que se percebe também no prefácio de Newton à primeira edição dos *Principia*, onde a ênfase recai principalmente sobre o aspecto mais fundamental e original da ciência newtoniana, qual seja, como, exatamente, seria possível usar a matemática com sucesso na investigação das coisas naturais.

Precisamente essa polêmica dos historiadores sobre se o que Newton disse sobre o seu método encontra alguma correspondência na sua prática delineou a estratégia básica para investigação histórica proposta para esse volume. Em primeiro lugar, para marcar bem essa dicotomia, adotei uma distinção sugerida por Laudan entre o *método da ciência* e a *teoria do método*. Segundo esse autor, o método estaria relacionado com “[o conjunto de] técnicas e procedimentos que um cientista utiliza ao realizar experimentos ou construir teorias”, enquanto que a “teoria do método” estaria relacionada “às opiniões metacientíficas explícitas

¹⁸ McMullin, 2001.

que um cientista adota ao examinar a lógica da inferência científica”.¹⁹ A partir dessa conceptualização, procurei adotar uma distinção entre os pronunciamentos metodológicos de Newton e o seu método efetivo, admitindo que eles não estariam, necessariamente, em perfeita harmonia. Mas também não assumi de imediato a leitura majoritária que os pronunciamentos metodológicos de Newton devem ser simplesmente ignorados. Ao contrário. Reconheço que diante da dificuldade de compreensão de um método tão complexo seria insensato não ouvir o que o próprio Newton tem a dizer acerca do seu procedimento. Por esse motivo, procedi uma segunda distinção importante nessa pesquisa. A distinção entre os pronunciamentos de Newton sobre o seu método à época da segunda e terceira edição dos *Principia*, em meio ao já referido contexto de críticas, e os pronunciamentos da primeira edição, ainda distantes dessa atmosfera polêmica. A ideia seria avaliar a coerência entre esses pronunciamentos, se são complementares ou contraditórios, e se estão parcialmente ou totalmente em harmonia com a prática metodológica de Newton. Naquilo que eventualmente iluminariam o método efetivo dos *Principia*, seriam considerados; naquilo que obscureceriam, seriam descartados. Em outras palavras, o objetivo do presente volume é compreender o método efetivo dos *Principia*, e os pronunciamentos de Newton nos seriam úteis apenas naquilo em que nos auxiliariam nesse alvo. De qualquer maneira, as referidas diferenças entre método e teoria do método, e entre os comentários metodológicos da primeira e segunda edição estarão sempre no horizonte desse volume, e podem ser percebidas, desde já, na estratégia de organização da sua estrutura básica, que apresento abaixo.

Em primeiro lugar, na *Parte 1*, procedo a exegese dos comentários metodológicos de Newton na primeira edição dos *Principia*, em especial no texto do prefácio. Como se mostrará, no prefácio à primeira edição dos *Principia* não teremos uma compreensão apenas da proposta metodológica desse tratado, segundo a retórica de Newton, mas também dos fundamentos metafísicos e matemáticos de fundo que ele evoca para a sua justificação e apresentação. Em seguida, (nas *Parte 2* e *Parte 3*) apresento o corpo dos *Principia*, com o objetivo de discernir os seus fundamentos, estrutura, e sobretudo o seu método propriamente dito. Na *Parte 2* apresento e analiso o Livro I dos *Principia*, que esclarece, dentre outras coisas, a matemática particular dos *Principia*, a qual chamei de “geometria mecânica de forças”; e na *Parte 3* apresento e analiso o Livro III dos *Principia*, que revela a sua filosofia natural. Nesta parte é que se encontra o argumento de Newton da gravitação universal e a sua resolução do problema do sistema do mundo. Por fim, na *Parte 4*, analiso os comentários

¹⁹ Laudan, 2000.

metodológicos de Newton da segunda e terceira edição, em especial o Escólio Geral, avaliando a sua coerência, ou não, com os comentários da primeira edição e com todo o quadro dos *Principia* apresentado anteriormente. É dessa conclusão que procedo a caracterização histórica do método dos *Principia* de Newton, que serviu de base para a análise da perspectiva da filosofia da ciência que se apresentará no segundo volume. Esclarecido o roteiro básico desse volume, sigo com a apresentação dos comentários metodológicos do prefácio à primeira edição dos *Principia*.

Parte 1.
O prefácio os Principia:
A mecânica universal.

“A *geometria* está fundada na prática mecânica e nada mais é do que a parte da *mecânica universal* que propõe a arte da medição de maneira exata e demonstrativa”.

Isaac Newton, prefácio aos *Principia*, 1686.

O prefácio do autor à primeira edição dos *Principia* é um texto de elevada importância para os objetivos de investigação do método de Newton. Evidentemente ele foi escrito antes da publicação da obra, e, por conseguinte, antes da enxurrada de críticas que este trabalho recebeu nos anos que se seguiram. Nesse sentido, é um texto mais puro, pouco contaminado pelo tom apologético da atmosfera polêmica que mais adiante se estabeleceu. Talvez precisamente por isso Newton tenha desistido do projeto de alterá-lo para a segunda edição. Mas o Prefácio tem uma elevada importância não apenas por isso.²⁰ Ele possui outras virtudes que também merecem ser citadas aqui. Esse texto não é apenas *uma* apresentação da obra feita pelo seu autor. É a primeira delas. Isso é significativo. Como Guicciardini nos lembra, o Prefácio de 1687 representa “as primeiras palavras dirigidas ao leitor de um dos maiores clássicos da história da ciência”²¹. E aqui o leitor deve se lembrar que o gênio de Newton só passou a ser amplamente reconhecido depois da publicação dessa obra. Ao tempo da escrita do Prefácio, ele já tinha consciência da magnitude do trabalho que possuía em mãos, e uma vez que ainda não havia conquistado a sua plena estatura como matemático e filósofo natural entre os seus contemporâneos, é razoável supor que as “primeiras palavras” da sua obra prima não tenham sido escritas displicentemente, às pressas, ou por uma mera necessidade formal. Não obstante esse fato, importa dizer que esse Prefácio tem sido rotineiramente esquecido pelos historiadores da ciência.

Apenas para se ter uma ideia, num dos mais famosos e completos guias para estudo dos *Principia*, o *Guide to Newton's Principia*, de I. Bernard Cohen, no qual o autor percorre cada seção dessa obra discutindo e elucidando os seus mistérios, nenhum espaço é dedicado para a análise do Prefácio²². Em *Newton's Principia for the Common Reader*, Chandrasekhar faz uma análise matemática detalhada de todas as proposições dos livros I e III, mas simplesmente salta o Prefácio²³. Em *The Key to Newton's Dynamics*, uma influente e conhecida introdução às proposições do *Principia*, Brackenridge devota uma única e pequena passagem de uma linha para o Prefácio: “Ele abre com uma referência aos antigos e encerra com um apelo para o leitor olhar com indulgência para o trabalho num campo tão difícil”²⁴. Em *Newton's Principia, the Central Argument*, outra obra exclusiva sobre os *Principia*, Densmore não tece qualquer comentário ao Prefácio²⁵. E de semelhante modo, o Prefácio

²⁰ Doravante utilizarei o termo Prefácio com a inicial maiúscula para me referir ao prefácio à primeira edição dos *Principia*.

²¹ Guicciardini, 2009, p.293.

²² Cohen, 1999, p. 1–370.

²³ Chandrasekhar, 1995.

²⁴ Brackenridge, 1995, p.142.

²⁵ Densmore, 1995.

também é completamente ignorado em De Gandt, *Force and Geometry in Newton's Principia*²⁶. O Prefácio aos *Principia* tem recebido pequena atenção dos historiadores da ciência e da matemática²⁷.

Guicciardini arrisca especular sobre a razão. Nas suas palavras, esse texto tem sido largamente ignorado principalmente porque as suas primeiras linhas seriam “um tanto difíceis de interpretar”²⁸. De fato, nos pouquíssimos estudos que foram realizados sobre o Prefácio aos *Principia*, os adjetivos usados para descrever essas linhas não são muito animadores. Juntamente com o “um tanto difícil de interpretar” de Guicciardini, temos ainda “enigmático”, “abstruso”, “incomum”, “excêntrico” e até “bizarro”²⁹. O fato é que o Prefácio aos *Principia* não é de modo algum um texto de fácil entendimento para o leitor contemporâneo, e talvez nem mesmo para os leitores contemporâneos do próprio Newton.

Várias são as razões para as dificuldades interpretativas do Prefácio. Reuni algumas delas aqui. Em primeiro lugar, as dificuldades decorrem do grande número de tradições e campos do conhecimento que Newton mobiliza e mistura nesse texto. Mecânica, artes manuais, ciências mistas, filosofia, geometria, mecânica racional, e ainda possivelmente outros. Embora essa “mistura” seja inegavelmente uma dificuldade, não deixa de ser também uma das virtudes do Prefácio. É desse emaranhado de concepções, orientações e tradições – filosóficas e matemáticas, antigas e modernas – que percebemos, ainda que obscuramente, as influências que se inter-relacionam para compor a moldura a partir da qual emerge essa obra magna. Aprofundar no estudo do Prefácio é mergulhar necessariamente na história da ciência, voltando a um momento no tempo onde influências e tradições antigas e modernas convergem de um modo singular para formar a peça que define o destino da ciência moderna. E talvez em nenhum outro lugar dos *Principia* essa convergência se mostre mais explícita.

Em segundo lugar, as dificuldades interpretativas do Prefácio surgem da postura ativa de Newton em reorganizar os campos do conhecimento até então estabelecidos, diluindo fronteiras e redefinindo objetivos. Newton não está, no Prefácio, apenas apresentando o objeto de estudo dos campos do conhecimento tais como eram aceitos em sua época; ele está resgatando significados históricos antigos, criticando concepções modernas, reorganizando a forma compreendê-los. Surge daí uma confusão semântica gerada principalmente por essa

²⁶De Gandt, 1995.

²⁷ Guicciardini informou que os únicos estudos sobre o Prefácio que ele tem conhecimento são Garrison, 1987; Gabbey, 1992; Dear, 1995, cap. 8; e Domski, 2003. Em outras palavras, em mais de 300 anos de estudo dos *Principia* temos apenas 3 artigos e dois capítulos de livros que abordam com mais detalhes o Prefácio de Newton à primeira edição dos *Principia*. Ainda assim, o leitor poderá ver por si mesmo que o único que aborda o Prefácio de maneira mais completa é Guicciardini, 2009, cap. 13.

²⁸ Guicciardini, 2009, p.294.

²⁹ Veja Garrison, 1987, por exemplo.

mistura de tradições antigas e modernas, em contraste com as alterações que ele próprio está propondo.³⁰ Isso dificulta sobremodo o trabalho do historiador.

Em terceiro lugar, as dificuldades interpretativas do Prefácio surgem do fato dele não ser apenas um texto descritivo, mas argumentativo. Por incrível que possa parecer, Newton precisa lançar mão de teses e argumentos já nas primeiras linhas da apresentação da sua obra, e isso para justificar a simples possibilidade de um tema como por ele proposto.

Em quarto lugar, dificuldades interpretativas também surgem do estilo truncado da redação de Newton, com várias elipses, transições abruptas, ordem lógica que não facilita o entendimento, talvez típicos de uma época em que a escrita, por ser manuscrita, era muito mais espontânea do que hoje.

Em quinto e último lugar, talvez a maior das dificuldades interpretativas do Prefácio decorra do fato de que tudo o que foi mencionado anteriormente tenha sido inserido num espaço textual ultracompacto de menos de duas páginas. O texto de Newton é extremamente comprimido e dividido em dois longos parágrafos. O primeiro parágrafo apresenta o tema da obra, seu objetivo, pertinência, fundamentos, divisões e método. O segundo parágrafo apresenta algumas considerações gerais, detalhes de publicação, erros, lacunas do trabalho, visando mais a indulgência do leitor para os pequenos problemas sempre presentes em qualquer publicação. É o primeiro parágrafo que contém os conteúdos mais exóticos do Prefácio, os quais versam principalmente sobre as relações complexas e incomuns que se estabelece entre a geometria, a mecânica, natureza e a filosofia natural – e isso em pouco menos de uma página e meia.

Em razão de todas as dificuldades interpretativas referidas acima, abordo esse texto dividindo o percurso da *Parte I* em três capítulos. No primeiro capítulo apresento uma etapa de “preliminares” ao Prefácio, na qual desenvolvo brevemente alguns tópicos relacionados aos contextos e antecedentes históricos que julgo necessários para melhor compreensão desse texto. No segundo capítulo, apresento propriamente a exposição do primeiro parágrafo do Prefácio de Newton, que é o parágrafo que nos interessa na investigação. Por fim, a partir da breve contextualização e da exposição feita nos capítulos anteriores, ofereço, no terceiro capítulo, uma discussão sobre alguns pontos de interesse que podem ampliar a compreensão dos temas do Prefácio, em especial aqueles com algum impacto sobre a concepção do método de Newton nos *Principia*. Conforme será mostrado ao longo desse percurso, no Prefácio à

³⁰ Como veremos ao longo da *Parte um* desse trabalho, o primeiro parágrafo do Prefácio é um verdadeiro labirinto semântico, uma vez que se misturam os sentidos antigos e modernos de certos termos com outros sentidos que Newton está inaugurando no seu texto.

primeira edição dos *Principia*, Newton apresenta um novo programa de investigação em filosofia natural fundado, primeiro, numa determinada concepção metafísica da natureza, e, segundo, numa determinada concepção dos fundamentos da matemática, concepções que, juntas, tornam possível conceber um projeto de usar a matemática para investigar as causas dos fenômenos naturais.

Antes de entrarmos no primeiro capítulo ofereço uma longa citação do primeiro parágrafo do “*Auctoris Praefatio ad Lectorem*” dos *Principia*, para oportunizar ao leitor um contato direto com as dificuldades que me referi acima, e também com as primeiras palavras dessa obra que – como disse Guicciardini – é “um dos maiores clássicos da história da ciência”.

Auctoris Praefatio ad Lectorem

Uma vez que os antigos (como nos informa *Pappus*) consideravam a ciência da *mecânica* da máxima importância na investigação das coisas naturais, e os modernos, rejeitando as formas substanciais e as qualidades ocultas, têm se esforçado em submeter os fenômenos naturais a leis matemáticas, pareceu-me conveniente nesse tratado cultivar a *matemática* na medida em que se relacione com a *filosofia [natural]*.³¹ Os antigos dividiram a *mecânica* em duas partes: a *racional*, que procede de maneira exata por meio de demonstrações, e a *prática*. A *mecânica prática* abrange todas as artes manuais, e é desse campo que a *mecânica* tomou o seu nome. Mas uma vez que os artífices não trabalham com grande exatidão, ocorreu que todo o conteúdo da *mecânica* foi distinguido da *geometria* pela atribuição de exatidão à *geometria* e de qualquer coisa menor que exatidão à *mecânica*. No entanto, os erros não estão na arte, mas nos artífices. Se um mecânico trabalha com pequena exatidão é um mecânico imperfeito; e se outro trabalhasse com perfeita exatidão seria o mais perfeito dos mecânicos. Porque a descrição de círculos e linhas retas, na qual a *geometria* está fundada, pertence à *mecânica*. A *geometria* não nos ensina como traçar essas linhas; apenas assume que saibamos traçá-las. Ela exige que o iniciante tenha aprendido a descrever as linhas e círculos de maneira exata

³¹ Original no latim: “Visum est in hoc Tractatu Mathesin excolere quatenus ea ad Philosophiam spectat”. Na versão do Andrew Motte: “I have in this treatise cultivated mathematics so far as it regards philosophy”. Adaptação do Cajori: “I have in this treatise cultivated mathematics as far as it relates to philosophy”. Tradução do Cohen: “It have seemed best in this treatise to concentrate on mathematics as it relates to natural philosophy”. Eu penso que tanto a versão do Cajori quanto a do Cohen perdem algo importante que a primeira tradução do Motte permite captar do latim original. O termo inglês “regards” usado na tradução do Motte certamente pode ser entendido como “relates” – termo que tanto Cajori quanto Cohen utilizaram. No entanto o termo de Motte é mais informativo do que este último. “Regard” é entendido primariamente como (1) pensar ou considerar algo de uma maneira particular; (2) olhar atentamente, observar de maneira próxima; e só em seguida (3) relacionar a algo. Parece que o termo em latim “spectat” também carrega esses primeiros dois sentidos de olhar, observar atentamente, considerar. Em segundo lugar, no inglês arcaico, que é o caso de Motte, “regard” é “levar em conta, considerar”, que também se torna mais informativo que “relates” que apenas sugere uma conexão entre coisas. Então a frase original (“Mathesin excolere quatenus ea ad Philosophiam spectat”) poderia ser traduzida de uma forma alternativa como “desenvolver a *matemática* ao ponto em que ela tenha uma relação com a *filosofia [natural]*”. Esta foi a única frase que eu hesitei na comparação das traduções em inglês com o original em latim, precisamente porque percebi que o sentido poderia ser afetado. A interpretação do prefácio que se seguirá nesse capítulo também servirá para defender a tradução dessa frase aqui proposta, frase que resume o propósito de Newton no início do prefácio.

antes que ingresse em suas fronteiras; e somente depois disso ensina como problemas podem ser resolvidos por meio dessas operações. O problema de descrever retas e círculos não é um problema da *geometria*. A solução desse problema é requerido da *mecânica*; a *geometria* apenas ensina a usar essa solução. E a glória da *geometria* é que partindo de tão poucos princípios, advindos de outra parte, se possa produzir tantas coisas. Portanto, a *geometria* está fundada na prática mecânica e nada mais é do que a parte da *mecânica universal* que propõe a arte da medição de maneira exata e demonstrativa. Mas uma vez que as artes manuais são aplicadas principalmente para movimentar corpos, ocorre que a *geometria* comumente é utilizada em referência à magnitude, enquanto que a *mecânica*, em referência ao movimento. Nesse sentido, a *mecânica racional* será a ciência dos movimentos a partir de forças, quaisquer que sejam; e das forças que são requeridas para produzir quaisquer movimentos, proposta de maneira exata e demonstrativa. Os antigos desenvolveram esta parte da mecânica em relação aos *cinco poderes* que se vinculam às artes manuais, e consideraram a gravidade (que não é um poder manual) apenas no que se refere ao movimento de pesos por tais poderes. Entretanto, a minha preocupação aqui não é com as artes, mas com a filosofia; e escrevo não concernente a poderes manuais, mas a poderes naturais, concentrando-me principalmente em aspectos relacionados à gravidade, levidade, força elástica, resistência dos fluidos, e forças semelhantes a essas, quer atrativas, quer impulsivas. E por essa razão eu ofereço esse trabalho como os Princípios Matemáticos da Filosofia [Natural]. Porque toda a dificuldade da filosofia [natural] consiste nisso – a partir dos fenômenos dos movimentos investigar as forças da natureza, e então, a partir dessas forças, demonstrar os outros fenômenos (...).³²

³² Tradução minha, do latim. Grifos do Newton.

1 PRELIMINARES AO PREFÁCIO

1.1 A MECÂNICA DOS ANTIGOS

Nessa etapa de preliminares ao Prefácio desenvolverei três tópicos que remetem ao contexto a partir do qual os *Principia* emergiram. A “mecânica dos antigos”, a “matematização da natureza dos modernos” e “a geometria mecânica de Barrow”. Começemos com a “mecânica dos antigos”. Logo nas primeiras palavras do Prefácio, Newton afirma: “Uma vez que os antigos (como nos informa *Pappus*) consideravam a ciência da *mecânica* da máxima importância na investigação das coisas naturais (...)”.³³ Essa frase inicial já nos sugere algumas questões. Qual “ciência da mecânica” é essa que os antigos consideravam tão importante na investigação das coisas naturais? Quem são esses “antigos mecânicos” mencionados por Newton?

Newton nos forneceu a fonte a partir da qual citou a *mecânica dos antigos*. É *Pappus Alexandrinus*, ou *Pappus de Alexandria* (290 - 350 d.C.), um dos últimos matemáticos helênicos da antiguidade. No quarto século, Pappus produziu uma coletânea da matemática grega antiga composta de oito livros, que foi redescoberta na Renascença e traduzida para o latim por Federico Comandino, em 1588. No Prefácio, Newton se refere ao Livro 8 da coleção de Pappus, no qual o autor alexandrino lida especificamente com a *mecânica dos antigos*. Como nos informa Sefrin-Weis³⁴, no fim da antiguidade o Livro 8 de Pappus circulou independentemente dos demais sob o título de “*Introdução à Mecânica*”, e caracterizava o campo da mecânica a partir de um ponto de vista metodológico, enfatizando principalmente a mecânica teórica. No livro 8, logo em suas primeiras palavras, Pappus afirma que a “ciência da mecânica se tornou um assunto digno de interesse dos filósofos, e um objeto digno da aspiração de todos os que se preocupam com as ciências matemáticas”³⁵. E em seguida divide o campo da mecânica em duas sub-disciplinas, ou ramos: a mecânica “teórica” (ou racional) e a mecânica “prática”. Ele atribui essa divisão aos discípulos de Heron de Alexandria, importante matemático e mecânico que viveu por volta de 150 a.C.³⁶. Afirma Pappus:

³³ “Cum Veteres *Mechanicam* (uti Author est *Pappus*) in verum Naturalium investigatione maximi fecerint (...)”. Grifos de Newton.

³⁴ Sefrin-Weis, 2010, p.xx.

³⁵ Pappus, Livro 8, 1970.

³⁶ Há certa divergência entre os historiadores sobre o período em que viveu Heron. Alguns acreditam que ele viveu por volta de 150 a.C., enquanto outros acreditam numa datação próxima a 250 d.C. [Veja *MCTutor History of Mathematics*].

Alguns dos seguidores de Heron que estudaram a ciência da mecânica afirmaram que ela é em parte teórica e em parte prática; a primeira é derivada da geometria, aritmética, astronomia, e ciências naturais, enquanto que a última é desenvolvida com perfeição pela técnica de ferreiros e latoeiros, construtores, carpinteiros e escultores, e suas sutis habilidades nesses trabalhos.³⁷

A caracterização de cada ramo da mecânica pelos seguidores de Heron já nos sugere qual deles seria o mais antigo: a mecânica prática. Conforme a passagem acima nos informa, esse ramo da mecânica deriva de habilidades técnicas desenvolvidas desde a antiguidade relacionadas com a construção de artefatos em metais, madeiras, esculturas, ou qualquer outro tipo de trabalho que envolva habilidade e sutileza. A tradução de Thomas³⁸ nos oferece um excelente complemento dessa caracterização: a mecânica prática estaria relacionada com *trabalhos manuais*. Esses trabalhos seriam realizados principalmente em metais, arquitetura, carpintaria, pintura, ou “qualquer coisa envolvendo habilidades com as mãos”³⁹. Mais adiante Pappus nos ensina que foi este o ramo que deu origem à própria disciplina que acabou por ser nomeada de *mecânica*. Essa disciplina estaria relacionada com atividades como a fabricação de instrumentos de guerra, máquinas movidas a água e a vento (*máquinas pneumáticas*), relógios de sol, entre outros dispositivos. Ao fazerem essa caracterização, possivelmente os discípulos de Heron tinham em vista a obra *Mechanike syntaxis (Compêndio de Mecânica)*, de Filo de Bizâncio (280–220 a.C.), a primeira que se tem conhecimento sobre o assunto da mecânica entre os gregos.⁴⁰

A *mecânica* enquanto conjunto de habilidades técnicas relacionadas aos trabalhos manuais foi apresentada de forma sistemática por Filo, mas certamente teve origem muito antes dele. Os antigos gregos faziam distinção entre a *techne* e a *episteme*, ambas grandemente louvadas na antiguidade⁴¹. A última estava relacionada aos conhecimentos teóricos, enquanto que a primeira, aos práticos. Estes conhecimentos práticos estavam ligados, sobretudo, à construção de dispositivos, instrumentos, mecanismos para facilitar a vida humana, ou, de um modo mais geral, à *tecnologia*⁴². Envolvia, por exemplo, a fabricação de

³⁷Pappus, op. cit.

³⁸ Pappus, Livro 8, 1941, p.615. “The mechanicians of Heron's school say that mechanics can be divided into a *theoretical* and a *manual* part; the theoretical part is composed of geometry, arithmetic, astronomy and physics, the manual of work in metals, architecture, carpentering and painting and anything involving skill with the hands”.

³⁹ Ibid, op.cit.

⁴⁰ De Gandt, 2000.

⁴¹ Veja Brunschwig, 2000, p.80; e Béllis, 2000, p. 313.

⁴² Na introdução do pseudo-aristotélico *Problemata Mechanicae* se diz: “coisas notáveis (...) são produzidas pela habilidade [techne] para o benefício da humanidade (...)”. Essas “coisas notáveis” eram os dispositivos construídos chamados de *mekhanes*.

armas e ferramentas, técnicas de agricultura, de metalurgia, de construção, arquitetura, transporte de água, navegação, e assim por diante⁴³. Filo provavelmente reuniu uma parte desses conhecimentos técnicos acumulados durante séculos. Na *Mechanike syntaxis*, ele apresenta um resumo da obra a partir dos tópicos: (1) alavancas, (2) construção de portos, (3) catapultas, (4) pneumática, (5) construções de fortalezas, (6) poliorcética (cerco e defesa de cidades), e (7) estratégias.

O ramo do conhecimento abarcado pela *techne* também foi contemplado por Aristóteles na sua famosa classificação dos conhecimentos antigos. Nessa classificação, eles seriam pertencentes ao campo das “ciências produtivas”, aquelas relacionadas com a criação e construção de objetos úteis para o homem. A introdução do pseudo-aristotélico *Problemata Mechanicae* também oferece um ótimo exemplo da caracterização da mecânica antiga:

Coisas notáveis de causas desconhecidas ocorrem de acordo com a natureza, enquanto outras, que são produzidas pela habilidade [*techne*] para o benefício da humanidade, ocorrem contrariamente à natureza. Pois em muitos casos a natureza produz efeitos que não nos favorecem, uma vez que a natureza sempre age de modo consistente e simples, e o que nos traz benefício frequentemente muda de muitos modos. Assim, quando temos que produzir um efeito contrário a natureza, estamos em desvantagem em virtude da dificuldade, e isso nos requer a habilidade [*techne*]. Portanto, chamamos a parte da *techne* que auxilia nessas dificuldades de um dispositivo [*mekhane*]. Pois, como o poeta Antífote escreveu, isso é verdade: “Pela *techne*, ganhamos o domínio sobre a natureza que antes nos derrotava”. Entre essas coisas estão aquelas nas quais o menor domina o maior, e aquelas relativas a pequenos pesos que movem um grande peso, e todos os semelhantes dispositivos que podem ser chamados de problemas mecânicos.⁴⁴

Poderíamos resumir a compreensão da mecânica antiga dos gregos por meio da caracterização precisa daqueles que com ela trabalham: os *mecânicos*. Os mecânicos antigos eram pessoas que hoje talvez fossem melhor denominadas de *engenheiros*, pessoas dotadas de *engenhosidade*, ou habilidades técnicas especiais (*techne*) para construir variados tipos de dispositivos, instrumentos, artefatos ou mecanismos engenhosos (*mekhanes*) úteis para a vida humana. Como diz o texto do *Problemata*, os mecânicos são pessoas que constroem “coisas notáveis”. Pappus cita certos termos usados pelos antigos para se referirem a essas pessoas, muitas delas treinadas desde a sua juventude. Elas eram conhecidas como “artífices chefes”, ou “arquitetos”, “inventores de dispositivos mecânicos”, “engenheiros”, ou, simplesmente “mecânicos”. Em vista disso, a mecânica dos gregos antigos pode por nós ser concebida, ainda que correndo o risco de simplificar demais, como a arte de construir *máquinas*, ou *dispositivos mecânicos*.

⁴³ De Gandt, op.cit. p.488, 489.

⁴⁴ Aristotle, 1955, p.331.

Na Idade Média, o campo da mecânica ficou também conhecido pelo nome de *artes manuais*. Esse campo perdeu prestígio naquela época por ser considerada um conjunto de atividades de menor dignidade, quando comparadas aos conhecimentos teóricos, como a filosofia. Esse entendimento gerou a conhecida distinção medieval entre *artes manuais* e *artes liberais*, sendo as últimas as atividades dignas dos homens livres, enquanto que as primeiras seriam praticadas por pessoas de cultura inferior.⁴⁵ Essa distinção medieval entre *artes manuais* e *artes liberais*, no entanto, não poderia estar mais afastada daquela entre a *techne* e a *episteme* dos antigos, que, como se mencionou, eram igualmente louvadas na antiguidade. Como se sabe, o apreço pelas *artes manuais*, principalmente na sua relação com os conhecimentos teóricos, ressurgiu na modernidade e contribuiu significativamente para a deflagração da revolução científica.

Mas o livro 8 de Pappus aparentemente não foi escrito para apresentar a *mecânica prática*. O intuito principal parece ter sido apresentar a *mecânica racional*, um ramo que possui uma relação muito mais profunda com a matemática. No que consistiria exatamente esse domínio, da mecânica racional, para os antigos? Segundo Pappus, Arquimedes (288-212 a.C.) foi o grande fundador da mecânica racional. Heron e Carpo de Antioquia também foram dois outros nomes importantes desse campo. Na passagem do Livro 8 que já foi citada acima se diz que a mecânica racional é “derivada da geometria, aritmética, astronomia e ciências naturais”.⁴⁶ Mais adiante Pappus revela que Carpo, seguindo Arquimedes, aplicou a geometria no estudo das artes mecânicas:

Carpo, e outros juntamente com ele, utilizaram apropriadamente a geometria em alguns ofícios. Pois a geometria geralmente pode ser empregada em conexão com os corpos em muitas artes em virtude do que com eles possui em comum; dispondo a geometria de um certo parentesco com todas as artes, pode ser utilizada com vantagem na construção de instrumentos e também no ofício do artífice-chefe.⁴⁷

É conveniente lembrar que já na obra de Filo de Bizâncio a matemática tinha adquirido uma posição privilegiada no estudo das artes mecânicas. Na *Mechanike syntaxis*, Filo inicia a obra com uma introdução à matemática, e no livro 4, no tópico sobre as catapultas, ele teve que resolver o problema matemático da duplicação do cubo para apresentar uma determinada solução mecânica⁴⁸. No entanto, a partir de Arquimedes essas duas disciplinas adquiriram uma relação muito mais profunda. Pappus nos informa que, sendo

⁴⁵ Rossi, 2001, cap.3.

⁴⁶ Pappus, Livro 8, 1970.

⁴⁷ Ibid, op. cit.

⁴⁸ De Gandt, op. cit., p.491.

um dos mais capazes e engenhosos artífices do seu tempo, Arquimedes “sabia a causa de todas essas coisas e as regras que as governavam”, e, ao mesmo tempo, era um homem de elevado gênio na matemática, capaz de empreender uma notável fusão entre a mecânica e a geometria, muito mais abrangente que as aplicações pontuais de Filo, ou de outros dos seus antecessores.

Arquimedes introduziu pelo menos duas importantes inovações no estudo da mecânica: (1) a ideia de “poderes mecânicos”; e (2) um tratamento totalmente racional, ou geométrico, desses poderes, inspirado no modelo euclidiano. Os “poderes mecânicos” eram os princípios mais elementares nos quais as máquinas ou os dispositivos construídos pelos mecânicos poderiam se basear – algo que hoje chamaríamos de “máquinas simples”. Essas máquinas seriam os mais simples dispositivos a partir das quais se comporiam todos os outros, mais complexos. Máquinas que apesar da grande simplicidade seriam a base para todas as demais máquinas. Na prática, eram mecanismos capazes de alterar forças ou mudar o seu sentido, exigindo menos esforço para executar certos trabalhos. Um exemplo paradigmático é a *alavanca*. Como nos informa Pappus, Heron reduziu os poderes mecânicos ao número de cinco – apesar de haver certa polêmica sobre o seu número exato na época. Na sua obra *Mecânica*⁴⁹, Heron apresenta os cinco mecanismos por meio dos quais se podia colocar uma carga em movimento: a *alavanca*, a *polia* (*roldana* ou *moitão*), a *cunha*, o *parafuso* e a *roda* (usada com eixos ou num sistema de acoplagens). Uma vez reduzidas as máquinas aos seus princípios mais elementares, ou seja, aos seus “poderes mecânicos”, Arquimedes e Heron aplicaram um tratamento racional semelhante ao da geometria para estudá-los, inaugurando o que, segundo Pappus, passou a ser chamado de *mecânica racional*, uma abordagem rigorosa, exata e demonstrativa do estudo dos poderes mecânicos, usando um estilo geométrico-demonstrativo à maneira dos *Elementos* de Euclides. A mecânica racional de Arquimedes explora as consequências de um conjunto de postulados relacionados às balanças e procede para a prova da lei da alavanca e, em seguida, com base em postulados apropriados, demonstra o princípio que recebeu o seu nome.⁵⁰

Embora Pappus considere Arquimedes e Heron os fundadores da mecânica racional vale a pena destacar também uma possível influência de Aristóteles nessa disciplina. Pierre Duhem chegou a considerar Aristóteles o pai da mecânica racional⁵¹, e no seu conhecido *History of Mechanics*, Rene Dugas tomou como ponto de partida da sua história o *Problemata*

⁴⁹ Ibid, op. cit.

⁵⁰ Heath, 1897.

⁵¹ Duhem, 1991, p.13.

Mecanicae, supostamente escrito por Aristóteles⁵², e não os trabalhos de Arquimedes e Heron. Seria mesmo Aristóteles o pai da mecânica racional? De fato, o *Problemata Mechanicae* pretendia lançar os fundamentos do estudo dos poderes mecânicos sob uma metodologia geométrica. Após apresentar a ciência da mecânica e explicar o que eram os problemas mecânicos, o autor afirmou:

[Os problemas mecânicos] não são totalmente idênticos aos problemas físicos, tampouco são inteiramente separados deles, mas compartilham algo tanto na especulação matemática quanto na física, pois o método é demonstrado pela matemática, mas a aplicação prática pertence à física. Entre os problemas incluídos nessa classe estão aqueles relacionados com a alavanca.⁵³

E o tratado segue investigando a lei da alavanca de uma maneira racional. Com efeito, todo o tratado busca a responder fundamentalmente uma pergunta: “Porque pequenas forças conseguem mover grandes pesos por meio da alavanca?”. E segue-se daí a análise geométrica do autor.

Vale dizer, no entanto, que a maior parte dos comentadores considera o *Problemata Mechanicae* um pseudo-aristóteles, uma obra provavelmente derivada da escola peripatética, e então não poderia ser considerado mais original que os trabalhos de Arquimedes. Ainda assim, não se deve ignorar a possível influência de Aristóteles nessa disciplina. Basta perceber que divisão entre *mecânica prática* e *mecânica teórica* dos seguidores de Heron lembra muito a divisão aristotélica entre ciências teóricas, práticas e produtivas. E a própria definição pappusiana de mecânica teórica como sendo aquela “derivada da geometria, aritmética, astronomia, ciências naturais”, lembra obviamente o cânone das ciências teóricas aristotélicas, ao qual todas essas disciplinas citadas pertenciam.

A *Física* de Aristóteles classificou os conhecimentos da astronomia, óptica e harmônica como ramos das *ciências matemáticas*, ou das assim chamadas *matemáticas mistas* ou *concretas*, que por sua vez pertenciam às ciências teóricas juntamente com a Física e Metafísica⁵⁴. E na *Metafísica*, livro *M* – um escrito que discorre sobre aquilo que poderíamos considerar hoje como “filosofia da matemática” – Aristóteles acrescenta outra disciplina à lista daquelas que já compunham a matemática mista: a “mecânica”⁵⁵. Assim, não apenas a astronomia, a óptica e a harmônica pertenciam a esse campo, mas igualmente a ciência da mecânica. São poucas as dúvidas, portanto, de que para Aristóteles havia efetivamente uma

⁵² Há controvérsia sobre a autoria verdadeira de Aristóteles, no entanto a maior parte dos comentadores concordam que se trata de um pseudo-aristóteles escrito no período helenista.

⁵³ Aristotle, op. cit.

⁵⁴ Aristóteles, *Física*, Livro II, 2009.

⁵⁵ Idem, *Metafísica M*, cap 3, 1976.

mecânica *racional*. Com efeito, esses textos de Aristóteles revelam que para ele a mecânica era uma ciência peculiar: ao mesmo tempo pertencia às ciências produtivas e às ciências teóricas, ou mais especificamente, às artes manuais e à matemática mista. Mas isso ainda assim não é o suficiente para considerar Aristóteles como o pai da mecânica racional, como Duhem o fez. Nomear um campo não é o mesmo dar contribuições significativas a ele. Como afirma De Gandt, a tese de Duhem parece um tanto exagerada nesse sentido⁵⁶.

Todavia mesmo não sendo Aristóteles o pai da mecânica racional, a sua relação com esse campo pode lançar muita luz sobre a compreensão que os antigos tinham dele. Em primeiro lugar, a mecânica racional faria parte de um grupo mais amplo de *ciências racionais*, aquilo que Aristóteles chamava de *ciências matemáticas*, ou o campo da *matemática mista*. Na parte II da *Física*, além de exemplificar algumas das ciências mistas como sendo a astronomia, a óptica e a harmônica, o filósofo procura esclarecer a diferença entre essas ciências e a *Física*, ou a *Filosofia Natural*. Ao contrário do que hoje seríamos tentados a supor, Aristóteles considera a astronomia, a óptica e a harmônica como “os ramos mais físicos da matemática”, e não como *os ramos mais matemáticos da Física*. Ou seja: eles são essencialmente *matemática* e não *física*. E por quê? Inicialmente porque a Física se preocupa e discute principalmente a *natureza* das coisas do mundo, por exemplo, do que são feitos os planetas, se são esféricos ou não, e assim por diante. É evidente que a astronomia antiga não estava preocupada com essas questões. Ela abstrai de todas as considerações *físicas* e considera apenas pontos, curvas e trajetórias; ela só está interessada em tentar prever a próxima posição de um determinado astro que é entendido como um mero ponto geométrico. Além disso, porque o objetivo mais fundamental da Física é a identificação das *causas* para os fenômenos da natureza, e a astronomia, exatamente por se tratar dessa simplificação racional parecida com a geometria, não pode informar nada acerca disso. A mecânica racional, portanto, assim como a astronomia, a óptica e a harmônica, é fundamentalmente *matemática*, e não *física*, para Aristóteles; seus objetos são matemáticos, não físicos; e a sua classificação é *mista*, apenas porque constrói uma matemática a partir de um modelo sugerido pela natureza, e não de um modelo totalmente arbitrário. De Gandt afirma que “essas quatro disciplinas estudam os objetos, ou os fenômenos concretos, considerando-os como objetos matemáticos: a luz ou os raios visuais como linhas geométricas, as vibrações do som como um relacionamento entre números, o movimento das estrelas como uma órbita circular”.⁵⁷

⁵⁶ De Gandt, op.cit.

⁵⁷ Ibid, p.492.

A relação de Aristóteles com a mecânica racional também lança luz numa compreensão mais precisa desse campo, em segundo lugar, porque, ao considerar a mecânica como contendo uma parte pertencente às ciências racionais como a óptica, astronomia e harmônica, ele acaba a inserindo num determinado tipo de procedimento ou abordagem racional muito mais antiga do se poderia inicialmente supor, uma vez que astronomia tem suas origens em épocas muito remotas. Nesse sentido, é notável perceber que o famoso curso de mecânica racional de Taliaferro⁵⁸ se inicia com a astronomia, e chega mesmo a defender que a mecânica racional teria sua origem em pelo menos 1000 a.C., com a astronomia babilônica. Ou seja, muito antes de Arquimedes, ou mesmo Aristóteles. Mas aqui isso nos interessa apenas para ter uma maior compreensão da mecânica racional e das suas origens. Para Newton, que lê Pappus, a mecânica racional consiste no estudo geométrico-demonstrativo dos poderes mecânicos e foi inaugurada e desenvolvida por Arquimedes e Heron. Sabemos agora, contudo, que estamos falando de uma abordagem que deriva de uma tradição ainda mais antiga, que considera os objetos concretos de maneira abstrata, racional, como objetos *matemáticos*, e que foi classificada por Aristóteles como pertencente ao domínio da *matemática mista*.

1.2 A MATEMATIZAÇÃO DA NATUREZA DOS MODERNOS

O segundo elemento contextual importante do Prefácio, expresso na sua primeira frase, é a menção que se faz ao procedimento dos modernos de “submeterem os fenômenos naturais a leis matemáticas”, ou seja, aquilo que poderíamos chamar de um projeto de matematização da natureza. Este foi um empreendimento de grande repercussão nos séculos XVI e XVII e constitui o pano de fundo mais imediato a partir do qual a obra de Newton emergiu. Como veremos nessa seção, este empreendimento estava intimamente relacionado com pelo menos três movimentos que ocorriam na modernidade: o declínio da filosofia natural escolástica, a ascensão da assim chamada filosofia mecânica e o surgimento da nova ciência do movimento de Galileu. Vejamos em mais detalhes cada um desses movimentos.

1.2.1 A Filosofia Natural Escolástica

Como se sabe, a chamada filosofia *escolástica* culminou, sobretudo, na Idade Média, por volta do Séc. X, depois do surgimento das primeiras universidades européias que

⁵⁸Taliaferro, 2014.

adotaram principalmente a filosofia aristotélica como sua filosofia oficial⁵⁹. Nesse período, a filosofia natural ficou caracterizada por uma rígida separação da matemática, de um lado, e das artes mecânicas, de outro. Aristóteles, como já vimos, havia classificado os conhecimentos da antiguidade em *ciência práticas, teóricas e produtivas*, sendo que a filosofia natural, a metafísica e a matemática pertenciam às *ciências teóricas* enquanto que as artes mecânicas pertenciam às *ciências produtivas*. Durante o período escolástico essa classificação aristotélica se tornou canônica, e várias consequências emergiram desse fato. Interessa-nos aqui apenas duas. A primeira foi o enfraquecimento da relação entre as *ciências teóricas* e *ciências produtivas*. Mais especificamente, entre as *ciências teóricas* e as *artes mecânicas*. Como foi antecipado, o enfraquecimento dessa relação levou ao surgimento da referida tensão entre as *artes liberais* e as *artes mecânicas* no período medieval.⁶⁰

As ciências teóricas aristotélicas se tornaram os conhecimentos mais ligados aos meios educacionais oficiais, mais instruídos, e terminaram por ganhar prestígio diante das artes mecânicas, que passaram a ser consideradas como um conhecimento de segunda categoria ou de menor dignidade, por assim dizer. As *artes liberais* eram as disciplinas próprias para a formação do homem livre, enquanto que as *artes mecânicas* eram praticadas por pessoas desprovidos de cultura, de virtudes, ocupados somente com as necessidades cotidianas do homem ordinário. Esse pensamento tipicamente escolástico gerou um estigma nas artes mecânicas. Elas passaram a ser desprezadas nos meios mais cultos. Tornou-se praticamente um insulto para um homem educado ser chamado de “mecânico”⁶¹. Mas vale dizer que isso não impediu que as artes mecânicas continuassem a se desenvolver durante a Idade Média, e também o universo das matemáticas mistas a elas relacionado. Com efeito, o desprezo dos filósofos escolásticos por essas artes não foi capaz de impedir o avanço e a proliferação de um conhecimento tão útil e vinculado às necessidades humanas, e para confirmar isso basta lembrar do número de matemáticas mistas associadas às artes mecânicas que havia no fim da Idade Média e início da modernidade. O conhecimento oficial, entretanto, e em especial a filosofia natural, permaneceu alheia a todo esse progresso. E um dos desdobramentos negativos dessa alienação foi o afastamento que ocorreu entre essa ciência teórica e a experiência. Uma vez que os experimentos eram trabalhos ligados, sobretudo, às *artes manuais*, eles não eram objeto de séria consideração da filosofia natural. Apenas as experiências cotidianas e experiências de pensamento eram consideradas.

⁵⁹ Grant, 2007, p.143.

⁶⁰ Rossi, 2001.

⁶¹ Ibid.

A segunda consequência que nos interessa em relação ao dogmatismo que o cânone aristotélico assumiu no período escolástico foi a rígida separação entre a matemática e a filosofia natural. No campo das ciências teóricas, Aristóteles havia dividido os conhecimentos em *Física* (ou filosofia natural), *Metafísica* e *Matemática*, sendo que havia uma ligação clara entre a *Física* e a *Metafísica*, mas nem tanto entre a *Física* e a *Matemática*. Cabe ressaltar, entretanto, que essa separação nunca foi tão nítida para os antigos, incluindo aí o próprio Aristóteles. Tanto a tradição platônica quanto a pitagórica, por exemplo, consideravam a matemática da máxima importância na investigação das coisas naturais. A conhecida *teoria das formas* de Platão ou as suas ideias sobre a constituição das coisas como sendo formas geométricas no *Timeu*, tornou não apenas possível a utilização da matemática no estudo da natureza, mas de certo modo necessário⁶². No caso dos pitagóricos a situação era ainda mais dramática: uma vez que os números seriam o princípio de tudo, o caminho mais natural para se chegar à essência de todas as coisas seria por meio da matemática. E Aristóteles demonstrava ter consciência da complexidade dessa relação. É o que podemos facilmente perceber no conhecido segundo capítulo do livro II da *Física*:

Visto que está delimitado de quantos modos se concebe a natureza, depois disso devemos examinar em que o estudioso da natureza se diferencia do estudioso da natureza (pois também os corpos naturais têm superfícies e sólidos, bem como comprimentos e pontos, a respeito dos quais o matemático faz o seu estudo). Além disso, devemos examinar se a astronomia é uma parte da ciência natural, ou se é distinta dela (...). Ora, também o matemático se ocupa desses itens, mas não enquanto cada um é limite de um corpo natural; tampouco estuda os atributos enquanto se sucedem aos corpos naturais tomados nessa qualidade; por isso o matemático os separa: pelo pensamento, tais itens são separados do movimento, e isso não faz nenhuma diferença, tampouco surge algo falso quando eles o separam. (...) Mostram isso também as mais naturais entre as disciplinas matemáticas, como a óptica, a harmonica e a astronomia: de certo modo, elas se comportam da maneira inversa à geometria, pois a geometria estuda a linha natural, mas não enquanto natural, ao passo que a óptica estuda a linha matemática, mas não enquanto linha matemática, mas enquanto linha natural.⁶³

Pela passagem acima fica claro que Aristóteles separou, de fato, a matemática e seus ramos da filosofia natural, mas não sem muitas hesitações e considerações. A própria proposta de “examinar se a astronomia é parte da ciência natural ou se é distinta dela”, indica a carência de consenso sobre o tema na época e a percepção da complexidade da questão.⁶⁴

⁶² Grant, op. cit.

⁶³ Aristóteles, 2009, Livro II, cap.2.

⁶⁴ William Charlton traduz a segunda frase da passagem na forma interrogativa: “is astronomy a branch of the study of nature, or a separate subject?”. Nessa tradução fica ainda mais evidente a percepção de Aristóteles sobre a falta de consenso e a complexidade da questão. A passagem citada na tradução acima, na tradução de Charlton, afirma: “Having distinguished the various things which are called nature, we must go on to consider how the student of mathematics differs from the student of nature—for natural bodies have planes, solids, lengths, and

Mas, de qualquer forma, o que nos importa aqui é que a despeito das hesitações do próprio Aristóteles sobre esse assunto a sua classificação dos conhecimentos fez com que a cisão entre filosofia natural e matemática se tornasse consideravelmente rígida durante a escolástica, de modo que esses dois domínios dificilmente se misturavam.

A caracterização da filosofia natural escolástica esboçada nos parágrafos anteriores nos leva a perceber que essa filosofia era marcada principalmente pela peculiaridade de que tanto a matemática quanto a experiência eram muito pouco presentes no seu domínio, e por isso eram raramente consultadas. As suas ferramentas legítimas, por conseguinte, eram a lógica e a metafísica aristotélica⁶⁵. Essas características delimitaram significativamente os tipos de entidades explicativas que poderiam ser utilizadas na explicação dos fenômenos naturais.

A filosofia natural escolástica, na sua recusa de lançar mão da experiência e da matemática, dispunha exclusivamente da metafísica e lógica para prover suas explicações dos fenômenos naturais. De modo bastante resumido, a ontologia aristotélico-escolástica atribuía aos corpos materiais qualidades não perceptíveis pelos sentidos nem tampouco acessíveis a nossa razão por isso mesmo eram chamadas de *qualidades ocultas*. Além disso, haveriam qualidades ligadas à essência desses corpos – as *formas substanciais* –, que responderiam por suas capacidades causais⁶⁶. Apenas para citar um exemplo que nos será conveniente nesse trabalho, a *gravidade*, para Aristóteles, era uma qualidade essencial aos corpos terrestres, os quais possuíam a *virtude* de tender para o seu lugar natural, que no caso seria o centro da terra⁶⁷. Por essa razão, os corpos terrestres eram adjetivados de *graves* em oposição aos *leves* (cujos exemplos seriam o ar atmosférico e fogo). Assim, se alguém perguntasse pela razão para os corpos caírem em direção ao centro da Terra, a explicação, nos moldes da filosofia escolástica, seria que esse comportamento faz parte da *essência* dos corpos terrestres, que tendem permanentemente para o seu lugar natural⁶⁸. Desse modo, gravidade seria, em primeiro lugar, uma *qualidade* de certos corpos; segundo, seria uma qualidade não acessível diretamente aos sentidos e, portanto, *oculta*; terceiro, estaria vinculada à *essência* desses

points, which are the business of the mathematician. And, again, is astronomy a branch of the study of nature, or a separate subject? (...) Both the student of nature and the mathematician deal with these things; but the mathematician does not consider the boundaries of natural bodies (...) The point is clear also from those branches of mathematics which come nearest to the study of nature, like optics, harmonics, and astronomy. They are in a way the reverse of geometry. Geometry considers natural lines, but not as natural; optics treats of mathematical lines, but considers them not as mathematical but as natural". Aristotle, 1970, Book II, part II.

⁶⁵ Grant, op. cit.

⁶⁶ Não é meu objetivo aqui apresentar um conteúdo aprofundado sobre esse tópico. Se o leitor quiser uma visão aprofundada veja, por exemplo, Hutchison, 1982.

⁶⁷ Aristóteles, *Physics*, Book IV, cap. 1; Do céu [*De caelo*], Livro IV, cap. 3; Veja também Machamer, 1978.

⁶⁸ Grant, 1996, p.60-61.

corpos; e quarto, proveria esses corpos com certas propriedades causais, uma vez que informaria a *causa* para determinados comportamentos, tal como, por exemplo, cair sempre em direção ao centro da Terra. Esse modo de explicação informou, em grande medida, a filosofia natural praticada durante a Idade Média.

No início da modernidade, contudo, essa abordagem passou a ser extensivamente criticada pelo seu caráter ininteligível e circular. A esse respeito é bastante difundida a crítica do renomado dramaturgo francês Molière na sua peça *O doente imaginário*⁶⁹, que teve lugar em plena revolução científica, em 1673, satirizando o tipo de explicação exemplificada logo acima. Quando o personagem da peça é solicitado a explicar por que o ópio faz as pessoas dormirem, ele responde afirmando que a razão decorre do fato dessa substância possuir um princípio dormitivo, uma *virtus dormitiva*, ou seja, um *poder* de fazer dormir. É desnecessário enfatizar o caráter circular dessa explicação, que afirma que o ópio faz dormir porque tem o poder de fazer dormir. Independente do exagero da caricatura construída por Molière, ela serve para ressaltar o alto grau de rejeição que a filosofia escolástica passou a enfrentar durante o período da revolução científica. No prefácio aos *Principia* de 1687, Newton marca a sua posição contra esse tipo de filosofia, quando afirma que os modernos, “rejeitando as formas substanciais e as qualidades ocultas”, se lançaram no projeto de matematização da natureza. Essa rejeição dos modernos, no entanto, se deve muito ao surgimento de uma nova concepção filosófica do mundo que desencadeou várias mudanças na forma de entender a natureza e a investigação das coisas naturais. Refiro-me à concepção que ficou comumente conhecida como a *Filosofia Mecânica*.

1.2.2 A Filosofia Mecânica

O período de transição entre a Idade Média e a Idade Moderna, também conhecido como *Renascença*, foi caracterizado principalmente como um movimento de redescoberta dos antigos. Entre os muitos conhecimentos que foram redescobertos encontra-se a “mecânica dos antigos”.⁷⁰ Os conhecimentos sobre a *mecânica* haviam sido desprezados pelos filósofos escolásticos, o que provavelmente impediu que houvessem traduções significativas das principais obras desse campo para o latim. O novo interesse pela antiguidade clássica, todavia, motivou o surgimento de traduções de várias obras, que evidenciavam o grande valor

⁶⁹ No original, *Le malade imaginaire*.

⁷⁰ Commandino, por exemplo, publicou Euclides, Arquimedes, Apolônio, Pappus. Veja Guicciardini, 2013. Veja também De Gandt, op. cit., p. 488, 492.

que os gregos atribuíam à ciência mecânica em sua relação tanto com a matemática quanto com a filosofia. Pappus, por exemplo, foi um dos vários autores traduzidos durante a Renascença. Deve haver poucas dúvidas de que essa redescoberta da mecânica dos antigos contribuiu de maneira significativa para a emergência da filosofia que se tornou dominante na modernidade, e ficou conhecida popularmente como *Filosofia Mecânica*.

O filósofo inglês Robert Boyle (1627-1691 d.C.) foi um dos precursores da filosofia mecânica na Inglaterra. Nas suas palavras, a “hipótese ou filosofia mecânica” teve origem com os antigos naturalistas fenícios, que eram “muito poderosos nas máquinas mecânicas”.⁷¹ Rene Descartes (1596-1650), considerado por muitos o maior representante da filosofia mecânica na modernidade, ao usar pela primeira vez a expressão “*mechanicae philosophia mea*” (“minha filosofia mecânica”) numa carta a Plemb em 3 de outubro de 1637, esclareceu ter se inspirado na ciência dos poderes mecânicos, enquanto que o seu interlocutor, ligado à concepção escolástica, entendeu que ele estaria rebaixando a filosofia ao estatuto de uma grosseira arte manual⁷². O fato é que a filosofia mecânica se tornou quase hegemônica no séc. XVII. Por essa razão, convém esboçar as suas características gerais que serão pertinentes nesse trabalho. Interessa-me três dessas características aqui.

A primeira característica da Filosofia Mecânica que me interessa seria aquela de conceber popularmente o universo como uma grande máquina. Como nos ensina Gabbey⁷³, embora a expressão “filosofia mecânica” pudesse ser entendida em muitos sentidos durante a revolução científica, um dos sentidos do adjetivo *mecânico* no séc. XVII era o *técnico*, que estava diretamente ligado à ciência das *máquinas simples* ou à construção de máquinas de trabalho. Nesse sentido, o universo não passaria de um complexo sistema de cordas, pesos, polias e engrenagens, no qual o princípio básico de funcionamento seria o contato entre as partes dessa máquina⁷⁴. Acredito que associado a uma tese de simplicidade da natureza, essa concepção de universo como máquina contribuiu para que o mundo e todos os fenômenos naturais pudessem ser reduzidos a três qualidades elementares: a matéria, movimento e contato. Tanto Descartes quanto Boyle defenderam essa tese. Referindo-se à diferença entre a sua concepção de filosofia mecânica e a cartesiana, Boyle afirmou que “ambas as partes

⁷¹ Boyle, 1999-2000, p. 87.

⁷² Carta de Descartes a Plemb, sobre Froidmount, 3 de outubro de 1637. Descartes, *Oeuvres de Descartes*, I, p.420-421, apud Gabbey, 2004.

⁷³ Gabbey, 2004.

⁷⁴ Heilbron, 2003 p. 503.

concordam em deduzir todos os fenômenos da natureza a partir da matéria e movimento local”⁷⁵.

A segunda característica da filosofia mecânica que me interessa é a sustentação de um padrão de inteligibilidade em oposição ao tipo de explicações praticadas na filosofia natural escolástica. Como muitos de seus contemporâneos, Descartes também deixou claro em vários dos seus escritos que concebeu a filosofia mecânica em grande parte para rejeitar as entidades explicativas comuns durante a escolástica. Numa carta muito pertinente a esse contexto, o filósofo afirma:

Nenhuma ação natural pode ser explicada por essas formas substanciais, uma vez que os seus defensores admitem que elas são ocultas, e que nem eles mesmos as entendem. Se eles dizem que alguma ação procede de uma forma substancial isso é como se dissessem que elas procedem de algo que eles não entendem, o que não explica nada.⁷⁶

Em outra passagem igualmente esclarecedora de *O Mundo*, Descartes volta afirmar a falta de inteligibilidade da forma escolástica de explicar os fenômenos e a direção da proposta mecanicista:

Se repeteis estranho que, para explicar esses fenômenos não me sirvo de qualidades que os filósofos chamam calor, frio, umidade, secura, vos digo que essas qualidades precisam, elas mesmas, de explicação, e que, se não estou enganado, não apenas essas quatro qualidades, mas também todas as formas de corpos inanimados podem ser explicadas sem que seja necessário fazer qualquer suposição sobre a matéria, senão considerar apenas o movimento, a grossura, e figura e a disposição das partes.⁷⁷

Nessa passagem particular de Descartes é interessante notar outro aspecto relativo à terceira e última característica da filosofia natural escolástica que queremos destacar, e que, com efeito, é a característica que aqui mais nos interessa: a possibilidade de submeter os fenômenos naturais ao universo da *quantidade*. Ao procurar reduzir toda a classe das qualidades escolásticas a propriedades tais como matéria, movimento e tamanho, entre outras, Descartes, assim como outros modernos, lançou mão de propriedades que não apenas podem ser percebidas pelos sentidos, não apenas são *inteligíveis*, mas que podem ser *quantificadas*. É

⁷⁵Boyle, op. cit., p. 87. Nesse parágrafo sugiro que haja uma relação entre a tese cosmológica, da matéria e movimento, e a tese metafísica, do universo como máquina. No entanto, reconheço a dificuldade em esclarecer natureza exata dessa relação. Nessa seção apenas de contextualização não há lugar para uma discussão mais aprofundada sobre isso.

⁷⁶ Carta para Regius, 31 de Janeiro de 1642. Descartes, 1991, p.208-209.

⁷⁷ Descartes, 2008, p.43. Na tradução de Gaukroger: “If you find it strange that, in explaining these elements, I do not use the qualities called ‘heat’, ‘cold’, ‘moistness’, and ‘dryness’, as the Philosophers do, I shall say that these qualities appear to me to be themselves in need of explanation. Indeed, unless I am mistaken, not only these four qualities but all others as well, including even the forms of inanimate bodies, can be explained without the need to suppose anything in their matter other than motion, size, shape, and arrangement of its parts.” (Descartes, 2004, p.18).

bem conhecido entre os comentadores o plano do filósofo francês de reduzir toda uma classe de suspeitas propriedades metafísicas escolásticas a um pequeno número de atributos empiricamente quantificáveis. A porta para o ingresso da matemática na investigação do mundo natural estava aberta. E entre aqueles que entraram por essa porta destaca-se o notável trabalho de Galileu, com a sua novíssima *Ciência do Movimento*.

1.2.3 A nova Ciência do Movimento

Embora não tenha sido o primeiro a romper com as rígidas fronteiras construídas entre a matemática e a filosofia natural no escolasticismo⁷⁸, sem dúvida o filósofo e matemático italiano Galileu Galilei (1564-1642) produziu uma das obras mais influentes nesse sentido. Ele foi talvez o mais antigo precursor de renome da nova filosofia mecânica emergente no fim do séc. XVI, provavelmente inspirado pelos trabalhos à época recém traduzidos da mecânica dos antigos e da matemática mista grega, que deixavam claro que a matemática poderia ser aplicada com sucesso à natureza. Galileu tinha grande interesse, por exemplo, pelo *Problemata Mechanicae* e pelos trabalhos de Arquimedes⁷⁹.

Com todas essas fortes referências antigas, Galileu teve as condições favoráveis para escrever a sua última obra, a saber, os *Discursos e demonstrações matemáticas em torno de duas novas ciências a respeito da mecânica e dos movimentos locais*⁸⁰, em 1638. As duas novas ciências desenvolvidas na obra eram a ciência sobre a resistência dos materiais, estabelecida na Segunda Jornada do livro, e a *Ciência do Movimento*, uma ciência matemática estabelecida na Terceira e na Quarta Jornadas. O ponto fundamental da abordagem de Galileu – e que a distingue da abordagem aristotélica do movimento – é o uso de experimentos e a geometrização rigorosa dos fenômenos dos movimentos locais, em particular, o movimento natural da queda dos graves, e o movimento violento do lançamento dos projéteis. Vale a pena citar a passagem introdutória da Terceira Jornada, na qual Galileu estabeleceu os fundamentos dessa “novíssima ciência” dos movimentos:

Meu propósito é estabelecer uma novíssima ciência que lida com um assunto muito antigo. Talvez não haja, na natureza, coisa mais antiga que o movimento, a respeito dos quais os livros escritos pelos filósofos não são poucos e nem pequenos; entretanto, descobri por meio de experimentos algumas propriedades desse assunto que não foram observadas ou demonstradas, e que valem a pena serem conhecidas. Algumas observações superficiais foram feitas; por exemplo, que o movimento

⁷⁸ Buridan, por exemplo, antecipou algumas abordagens de Galileu. Veja, por exemplo, Grant, op. cit., p.196.

⁷⁹ Guicciardini, 2013, p.230. Veja também De Gandt, op. cit., p. 488, 492.

⁸⁰ No original em italiano, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*.

natural descendente dos corpos pesados é continuamente acelerado. Mas até que ponto esta aceleração ocorre ainda não foi anunciado; porque, tanto quanto eu saiba, ninguém até o momento mostrou que as distâncias percorridas, durante iguais intervalos de tempo, por um corpo caindo a partir do repouso, estão uma para outra numa razão que obedece a regra dos números ímpares iniciando com a unidade. Já havia sido observado que os projéteis descrevem uma trajetória curva de algum tipo; entretanto, ninguém até o momento havia mostrado que essa curva é uma parábola. Mas acerca desses e outros fatos, nada pequenos em número, e não menos dignos de se conhecer, eu fui bem sucedido em prová-los. E o que considero mais importante é que se abriu um caminho para essa vasta e tão excelente ciência, a respeito da qual o meu trabalho é simplesmente o início; um caminho e um meio pelo qual outras mentes mais agudas que a minha possam explorar os seus recantos mais remotos.⁸¹

Na passagem citada, Galileu resume duas de suas grandes descobertas na investigação dos movimentos locais. A primeira, a famosa lei matemática que afirma que o espaço percorrido por um corpo caindo é proporcional ao quadrado do tempo transcorrido durante a queda. A segunda, que o movimento violento dos projéteis poderia ser expresso como uma composição de dois outros movimentos mais simples, um uniformemente acelerado, na direção vertical, e outro uniforme, em linha reta, perfazendo assim a trajetória parabólica referida na passagem. Este trabalho de Galileu consolidou aquilo que estamos a chamar aqui de projeto de “matematização da natureza” dos modernos, e lançou as bases de uma tradição de matemáticos e filósofos naturais que passariam a seguir esse mesmo modelo.

Marin Mersenne (1588-1648) continuou a investigação matemática da queda dos corpos relacionando-a com o movimento pendular. Observou que o período de um pêndulo é

⁸¹ *Discorsi* [Crow e Salvio], p.153-154. Tradução minha. Original em Inglês: “My purpose is to set forth a very new science dealing with a very ancient subject. There is, in nature, perhaps nothing older than motion, concerning which the books written by philosophers are neither few nor small; nevertheless I have discovered by experiment some properties of it which are worth knowing and which have not hitherto been either observed or demonstrated. Some superficial observations have been made, as, for instance, that the free motion [naturalem motum] of a heavy falling body is continuously accelerated; but to just what extent this acceleration occurs has not yet been announced; for so far as I know, no one has yet pointed out that the distances traversed, during equal intervals of time, by a body falling from rest, stand to one another in the same ratio as the odd numbers beginning with unity. It has been observed that missiles and projectiles describe a curved path of some sort; however no one has pointed out the fact that this path is a parábola. But this and other facts, not few in number or less worth knowing, I have succeeded in proving; and what I consider more important, there have been opened up to this vast and most excellent science, of which my work is merely the beginning, ways and means by which other minds more acute than mine will explore its remote corners”. A tradução mais recente do Drake não inclui a observação “by experiment”, acerca da qual afirma que foi um acréscimo dos tradutores. Na tradução do Drake, lemos: “We bring forward [promovemus] a brand new science concerning a very old subject. There is perhaps nothing older than MOTION, about which volumes neither few nor small have been written by philosophers; yet I find many essentials [symptomata] of it that are worth knowing which have not even been remarked, let alone demonstrated. Certain commonplaces have been noted, as for example that in natural motion, heavy falling things continually accelerate; but the proportion according to which this acceleration takes place has not yet been set forth. Ideed no one, so far as I know, has demonstrated that the spaces run through in equal times by a moveable descending from rest maintain among themselves the same rule [rationem] as do the odd numbers following upon unity. It has been observed that missiles or projectiles trace out a line somehow curved, but no one has brought out that this is a parabola. That it is, and other things neither few nor less worthy [than this] of been known, will be demonstrated by me, and (what is my opinion more wothwhile) there will be opened a gateway and a road to a large and excellent science of which this labors of ours shall be the elements, [a science] into which minds more piercing than mine shall penetrate to recesses still deeper. *Discorsi* [Blake], p.190.

independente de sua amplitude. O holandês Christiaan Huygens (1629-1695) submeteu o fenômeno do movimento pendular a leis matemáticas ainda mais precisas. Ele foi responsável pela formulação da hoje conhecida lei do pêndulo simples, ao demonstrar matematicamente que a trajetória cicloidal é a que torna o período do pêndulo independente de sua amplitude⁸². E embora não herdeiros diretos de Galileu, e trabalhando em campos distintos do filósofo de Pisa, podemos destacar os trabalhos matemáticos do inglês Robert Boyle e do alemão Johannes Kepler (1571-1630). O primeiro, mesmo tendo muitas reservas quanto ao uso da matemática na filosofia natural, submeteu, em 1663, os seus estudos sobre os gases a uma análise quantitativa, quando enunciou que a pressão absoluta e o volume de uma certa quantidade de gás confinado são inversamente proporcionais se a temperatura permanecer constante em um sistema fechado, relação que hoje é conhecida como *Lei de Boyle-Mariotte*. E o segundo, Kepler, algumas décadas antes de Galileu, submeteu o fenômeno dos movimentos planetários a leis matemáticas, quando enunciou a proporcionalidade entre uma área varrida por um planeta em relação a um centro e o tempo de varredura dessa área, e a proporcionalidade entre o quadrado do período de revolução de um planeta e o cubo da distância em relação ao mesmo centro, hoje conhecidas como segunda e terceira lei de Kepler respectivamente. Embora a astronomia fosse tradicionalmente considerada um ramo da matemática, a abordagem kepleriana possuía a particularidade de ter como objetivo introduzir um elemento causal na astronomia, contribuindo assim para diluir as fronteiras entre esta ciência matemática e a filosofia natural⁸³.

Diante desse contexto, não seria demais supor que quando no seu Prefácio Newton se refere aos “modernos”, que estariam se “esforçando por submeter os fenômenos naturais a leis matemáticas”, o que ele tem em mente são os nomes tais como o de Galileu, Huygens, Mersenne e Kepler, entre outros. Não seria demais supor que o que ele teria em mente provavelmente seria uma tradição estabelecida a partir da rejeição da filosofia natural escolástica e da emergência de uma filosofia mecânica. Uma tradição que concebeu o mundo como composto de propriedades empiricamente quantificáveis.

Newton certamente se julgava um continuador dessa tradição, e manifesta esse juízo quando lhe faz menção já na primeira frase do seu Prefácio. E nesse sentido talvez seja conveniente encerrar essa seção reforçando as últimas palavras da abertura da Terceira

⁸² Yoder, 1988.

⁸³ Em 1609 Kepler publicou *New Astronomy based upon Causes or Celestial Physics*. Veja também Harper, 2011, p.11.

Jornada do *Discorsi*, já citada logo acima, na qual Galileu anunciava num tom profético o destino daquela nova ciência do movimento recém-inaugurada:

E o que considero mais importante é que se abriu um caminho para essa vasta e tão excelente ciência, a respeito da qual o meu trabalho é simplesmente o início; um caminho e um meio pelo qual outras mentes mais agudas que a minha possam explorar os seus recantos mais remotos.⁸⁴

Acredito que não seria demais assumir que Newton tenha se considerado um legítimo herdeiro dessa tradição galilaica. E que, talvez, até mesmo não tenha deixado de se auto-considerar entre as “mentes mais agudas” que exploraram esse campo até os seus mais remotos recantos.

1.3 A GEOMETRIA MECÂNICA DE BARROW

O terceiro elemento contextual que considero importante para a compreensão do Prefácio de Newton é a geometria mecânica de Barrow. Embora não esteja expressamente citada no Prefácio, acredito que os pronunciamentos mais enigmáticos de Newton nesse texto dificilmente poderão ser compreendidos pelos leitores contemporâneos sem localizá-los no contexto específico de matematização da natureza vinculado à tradição da *geometria mecânica* desenvolvida por Isaac Barrow e seguida por Newton.

O teólogo e matemático londrino Isaac Barrow (1630-1677) foi o principal mentor intelectual de Newton na matemática durante a sua formação inicial em Cambridge.⁸⁵ Homem de vasta cultura e notável professor, Barrow esteve entre os grandes matemáticos do seu tempo, embora tenha sido ofuscado por alguns dos maiores nomes da história dessa disciplina que também foram seus contemporâneos, como Leibniz, Fermat e, é claro, seu próprio pupilo mais famoso. Mas isso em nada diminui o seu valor. Child, um dos pioneiros a investigar os trabalhos de Barrow, chegou a defendê-lo como o mais remoto inventor do cálculo diferencial, uma vez que os seus resultados na matemática teriam fundamentado tanto os desenvolvimentos posteriores de Newton quanto os de Leibniz⁸⁶. Apesar desse argumento não mais se sustentar diante da cuidadosa reconstrução histórica empreendida por Hall, Hofmann

⁸⁴ *Discorsi*, [Crow e Salvio], p.153-154.

⁸⁵ Embora Whiteside e Mahoney tenham defendido que Barrow não foi mentor de Newton, Feingold, Arthur e Guicciardini mostraram inequivocamente que eles tiveram uma relação próxima de mestre e discípulo. Veja Feingold, 1993; Arthur, 1995; Guicciardini, 2009, especialmente o cap.8.

⁸⁶ Child, 1916.

e Whiteside⁸⁷, ele serve ao menos para mostrar que Barrow não foi um matemático de pequena monta. Dois anos depois de Newton ingressar no Trinity College, o matemático londrino foi eleito professor da primeira cadeira científica criada em Cambridge, em 1663, a famosa *cátedra lucasiana de matemática*, que viria a se tornar uma das mais importantes posições acadêmicas desta universidade – posto que seria assumido por Newton alguns anos depois⁸⁸.

Barrow e Newton se conheceram provavelmente em 1664, por volta de um ano depois do primeiro ter assumido a cadeira lucasiana. Desde então tiveram uma relação próxima. O professor londrino logo reconheceu o talento do jovem estudante, tanto que o indicou para uma bolsa de pesquisa no Trinity College em 1667, e dois anos depois recomendou a John Collins um dos seus tratados recém produzidos para publicação, com o objetivo de assegurar as suas descobertas na matemática e também torná-lo mais conhecido.⁸⁹ Ainda no mesmo ano, em 1669, indicou o jovem de 27 anos para assumir a cadeira de professor lucasiano no seu lugar, e em 1671 contribuiu para a sua aceitação como membro da *Royal Society* de Londres, a principal comunidade científica da Inglaterra, e uma das principais da Europa naquela época.⁹⁰ Não restam muitas dúvidas, então, que havia uma relação próxima entre Barrow e Newton. Mas muito além de uma relação próxima houve também um frutífero intercâmbio de ideias matemáticas entre os dois.⁹¹

Quando conheceu Barrow em 1664, Newton já possuía uma bagagem considerável na álgebra e na nova análise emergente no séc. XVII⁹², mas provavelmente não tinha ainda um conhecimento profundo de geometria, especialmente dos antigos. Westfall menciona o suposto episódio do primeiro encontro entre Barrow e Newton, em 1664, quando o estudante foi examinado pelo professor lucasiano para uma bolsa acadêmica⁹³, o qual teria fornecido um parecer indiferente sobre o candidato. Uma das versões dessa história afirma que Barrow o teria examinado na geometria de Euclides, campo que Newton conhecia ainda muito pouco, ou quase nada, e não testou os seus conhecimentos na *Geometria* de Descartes, por exemplo, até porque jamais poderia imaginar que alguém pudesse estudar esse livro sem primeiro ter se

⁸⁷ A pesquisa desses historiadores revelou os independentes caminhos de descoberta de Newton e Leibniz na invenção daquilo que hoje chamamos de Cálculo diferencial e integral. Veja Hofmann, 1974. Hall, 1980, e o comentário de Whiteside no *MP*, 1 e 8.

⁸⁸ Para mais informações veja Feingold, 1990.

⁸⁹ Trata-se do tratado hoje conhecido como *De Analysi*.

⁹⁰ Veja Feingold, 1993.

⁹¹ Feingold, 1993; Arthur, 1995; Guicciardini, 2009, especialmente o cap.8.

⁹² Newton provavelmente já conhecia a *Geometria* de Descartes, e obras como a de Viète e Oughtred. Veja Guicciardini, 2009, p.3-5.

⁹³ “*Scholar of the House*”. Veja Feingold, 1993.

tornado mestre no geômetra antigo.⁹⁴ Apesar dos detalhes dessa história serem questionáveis, as suas grandes linhas – como o encontro de Newton com Barrow em 1664, e a sua deficiência, maior ou menor, em Euclides – devem guardar alguma proximidade com a realidade dos fatos. Após esse encontro, Newton provavelmente acompanhou as *lectures* de Barrow e se aprofundou na geometria mecânica do seu professor⁹⁵. O principal fruto do contato de Newton com a matemática mecânica de Barrow foi a invenção do seu celebrado *Método das Fluxões*, formulado no tratado de outubro de 1666, quando se refugiou na fazenda da sua família por ocasião da peste negra em Londres. Nesse tratado, Newton empreendeu uma significativa síntese entre os seus estudos no campo da nova análise e as concepções da matemática mecânica do seu mentor, e disso resultou os primórdios do que hoje identificamos como o cálculo diferencial e integral.⁹⁶

Conforme veremos nas próximas seções, não é possível compreender adequadamente a primeira parte do Prefácio do autor aos *Principia*, e nem mesmo os principais desenvolvimentos matemáticos dessa obra magna, sem uma noção, ao menos primária, da geometria mecânica de Isaac Barrow, que tanto influenciou as concepções do jovem Newton sobre a matemática e suas relações com a filosofia natural. É precisamente isso que pretendo fazer nessa seção. Apresentar os princípios da geometria mecânica – ou da *geometria cinemática* – que informou os trabalhos de Barrow e Newton, e a maneira peculiar como eles conceberam e praticaram, a partir dessa abordagem, a matematização da natureza entre os modernos.

1.3.1 O método cinemático no *Lectiones Geometricae*

O fundamento básico da geometria mecânica de Barrow é a concepção – ou a constatação – de que as magnitudes geométricas podem ser geradas pelo movimento⁹⁷. “Toda magnitude pode ser imaginada como produzida, ou na realidade pode ser produzida, de inúmeros modos. O método mais importante é aquele dos ‘movimentos locais’”, afirma Barrow logo no início do *Lectiones Geometricae*⁹⁸. Um ponto em movimento gera uma reta;

⁹⁴ King's College Library, Cambridge University, Keynes MS 130.10, fol. 2v, apud. Westfall, 1980, p. 102. De acordo com uma versão diferente da história, Newton realmente reprovou no exame e só conseguiu a bolsa para o ano seguinte. Whiteside, *MP*, Vol. 1, p.18.

⁹⁵ Feingold e Child não têm dúvidas de que Newton acompanhou as aulas de Barrow, e fornecem evidências para isso. Feingold, 1993; Child, 1916.

⁹⁶ Guicciardini, 2009, p.171.

⁹⁷ Tanto no *Lectiones Geometricae* quanto no *Lectiones Mathematicae* Barrow apresenta esse método.

⁹⁸ *Lectiones*, p.35.

uma reta ou uma curva em movimento gera uma superfície; e uma superfície em movimento gera um sólido. Pelo movimento podemos gerar qualquer forma geométrica. Com base nesse princípio básico se estrutura a *geometria mecânica* do professor londrino, ou, como poderia ser mais convenientemente chamada, a sua *geometria cinemática*. A expressão “movimentos locais”, no entanto, sugere algo mais que uma simples indicação de que as magnitudes podem ser geradas pelo movimento. Como alguns comentadores têm enfatizado, essa geometria cinemática carrega uma inspiração significativa na nova ciência dos *movimentos locais* de Galileu, e toma vários desenvolvimentos do filósofo italiano como seus princípios⁹⁹.

Como se sabe, na sua nova ciência dos *movimentos locais*, Galileu estudou principalmente a queda livre e o movimento dos projéteis. Desse estudo ele retirou relações matemáticas descritivas das regularidades desses movimentos. A queda livre pode ser descrita como um movimento cuja velocidade aumenta de maneira uniforme; o movimento violento dos projéteis pode ser representado pela composição de dois movimentos: um uniforme, horizontal, e outro uniformemente acelerado vertical. Galileu conseguiu determinar o movimento uniformemente acelerado da queda dos corpos a partir do estabelecimento de um parâmetro de referência para o tempo, que seria algum tipo de movimento absolutamente constante, ou pelo menos aproximadamente constante. Estabelecida essa referência, o filósofo de Pisa representa a velocidade e o tempo de um corpo caindo por meio de um diagrama geométrico no qual essas grandezas são expressas por segmentos ortogonais e assim chega na conhecida relação de que o espaço percorrido por um corpo em queda é proporcional ao quadrado do tempo de queda. Eis o famoso diagrama de Galileu para o movimento uniformemente acelerado:

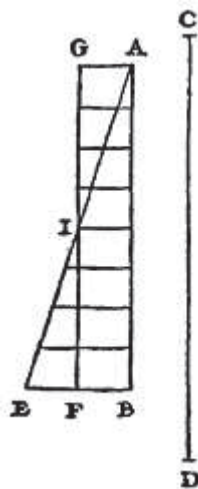


Figura 1: Representação geométrica do movimento uniformemente acelerado de Galileu. Fonte: *Discorsi* [Crow e Salvio], p.173.

⁹⁹ Mahoney, 1990, p.206.

O segmento vertical AB representa o tempo de queda de um corpo grave, enquanto que os segmentos horizontais delimitados pela diagonal AIE representam as velocidades do corpo em iguais intervalos de tempo. Pela figura pode-se perceber que o aumento da velocidade é uniforme, uma vez que todos os triângulos são semelhantes. O espaço percorrido pode ser determinado pela área do triângulo AEB , que é igual a área do paralelogramo $AGFB$.

Não é difícil perceber que Barrow tomou, nos *Lectiones Geometricae*, os princípios do movimento local estabelecidos por Galileu como os fundamentos da sua geometria cinemática. Primeiro, ele iniciou o seu discurso sobre o movimento afirmando que para discutir o movimento é necessário, antes, abordar o tempo, e então estabelece um parâmetro de mensuração dos movimentos pelo tempo, postulando-o como um movimento absolutamente constante. Em seguida, ele justifica a possibilidade de representação de propriedades e entidades contínuas tais como velocidade, espaço e principalmente o tempo por meio de magnitudes geométricas contínuas, e relaciona espaço, tempo e velocidade num diagrama semelhante ao de Galileu.

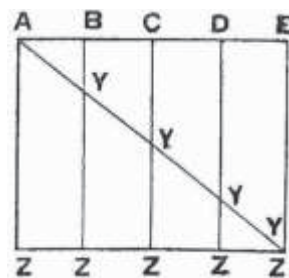


Figura 2: Representação geométrica do movimento uniformemente acelerado de Barrow. Fonte: *Lectiones*, p. 40.

No diagrama, o segmento horizontal AE representa o tempo e os segmentos verticais delimitados pelo triângulo AEY representam a velocidade de um ponto em movimento acelerado uniformemente em iguais intervalos de tempo. É fácil notar que a principal diferença entre o diagrama de Barrow e o de Galileu é a simples mudança na orientação do segmento que representa o tempo: em vez de vertical, é horizontal. E por fim, o matemático londrino estabelece três formas de geração de magnitudes por movimento, sendo que uma delas seria por “composição de movimentos”, precisamente o método já ensinado por Galileu. “As magnitudes podem ser geradas tanto pelo movimento simples, quanto pela composição de

movimentos, ou pela concorrência de movimentos”, afirma na segunda aula do *Lectiones Geometricae*.¹⁰⁰

As magnitudes geradas pelo “movimento simples” seriam a rotação ou a translação. Pela translação um ponto em movimento pode gerar uma reta, ou uma reta em movimento pode gerar uma superfície, enquanto que pela rotação de uma reta pode-se gerar um círculo ou até um sólido cônico, se mantivermos uma das extremidades fixas, como na figura 3.

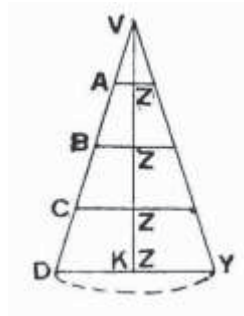


Figura 3: Um cone gerado pela rotação de uma extremidade de uma reta, mantendo a outra fixa. Fonte: *Lectiones*, p. 44.

Já nas magnitudes geradas por “composição de movimentos”, Barrow afirma que se pode gerar retas de qualquer inclinação por meio da combinação de movimentos uniformes em duas direções ortogonais; pode-se gerar parábolas, se um dos movimentos for uniformemente acelerado na proporção dos quadrados dos tempos; e pode-se gerar curvas de outros graus, se um dos movimentos for uniformemente acelerado numa proporção maior que o quadrado dos tempos. Mas ele ressalta que ainda haveria uma variedade de composições de movimentos possíveis, como aquelas que são “compostos por movimentos retilíneos e paralelos, ou por movimentos rotatórios e retilíneos, ou por vários movimentos rotatórios”. Assim, pelo movimento uniforme de um ponto numa reta, que por sua vez também estaria em movimento, pode-se gerar círculos, elipses, parábolas, hipérboles e até curvas mais complexas, como a espiral arquimediana e a quadratriz¹⁰¹. E conclui enfatizando a generalidade desse método:

Pois qualquer curva em um plano pode ser gerada pelo movimento de uma linha reta paralelamente a si mesma e o movimento de um ponto ao longo da linha; qualquer superfície, pelo movimento de um plano paralelo a si mesmo e o movimento de uma linha sobre ele (ou seja, qualquer linha numa superfície curva pode ser gerada por um movimento retilíneo); e da mesma maneira em sólidos, que são gerados pelas superfícies, podem ser feitos a depender de movimentos retilíneos (...) porque de

¹⁰⁰ *Lectiones*, p.42.

¹⁰¹ Essas eram curvas que os antigos chamavam de “mecânicas” que se diferenciavam das outras porque não possuíam uma maneira precisa de desenhá-las usando régua e compasso ou outro mecanismo traçador conhecido.

fato não há sequer um que não possa ser produzido por um movimento paralelo de uma linha reta juntamente com um ponto transportado ao longo da linha.¹⁰²

A ênfase de Barrow destina-se a sustentar que toda a geometria possa ser convenientemente construída pelo método cinemático, e em especial, diríamos nós, pelo método da *composição de movimentos* de Galileu. Mas a diferença importante é que em vez de utilizar a geometria para estudar os princípios do movimento, como fez Galileu, o matemático londrino faz o caminho inverso: utiliza os princípios do movimento para estudar a geometria. Qualquer linha plana, superfície ou sólido pode ser gerado pelo movimento. A questão principal que nos interessa, no entanto, a qual direcionamos para a próxima seção, é: qual seria a grande vantagem em desenvolver um método como esse?

1.3.2 As vantagens do método geométrico cinemático

Barrow não foi o único a desenvolver uma abordagem cinemática na geometria. Vários matemáticos no séc. XVII estavam trabalhando com a ideia de um ponto em movimento¹⁰³. O matemático francês Gilles Personne de Roberval (1602-1675), por exemplo, desenvolveu um poderoso método cinemático para encontrar tangentes de curvas, considerando uma curva como gerada por um ponto em movimento, e foi provavelmente um dos pensadores que mais influenciou a matemática do inglês Thomas Hobbes (1588-1679), que também passou a seguir uma abordagem semelhante. Por meio desses dois matemáticos, Gassendi, Mersenne e, indiretamente, até mesmo Huygens e Descartes também tiveram certo contato com o método cinemático.

Roberval parece sugerir a origem do método cinemático em Arquimedes, que já havia mostrado como seria possível obter uma espiral a partir de um ponto em movimento. Todavia, parece inegável que tanto Barrow quanto Roberval, além de possivelmente outros, receberam o maior *insite* desse tipo de abordagem a partir dos trabalhos de uma mesma pessoa: Galileu.¹⁰⁴ Newton, mais tarde, iria sugerir que a origem do método cinemático poderia ser encontrada já em Euclides, embora essa interpretação seja um pouco exagerada.¹⁰⁵ Na prática,

¹⁰² *Lectioes*, p.49.

¹⁰³ Malcom, 2002, p.165.

¹⁰⁴ As informações históricas fornecidas nesse parágrafo podem ser encontradas em Malcom, 2002, cap. 6; em Machamer, 1998; e em Feingold, 1990.

¹⁰⁵ Essa sugestão de Newton ocorreu num rascunho construído para ampliação do Prefácio do autor para a segunda edição dos *Principia*. Como se sabe, Newton abandonou esse projeto de alteração do Prefácio. Os rascunhos podem ser encontrados no *MP*, 8, p.454. O exemplo de Euclides usado por Newton é a prop.4 do Livro I dos *Elementos*.

o trabalho de Galileu realmente foi decisivo, pois sugeriu os princípios cinemáticos por meio dos quais a geometria mecânica poderia ser fundada. O interesse de Galileu, evidentemente, não era resolver problemas geométricos, mas empíricos; no entanto, a geometrização da mecânica para resolver problemas empíricos por Galileu parece ter sugerido a esses matemáticos a abordagem inversa: a mecanização da geometria para resolver problemas geométricos. Assim, esse método de abordagem da geometria sugeriu a possibilidade de resolver problemas geométricos por meio de propriedades cinemáticas. Essa é primeira vantagem que podemos perceber dessa abordagem. Mas ainda há outras que nos interessam ainda mais nessa discussão.

A abordagem da geometria cinemática permitiu aos matemáticos incluírem as chamadas *curvas mecânicas*, tais como a espiral e a quadratriz, na geometria. Como se sabe, Descartes havia excluído essas curvas da sua influente obra *La Géométrie* por não poderem receber um tratamento matemático exato. Barrow, por conseguinte, cita precisamente essas duas curvas nos *Lectiones Geometricae*, não sem razão; ele está mostrando que até mesmo essas curvas mais complexas podem receber um tratamento exato, geométrico, por meio do método cinemático, sendo por essa mesma razão uma abordagem mais abrangente que a do filósofo francês¹⁰⁶. Esse ponto nos ajuda a introduzir o que parece ser as principais vantagens da geometria cinemática para Barrow, e que terá maior importância no desenvolvimento dessa pesquisa e em especial na contribuição para o entendimento do Prefácio de Newton aos *Principia*. Para Barrow, aparentemente, essa abordagem mecânica da geometria não é meramente um método para resolver alguns problemas. É, ao mesmo tempo, uma abordagem mais simples e mais geral do que as técnicas até então já utilizadas. Child esclarece muito bem esse ponto: “todas as propriedades precedentes são deduzidas numa maneira muito simples a partir de um diagrama; e a afirmação contínua de Barrow de que esse método não apenas simplifica mas generaliza os trabalhos dos geômetras antigos é substantiada”.¹⁰⁷ A constatação de Barrow de que o método cinemático é mais simples e geral que as abordagens geométricas anteriores é bastante significativa, mas não vamos antecipar o que isso pode significar nesse momento. Antes, passemos a última e talvez maior vantagem da geometria cinemática vislumbrada por Barrow: o seu potencial de aplicabilidade na filosofia natural.

As complexas *curvas mecânicas* eram de grande importância na investigação das coisas naturais. Um tratamento geométrico preciso dessas curvas era, portanto, de um valor inestimável no estudo da natureza. Mas ainda mais importante era a constatação de que numa

¹⁰⁶ Child, 1916, p.48.

¹⁰⁷ Ibid, p.55.

geometria cinemática seria possível considerar o aspecto mais fundamental na investigação de qualquer processo do mundo natural: as *causas*. Uma geometria cinemática poderia introduzir análises de caráter causal na matemática¹⁰⁸. Não é novidade que a cientificidade da matemática e o seu estatuto frente à filosofia natural fora um assunto exaustivamente debatido desde a antiguidade. Como se sabe, a consolidação da hegemonia do cânone aristotélico durante o período escolástico acarretou uma degradação da matemática mista em relação às demais modalidades de conhecimento. A abordagem da geometria cinemática precisaria, então, fornecer novos fundamentos para revisar o estatuto problemático da matemática.

1.3.3 A matemática causal

Como nos informa Guicciardini, a cadeira lucasiana de matemática era novidade na Inglaterra e precisava ser defendida. Barrow ingressou, destarte, num projeto de produzir algumas aulas destinadas a um público mais amplo, não especializado, com o intuito de defender a importância do conhecimento matemático¹⁰⁹. Ele escolheu para esse propósito retomar a agenda estabelecida por Proclo e o debate do fim do séc. XVI sobre a certeza matemática, a sua cientificidade, e as relações com a filosofia natural, iniciado a partir do polêmico comentário do filósofo aristotélico Alexandre Piccolomini sobre o *Problemata Mechanicae*¹¹⁰. Nas palavras de Guicciardini, “o estatuto crescente da matemática recebia oposição de alguns filósofos aristotélicos como Piccolomini, que sustentavam que a matemática não possuía a pureza dedutiva da lógica silogística e não era uma ciência porque não revelava relações causais”¹¹¹.

Uma das críticas de Descartes à ciência de Galileu era exatamente esta: ela negligenciava as causas dos fenômenos investigados. Sem a consideração das causas, a pretensa ciência de Galileu não poderia ser considerada legítima investigação em filosofia natural ou, pelo menos, não uma investigação adequada. Vale a pena lembrar rapidamente a

¹⁰⁸ Veja a próxima seção.

¹⁰⁹ Guicciardini, 2009, p.3.

¹¹⁰ No séc. XVI, no pleno despertar da revolução científica, o estatuto da matemática já era bem distinto daquele estabelecido pelos filósofos escolásticos, e por isso o trabalho de Piccolomini gerou grande polêmica pela sua ortodoxia em meio as ciências mistas em franca ascensão. A literatura sobre esse debate é vasta, mas apenas para sugerir um exemplo veja Feldhay, 1998.

¹¹¹ Guicciardini, op.cit., p.4. Esse parece ser o debate dos aristotélicos, de um lado (defendendo lógica e experiência), e dos platonistas e pitagóricos, de outro, defendendo a matemática, como sugerido por Koyre. Mas Machamer mostra que a situação era bem mais complexa que isso, uma vez que haviam aristotélicos defendendo a matemática e mais de 16 tipos de platonismos diferentes no séc. XVI. Machamer, 1998a, p.55.

conhecida passagem do *Discorsi* que poderia ser considerada como uma das bases textuais para a crítica de Descartes. Afirmar Galileu:

Não me parece o momento apropriado para investigar a causa da aceleração do movimento natural a respeito da qual várias opiniões foram expressas por vários filósofos, alguns deles a explicando por meio de uma atração para o centro, outros por meio de uma repulsão entre as partes mínimas dos corpos, enquanto outros, ainda, pela atribuição de uma certa pressão no meio circundante que encerra o corpo descendente e o dirige de uma posição a outra. É claro que todas essas suposições, e outras também, devem ser examinadas; mas realmente não vale a pena [no momento]. Agora, o propósito do nosso autor é meramente investigar e demonstrar algumas das propriedades do movimento acelerado, qualquer que seja a causa dessa aceleração (...).¹¹²

Na passagem acima, Galileu, por intermédio de seu porta-voz, Salviati, é enfático em esclarecer para o aristotélico Simplicio que o seu objetivo é investigar as propriedades do movimento da queda dos corpos sem cogitar a respeito das suas causas. Descartes não deve ter digerido bem essa passagem. Numa carta em junho de 1637, o filósofo francês relata o seu primeiro contato com o *Discorsi* a Mersenne, afirmando que tudo o que ele poderia dizer sobre a abordagem galilaica da queda dos corpos é que “nem Galileu nem qualquer outro pode determinar coisa alguma sobre isso [de forma] clara e demonstrativa se não souber primeiro o que [exatamente] é o peso”.¹¹³ E pouco mais de um ano depois ele volta a escrever a Mersenne, esclarecendo ainda melhor a sua posição:

Em geral percebi que ele [Galileu] filosofa muito melhor do que a maioria, pois tanto quanto possível abandona os erros dos escolásticos e se empenha para examinar os assuntos físicos por meio do raciocínio matemático. Nisso estou completamente de acordo com ele e sustento que não outro meio de encontrar a verdade. No entanto, vejo uma séria deficiência nas suas constantes digressões e na sua falha em parar e explicar uma questão completamente (...). Sem considerar as primeiras causas da natureza, ele meramente analisou as causas de alguns efeitos particulares, e assim construiu sem qualquer fundação.¹¹⁴

Explicar sem considerar as “primeiras causas” é não explicar plenamente, é “construir sem fundação”, declara Descartes. Essa é a “séria deficiência” do trabalho de Galileu na avaliação do filósofo francês. Mas o que nos interessa é mostrar apenas que se a ciência galilaica, desenvolvida no âmbito de um discurso sobre o mundo natural, já estava sob suspeita por supostamente falhar em introduzir o elemento causal na sua abordagem, muito mais digno da mesma suspeita seria a matemática, que falava de entidades presumidamente ideais. E Barrow estava bem ciente disso. Ainda assim, contra os filósofos aristotélicos como Piccolomini, ele

¹¹² *Discorsi* [Crow e Salvio], p.166- 167.

¹¹³ Descartes, *Oeuvres*, 1, p. 392. Apud Shea, 2004. Carta para Mersenne, Junho de 1637. Tradução minha, do inglês.

¹¹⁴ Ibid. Carta para Mersenne, Outubro de 1638.

defendeu veementemente a tese contrária em suas aulas sobre a importância do conhecimento matemático. A matemática é causal.

Eles tentam provar que os raciocínios matemáticos não são científicos, causais e perfeitos, pois a ciência de uma coisa significa conhecê-la pelas suas causas (...). É evidente que as demonstrações matemáticas são eminentemente causais, a partir de onde, uma vez que apenas alcançam as suas conclusões a partir de axiomas que exibem a principal e mais universal afecção de todas as quantidades, e a partir das definições que declaram a constitutiva geração e paixões essenciais das magnitudes particulares. A partir de onde as proposições que surgem de tais princípios supostos, devem necessitar fluir a partir da íntima essência e causa das coisas.¹¹⁵

Nessa passagem podemos destacar dois aspectos importantes sobre o porquê da matemática não carecer de um elemento causal. Primeiro, porque os sistemas matemáticos axiomatizados guardam uma analogia com as relações de causa e efeito. Os axiomas funcionam como propriedades gerais. A relação entre um axioma e um teorema é semelhante a uma relação entre a causa e o efeito¹¹⁶. A segunda razão me parece mais forte. A matemática (i.e., a geometria) é causal devido a forma de “geração” das suas magnitudes. Como bem esclarece Guicciardini sobre esse trecho, “uma vez que as magnitudes geométricas são geradas pelo momento, uma relação causal pode ser capturada”¹¹⁷. Uma geometria cinemática pressupõe um elemento causal.

É possível que quando Barrow fala desse elemento causal ele tenha em vista o que apenas sugeriu sutilmente no *Lectiones Geometricae*, quando afirmou que no movimento “as principais questões a serem consideradas são o *modo do movimento* e a quantidade da *força motriz*”¹¹⁸. A “força motriz” seria a propriedade causal do movimento, enquanto que os “modos do movimento” seriam suas propriedades puramente cinemáticas, os tipos de movimentos, como uniforme, acelerado, uniformemente acelerado, e assim por diante. Como vimos há pouco, os princípios nos quais se baseou Galileu para fundamentar a sua nova ciência do movimento não foram aqueles relacionados às propriedades da “força motriz”, a causa dos movimentos, mas os modos ou tipos de movimento. Seria perfeitamente possível, entretanto, construir uma geometria mecânica a partir de princípios que não fossem puramente cinemáticos-descritivos como os de Galileu. Seria perfeitamente possível construir uma geometria mecânica a partir de princípios causais, que evidentemente teriam de ser

¹¹⁵ *Usefulness*, p. 80, 83.

¹¹⁶ *Ibid*, p.93.

¹¹⁷ Guicciardini, 2009, p.3-4.

¹¹⁸ *Lectiones*, p.35. Ênfase minha.

investigados primeiro empiricamente à maneira de Galileu, para depois serem introduzidos como os primeiros fundamentos dessa geometria¹¹⁹.

Nesse sentido, é interessante notar que Barrow dá a entender nas suas *Lectures* que as matemáticas mistas poderiam ser “inventadas” ou “cultivadas” (*excultae*)¹²⁰. Na sua segunda aula, ele discorre sobre o grande número de “ciências matemáticas” ou de *matemáticas mistas* que havia no séc. XVII e chega mesmo a afirmar que haveria tantas matemáticas mistas quanto ramos da filosofia natural, pois parecia não haver ramo da filosofia natural que não poderia ser submetido à quantidade¹²¹. E a única razão para haver um certo número fixo dessas ciências mistas na época de Aristóteles, Platão ou Pitágoras seria porque “no tempo deles outras matemáticas mistas não haviam sido inventadas ou suficientemente cultivadas”¹²². Então, dessa perspectiva, a própria ciência do movimento de Galileu poderia ser considerada, no jargão aristotélico, como mais uma matemática mista recém inventada e cultivada, cujos frutíferos resultados na matemática pura estariam sendo explorados por matemáticos tais como Barrow, Roberval, Hobbes, entre outros. Como esclarece Floris Cohen, não é o caso de Galileu estar preso ao cânone aristotélico; as fronteiras entre o campo da matemática mista – do qual Galileu emergiu – e a filosofia natural já eram um tanto indiscerníveis para o pensador italiano, porém frente aos padrões oficiais ainda vigentes na época aquela nova ciência ainda era melhor classificada como uma matemática mista¹²³.

O que Barrow estaria defendendo, por conseguinte, é que seria perfeitamente possível inventar ou “cultivar” uma *ciência mista* do movimento (para usar uma terminologia aristotélica), uma *matemática mista*, uma *geometria mecânica* como Galileu fizera, porém sem com isso se ver obrigado a deixar de lado considerações de natureza causal, tal como a *força motriz*. E para isso, como já disse, seria necessário investigar empiricamente esses princípios causais do movimento e construir uma geometria mecânica a partir desses princípios. No *Lectiones Geometricae*, Barrow chega mesmo a afirmar que esta *força motriz* poderia ser representada adequadamente por magnitudes geométricas contínuas, assim como a velocidade, o espaço e o tempo. Infelizmente, o falecimento precoce de Barrow o impediu de desenvolver esse projeto. Todavia não impediu que o seu pupilo mais ilustre o fizesse.

¹¹⁹ Como veremos na *Parte 2* desse trabalho, Wren, Huygens, Wallis e Newton fizeram essa investigação.

¹²⁰ *Usefulness*, p. 15. Veja também a edição de Whewell dessa aula, em Barrow, 1860, p.35-36.

¹²¹ *Ibid*, p.21-23

¹²² *Ibid*, p.15

¹²³ H.F.Cohen, 2004.

2 EXPOSIÇÃO DO PREFÁCIO

No primeiro capítulo foram discutidos alguns antecedentes históricos e contextuais que se relacionam com as primeiras linhas do Prefácio dos *Principia*. Esses antecedentes foram a “mecânica dos antigos”, a “matematização da natureza dos modernos”, e a “geometria cinemática de Barrow”. A partir de agora se passará à exposição propriamente do Prefácio, procurando esclarecer a mensagem principal de Newton nessas páginas. Como foi mencionado, o Prefácio é um texto dividido em dois grandes parágrafos. O primeiro parágrafo apresenta o tema da obra, seu objetivo, pertinência, fundamentos, divisões e método. O segundo parágrafo apresenta algumas observações de praxe na maioria das publicações. O que mais nos interessa aqui é o primeiro parágrafo, e por isso é o único que será considerado. Para facilitar o trabalho exegético, as 49 linhas deste parágrafo serão divididas em duas partes. A primeira parte consistirá nas 33 linhas em que Newton apresenta o tema, objetivos, pertinência e fundamentos nos quais se estrutura a obra. A segunda parte consistirá nas 19 linhas restantes, que apresentam as principais divisões do tratado e alguns breves comentários sobre o método. São as primeiras 33 linhas do parágrafo que mais atrás me referi como as linhas têm sido largamente ignoradas pelos historiadores. A segunda parte, pelo contrário, tem sido amplamente citada e comentada. Provavelmente porque aborda explicitamente o tema do método dos *Principia*, um assunto que atrai naturalmente o interesse de todos, em especial depois do sucesso dessa obra a partir da segunda metade do séc. XVIII¹²⁴.

Ao longo desse capítulo procuro mostrar que (1) não há como separar essas duas partes do primeiro parágrafo do Prefácio, como muitas vezes tem ocorrido; e (2) a primeira e obscura parte é tão importante quanto a segunda e mais conhecida para uma adequada compreensão do método. A minha estratégia de abordagem ao primeiro parágrafo do Prefácio será, inicialmente, proceder a sua exposição, intercalando comentários quando oportunos, para em seguida, no terceiro capítulo, destacar e aprofundar alguns pontos de interesse para essa pesquisa, especialmente aqueles relacionados ao método.

Quanto à exposição, cabem também algumas ressalvas. Em virtude dessas dificuldades interpretativas principalmente das 33 primeiras linhas do primeiro parágrafo, com certa frequência foi preciso alterar a posição dos períodos, introduzir premissas implícitas, mudar

¹²⁴ A segunda parte do parágrafo que tem sido amplamente citada e discutida é aquela que começa com as famosas palavras: “Porque toda a dificuldade da filosofia [natural] consiste nisso – a partir dos fenômenos dos movimentos investigar as forças da natureza, e então, a partir dessas forças, demonstrar os outros fenômenos (...)”.

ordens de argumentos ou de ideias, porém tudo isso com o único objetivo de decifrar e esclarecer o significado do texto.

2.1 OBJETIVO E PERTINÊNCIA DA OBRA

Já na primeira frase o Prefácio de Newton apresenta o objetivo do tratado e a sua pertinência. Será conveniente, agora, voltar a citar essa passagem:

Uma vez que os antigos (como nos informa *Pappus*) consideravam a ciência da *mecânica* da máxima importância na investigação das coisas naturais, e os modernos, rejeitando as formas substanciais e as qualidades ocultas, têm se esforçado em submeter os fenômenos naturais a leis matemáticas, pareceu-me conveniente nesse tratado cultivar a *matemática* na medida em que se relacione com a *filosofia [natural]*.¹²⁵

O objetivo declarado de Newton no seu tratado é “cultivar a *matemática* na medida em que se relacione com a *filosofia [natural]*”. Cultivar a matemática naquilo em que ela se relaciona com a filosofia natural, ou ainda, *ao ponto* em que ela se relacione com a filosofia natural. O verbo “cultivar” (*excolere*) aqui tem uma importância destacada, ao qual voltarei mais adiante. Preliminarmente, vamos admitir somente que o tema do tratado é a matemática em sua relação com a filosofia natural. Porque seria pertinente esse tema? Primeiramente, porque era o tipo de atividade que estava na vanguarda à época de Newton. Os “modernos”, ele afirma, “têm se esforçado em submeter os fenômenos naturais a leis matemáticas (...)”. Em outras palavras, ele está seguindo uma tradição de pesquisa já relativamente estabelecida no séc. XVII, conforme vimos no capítulo anterior. Mas em segundo lugar, esse tema é pertinente porque os “antigos” já consideravam essa relação da máxima importância: “Uma vez que os antigos (como nos informa *Pappus*) consideravam a ciência da *mecânica* da máxima importância na investigação das coisas naturais (...), pareceu-me conveniente nesse tratado cultivar a *matemática* na medida em que se relacione com a *filosofia [natural]*”. Como já sabemos, quando Newton fala em “mecânica” aqui, o que ele tem em mente é principalmente a *mecânica racional* de Arquimedes e Heron, tal como fora apresentada por Pappus no Livro 8 da *Collectio*, que é uma construção teórica pertencente ao campo das ciências matemáticas. O leitor deve se lembrar que no início do Livro 8, Pappus afirma que a “ciência da Mecânica se tornou um assunto digno de interesse dos filósofos, e um objeto digno da aspiração de todos os que se preocupam com as ciências matemáticas”. E é precisamente essa relação da ciência mecânica com a matemática que Newton vai esclarecer

¹²⁵ Prefácio (1ed).

na sequência do seu texto. Na primeira frase do Prefácio, então, Newton justifica que um tratado que explora a relação entre matemática e filosofia natural se mostra altamente relevante tanto do ponto de vista do trabalho dos modernos, quanto dos antigos. Todavia a questão que me parece mais importante não é propriamente a *relação* entre a matemática e a filosofia natural, mas *o tipo específico de relação* que Newton tem em vista aqui.

Newton afirma que o seu objetivo é cultivar a matemática na medida em que ela se relaciona com filosofia natural; ou, dito de outro modo, cultivar a matemática de forma que ela possa ser utilizada nas investigações da filosofia natural. Mas como isso seria realizado exatamente? A forma específica por meio da qual ele pretende empreender esse objetivo é apresentada somente trinta linhas depois dessa primeira frase. Ele pretende cultivar a matemática de modo que ela possa servir como “princípios” da filosofia natural: “Apresento esse trabalho como os *Princípios Matemáticos da Filosofia [Natural]*”¹²⁶. Tanto para nós atualmente quanto para os leitores contemporâneos de Newton, a grande questão que essa proposta suscita é *como e por que* é possível cultivar a matemática de modo que dela se possa se tornar genuínos “princípios” da filosofia natural. Todas as 30 linhas intermediárias dispostas entre o tema geral e a sua delimitação prestam-se para justificar essa possibilidade. E Newton se esforça por fazê-lo (embora num número mínimo de linhas) por saber que isso não era trivial para o seu leitor.

À época de Newton a matemática era considerada um domínio que lidava com entidades idealizadas como pontos e linhas, incompatível, por conseguinte, com a filosofia natural que discorria sobre corpos materiais com formas, dimensões e essências. Num cenário ainda amplamente ligado ao aristotelismo, já era bastante ousado e subversivo os modernos misturarem a matemática e a filosofia natural, ou supor que a matemática poderia contribuir de algum modo para aquele campo. Muito mais ousado, entretanto – e talvez até certo ponto impensável – seria sugerir que a matemática poderia prover “princípios” nos quais a filosofia natural deveria fundamentar as suas investigações, um papel que até então estava reservado inquestionavelmente à metafísica, e somente a ela.¹²⁷ Mas era precisamente isso o que Newton estava propondo, e por isso nada mais natural do que o seu esforço para permitir que o seu leitor ao menos vislumbasse *como e por que* isso seria possível.

As econômicas palavras que Newton usou para justificar a sua proposta talvez revele o que ele já havia expresso quase duas décadas antes nas suas *Lectiones Opticae*, quando sugeriu que a maneira mais adequada de mostrar como um projeto como esse seria possível

¹²⁶ Grifo meu.

¹²⁷ Natuatalmente, esse ponto não seria impensável para uma filosofia pitagórica.

não era por meio de palavras, mas do exemplo¹²⁸. Provavelmente ele tinha isso em vista quando escreveu o seu econômico Prefácio aos *Principia*. Ainda assim, e talvez principalmente por essa razão, será proveitoso adentrar nas poucas palavras que ele dedica a esse propósito do seu tratado.

Para ao menos esboçar uma justificativa para o problema de *como e por que* é possível cultivar a matemática de modo que ela possa servir como “princípios” para a filosofia natural, Newton precisaria responder inicialmente duas questões. Primeiro, de que “filosofia natural” ele está falando. Segundo: como é possível “cultivar” uma matemática, de modo que possa ser adequada aos objetivos dessa filosofia natural. Nas próximas seções serão exploradas essas questões em mais detalhes, juntamente com as respostas que Newton oferece a cada uma delas.

2.2 O OBJETIVO DA FILOSOFIA NATURAL DE NEWTON

Para entender como é possível cultivar a matemática de modo que ela possa servir como princípios da filosofia natural é necessário, antes, considerar de que filosofia natural Newton está falando. Durante a revolução científica havia uma pluralidade de posições sobre quase tudo, e não era diferente em relação à filosofia natural. Mesmo correndo o risco de ser excessivamente hiperbólico, poderíamos imaginar tantas filosofias naturais quantos filósofos e matemáticos haviam investigando a natureza. Todavia, não nos é difícil identificar a concepção básica de filosofia natural que Newton está seguindo na redação do Prefácio. Logo após delimitar o objetivo específico do seu tratado como sendo oferecer “os princípios matemáticos da filosofia natural”, Newton complementa essa sentença dizendo: “Porque toda a dificuldade da filosofia [natural] consiste nisso – a partir dos fenômenos dos movimentos investigar as forças da natureza (...)”. Nessa afirmação, o que Newton define como a “dificuldade da filosofia natural” parece ser também o seu objetivo: investigar as forças da natureza a partir dos fenômenos dos movimentos. Em outras palavras, a filosofia natural de que Newton está falando no Prefácio é aquela cujo objetivo seria precisamente descobrir *forças a partir de movimentos*.

Aqui Newton não parece estar propondo nada muito novo. Uma filosofia natural com o objetivo de buscar as “causas” a partir dos “efeitos” era a concepção usual da filosofia

¹²⁸ *Lectioes Opticae*, 1670-1672. “Thus although colors may belong to physics, the science of them must nevertheless be considered mathematical, insofar as they are treated by mathematical reasoning. Indeed, since an exact science of them seems to be one of the most difficult that philosophy is in need of, I hope to show — as it were, by example — how valuable is mathematics in natural philosophy”. Newton, 1984, p. 87, 89, e p.437, 439.

natural escolástica, e praticamente o senso comum no contexto filosófico da época. O conhecido filósofo inglês Thomas Hobbes (1588-1679), por exemplo, já havia defendido numa frase muito semelhante, afirmando que o objetivo da filosofia natural era buscar as causas desconhecidas a partir dos efeitos conhecidos: “A filosofia [natural] é o conhecimento dos efeitos ou aparências, tal como os adquirimos por meio de verdadeiras inferências a partir do conhecimento que temos primeiro das suas causas ou gerações: e, novamente, das causas e gerações, tais como podem ser, conhecendo primeiro os seus efeitos”.¹²⁹ Com efeito, desde Aristóteles um dos objetivos fundamentais da filosofia natural era investigar as *causas* dos fenômenos naturais. E acredito que nem mesmo o estagirita discordaria de que os “efeitos” ou as “aparências” deveriam ser consideradas nessa investigação. Os termos “causas” e “efeitos”, todavia, não são aqueles que Newton usa especificamente. Ele fala em “forças” e “movimentos”, como ficou claro pelo trecho citado acima. Mas isso também não me parece inusitado, tendo em vista a concepção de natureza corrente na época.

Como se sabe, a concepção de natureza do séc. XVII era a filosofia mecanicista; a natureza era concebida como um gigantesco dispositivo mecânico que poderia ser reduzida à matéria, movimento e o contato entre as partes. E uma vez que nada além do “movimento” poderia ser considerado como os “efeitos” ou as “aparências” dos fenômenos, igualmente as “forças” produzidas pelo contato entre as partes da máquina poderiam ser associadas, naturalmente, com as “causas” destes fenômenos. Assim, tendo isso em vista, não me parece surpreendente para esse período, entendendo a natureza sob uma concepção mecanicista, defender que o objetivo da filosofia natural seria o de investigar as forças a partir dos movimentos. A questão que realmente me parece importante não é que seja esse o objetivo da filosofia natural, mas sim precisamente o *como* fazer isso, *como* descobrir as forças a partir dos movimentos. Isso é substanciado pelo termo “dificuldade”, que Newton usa ao qualificar o objetivo da filosofia natural. Como, afinal, podemos descobrir as causas a partir dos efeitos, ou as forças a partir dos movimentos? Eis a questão mais importante.

A resposta de Newton, nós já sabemos: pela matemática. Por meio da matemática é possível partir dos movimentos e chegar às forças. A perplexidade, no entanto, não se desfaz. Como a matemática poderia ser cultivada para esse fim? O ponto principal e o grande desafio de Newton no Prefácio é ao menos dar algumas pistas dessa questão. E para compreendermos esse passo voltaremos agora às 30 difíceis linhas que saltamos do Prefácio. Elas tratam da natureza da matemática, ou melhor, da geometria. Para fornecer pistas para responder a essa

¹²⁹Hobbes, 1994, p. 3. Veja também Guicciardini, 2009, p.325.

questão, Newton precisa falar do que é a própria geometria, e mostrar que ela nasce, na verdade, da mecânica.

2.3 A ORIGEM MECÂNICA DA GEOMETRIA

Como e por que é possível cultivar a matemática de modo que ela permita encontrar as forças da natureza a partir dos movimentos? Vamos, primeiro, ao porquê. A resposta de Newton seria simples e direta: é possível porque a geometria, com efeito, nasce da mecânica. Talvez essa seja a declaração mais contundente e central do Prefácio, e a tese na qual se sustenta toda a sua obra. Ele a repete duas vezes no curto espaço do primeiro parágrafo, e a maior parte do seu esforço é especificamente para tentar justificá-la, ou ao menos esboçar uma justificativa. Ele introduz a tese pela primeira vez quando afirma que “a descrição de círculos e linhas retas, na qual a *geometria* está fundada, pertence à *mecânica*”, e algumas linhas adiante, depois de justificar e exemplificar essa tese, ele conclui com um tom solene: “Portanto, a *geometria* está fundada na prática mecânica e nada mais é do que a parte da *mecânica universal* que propõe a arte da medição de maneira exata e demonstrativa”.

Certamente o leitor pode perceber uma influência da geometria mecânica de Barrow aqui. Mas é preciso enfatizar que mesmo o antigo tutor de Newton não havia avançado tanto. Como vimos anteriormente, o primeiro dos professores lucasianos fora um seguidor do método cinemático da geometria e havia defendido que esse método era mais simples e ao mesmo tempo mais geral que os demais. Mas não havia nos fornecido uma razão muito clara para esse fato. Newton o fez. *O método mecânico da geometria é mais simples e geral que os demais puramente porque não é um mero método; a própria geometria nasce da mecânica; “está fundada na prática mecânica”.* Sem dúvida, caso Barrow ainda estivesse vivo, não necessitaria de maiores explicações para compreender essa afirmação de Newton; mas esse não devia ser o caso da maior parte dos seus leitores à época – e muito menos ser o caso dos leitores de hoje. Como é possível que a geometria esteja fundada na mecânica? No Prefácio, Newton esboça uma justificativa que, na verdade, mais parece algumas pistas deixadas como migalhas pelo chão. Eis a passagem completa:

A geometria não nos ensina como traçar essas linhas; apenas assume que saibamos traçá-las. Ela exige que o iniciante tenha aprendido a descrever as linhas e círculos de maneira exata antes que ingresse em suas fronteiras; e somente depois disso ensina como problemas podem ser resolvidos por meio dessas operações. O problema de descrever retas e círculos não é um problema da geometria. A solução desse problema é requerido da mecânica; a geometria apenas ensina a usar essa solução. E a glória da geometria é que partindo de tão poucos princípios, advindos de outra parte, se possa produzir tantas coisas. Portanto, a geometria está fundada na

prática mecânica e nada mais é do que a parte da *mecânica universal* que propõe a arte da medição de maneira exata e demonstrativa.¹³⁰

A partir das poucas pistas deixadas por essa passagem ofereço uma reconstrução da argumentação de Newton, acrescentado algumas ideias implícitas no texto e preenchendo algumas lacunas. A seguir, expresso essas ideias em proposições isoladas para tornar mais claro o raciocínio.

- a) A geometria é desenvolvida a partir de figuras desenhadas de modo exato e retira consequências e propriedades a partir dessas figuras.
- b) Para praticar a geometria, é necessário, antes, aprender a desenhar as figuras de modo exato.
- c) Para desenhar as figuras de modo exato é preciso manipular certos dispositivos mecânicos desenvolvidos para esse fim.
- d) Um dispositivo mecânico é um aparato que opera segundo certas leis fixas e determinadas pelo operador (como um compasso, por exemplo, para gerar um círculo).
- e) As figuras desenhadas pelos dispositivos mecânicos são construídas por meio do *movimento* dos dispositivos.
- f) Então, o problema de construir figuras de modo exato depende do *movimento* de certos objetos mecânicos obedecendo a certas leis definidas pelos dispositivos.
- g) De maneira mais geral, podemos abstrair do dispositivo mecânico e dizer que uma figura desenhada de modo exato é gerada somente pelo *movimento* realizado de acordo com uma *lei determinada* (quer esteja associado ou não a um dispositivo mecânico).
- h) As regras e propriedades usadas para resolver os problemas geométricos derivam das leis presentes e vinculadas à construção exata das figuras.
- i) Ora, a invenção e a construção de dispositivos mecânicos para desenhar figuras de modo exato, bem como o manuseio desses dispositivos não são problemas do campo da geometria, mas problemas da mecânica¹³¹.
- j) Mesmo abstraindo dos dispositivos mecânicos e considerando somente o movimento obedecendo uma lei determinada, o próprio movimento também pertencem ao campo da mecânica.

¹³⁰ *Prefácio (1ed).*

¹³¹ Como vimos na seção 1.1, a mecânica no sentido mais primitivo pode ser concebida com arte de inventar, construir e manipular esses dispositivos mecânicos.

k) Portanto, a geometria nasce da prática mecânica, e dela depende.

Se a argumentação de Newton não havia deixado claro a origem mecânica da geometria, acredito que as proposições acima o tenham deixado. Todas as propriedades geométricas, com efeito, derivam do fato de que há uma lei inerente à construção exata de cada uma das figuras, sejam essas leis vinculadas a dispositivos traçadores ou abstraída deles. No entanto, em qualquer situação são construções sempre mecânicas. A geometria está “fundada na prática mecânica”. O fato da origem da geometria ser mecânica tem inúmeras consequências de peso que precisamos considerar. A principal delas é que é possível cultivar a geometria a partir de diferentes abordagens e até a partir de diferentes princípios.

2.4 CONSEQUÊNCIAS DA ORIGEM MECÂNICA DA GEOMETRIA

Antes de continuar seguindo o roteiro de Newton no Prefácio, é preciso abrir um parêntese aqui. Newton realiza uma das elipses a que me referi mais atrás, na qual ele salta de um ponto a outro sem nos dar o tempo suficiente para refletir sobre as implicações do que ele está afirmando. Para compreendermos mais adequadamente aquilo que ele está propondo precisamos introduzir uma transição mais suave ao seu raciocínio, refletindo sobre algumas consequências da geometria estar fundada na prática mecânica.

Uma vez que a geometria tem a sua origem na prática mecânica, ou seja, uma vez que toda e qualquer figura geométrica é gerada pelo movimento em vinculação a uma lei determinada, torna-se possível conceber e construir a geometria a partir de diferentes abordagens, e até de diferentes princípios. A geometria pode ser concebida e construída a partir de dispositivos mecânicos que operam segundo determinadas leis a eles inerentes, e que por isso geram figuras exatas, e pode ser concebida também até mesmo na ausência desses dispositivos, considerando somente os mecanismos traçadores relacionados aos movimentos e uma lei determinada a eles associada. Os tipos de dispositivos podem variar, e da mesma forma os mecanismos traçadores pelo puro movimento, alterando, por exemplo, as leis associadas a esses movimentos. A geometria cinemática de Barrow é um exemplo dessa última forma de geração. Ela não foi construída a partir de leis inerentes a dispositivos traçadores, mas a partir de movimentos e certas leis previamente determinadas associadas a esses movimentos¹³². É possível construir de modo exato uma parábola por meio da composição de dois movimentos e uma lei determinada associada a eles, a saber, um

¹³² Conforme seção 1.3.

movimento uniforme e outro uniformemente acelerado. É fácil perceber que é precisamente isso que torna possível a mecânica racional dos antigos e a ciência dos movimentos de Galileu. Essa última ciência mista, por exemplo, não é uma aplicação da geometria à mecânica. Não se trata disso. O filósofo italiano só pôde fazer o que fez, e com o sucesso que obteve, porque a geometria tem a sua origem na mecânica. Foi por essa razão que ele pôde recuperar as figuras estudadas, sobretudo, na geometria, e aplicar raciocínios geométricos, a partir dos movimentos que ele observava na natureza associados a determinadas leis. Ele pôde fazer isso porque na verdade não há diferença essencial entre esses dois campos. A mecânica e a geometria, com efeito, se sobrepõem, mesmo que o próprio Galileu não tivesse plenamente consciência disso. E o mesmo se aplica a mecânica racional dos antigos.

Tendo introduzido o parágrafo anterior como uma transição para o raciocínio subsequente de Newton, seria útil comentá-lo destacando a principal consequência que nos interessa nesse momento. Pelo fato da geometria ter a sua origem na mecânica, é possível cultivar a geometria a partir de *diferentes princípios*. Essa consequência é importante porque permite a Newton concluir – como Barrow já havia antecipado – que seria perfeitamente possível desenvolver uma geometria não apenas a partir de princípios cinemáticos do movimento (como Barrow fez a partir dos princípios de Galileu), mas também a partir de princípios *dinâmicos*, causais, que envolvessem convenientemente *forças e movimentos* – contanto que para isso se definissem as *leis fixas* relacionadas a essas forças e movimentos que tornassem possível a construção das figuras de maneira exata. E ainda mais importante que isso: a definição dessas leis fixas relacionadas aos movimentos e forças permitiria a Newton concluir que a seleção dessas leis poderia ser realizada não arbitrariamente, mas a partir de uma escolha conveniente de parâmetros em uma *analogia com a natureza*. Repito. As leis fixas que determinariam a relação entre forças e movimentos poderiam ser selecionadas convenientemente em analogia com a natureza, bastando para isso que se realizasse uma minuciosa investigação empírica acerca das leis causais que relacionariam os movimentos e forças na natureza. Por meio dessa investigação empírica dos movimentos e das forças geradoras, seria possível retirar leis matemáticas precisas, tomá-las como axiomas, e construir a partir deles uma geometria mecânica causal em analogia com a natureza, de uma maneira muito semelhante a que Barrow havia feito com os princípios cinemáticos de Galileu. Como veremos na continuidade desse trabalho, foi precisamente isso que Newton fez¹³³.

¹³³ Veja o capítulo 6.

Essas reflexões sobre as consequências da origem mecânica da geometria nos levam a iniciar uma resposta à questão que fizemos anteriormente. A questão de *como* é possível “cultivar” uma matemática que se adeque à investigação na filosofia natural, ou que nos ajudaria a investigar as forças da natureza a partir dos movimentos. Feitas essas reflexões de transição, agora estamos em condições de prosseguir com as considerações de Newton no Prefácio, especialmente aquelas relacionadas à mecânica racional.

2.5 A MECÂNICA RACIONAL DE NEWTON

Newton sabia que os antigos já haviam realizado uma abordagem semelhante a que projetara nos *Principia* por meio da ciência mista conhecida como *mecânica racional*. O objetivo dessa matemática mista poderia ser resumido na questão sugerida no pseudo-aristotelico *Problemata Mechanicae*: “como mover um determinado peso como uma determinada força”¹³⁴. Os antigos cultivaram essa matemática a partir de princípios de força análogos às leis dos poderes mecânicos, ou das máquinas simples, que há muito já eram estudadas. Embora o que Newton estivesse propondo fosse muito mais ambicioso do que o que fora feito pelos antigos – pois não lhe interessava a explicação dos poderes mecânicos, mas da máquina da natureza – e embora, como já disse, para construir a sua geometria mecânica dinâmica ele precisasse nada menos que descobrir as leis que levariam o seu nome, ainda assim decidiu batizar essa abordagem de *mecânica racional*. E isso aparentemente por três razões. Em primeiro lugar, por uma razão pragmática. O entendimento popular do termo *mecânica* estava atrelado ao movimento dos corpos enquanto que a geometria, à magnitude. Ele afirma: “mas uma vez que as artes manuais são aplicadas principalmente para movimentar corpos, ocorre que a *geometria* comumente é utilizada em referência à magnitude, enquanto que a *mecânica*, em referência ao movimento”. É provável que Newton não quisesse introduzir ainda mais problemas semânticos do que aqueles que já haviam.

Em segundo lugar, tanto a abordagem dos antigos quanto a sua geometria causal tinham em comum o fato de estarem relacionados com *forças*, sendo esse ponto um dos aspectos mais essenciais da sua proposta, embora possuindo objetivos distintos daqueles dos antigos. Como ele declara no Prefácio, a mecânica racional foi cultivada pelos antigos “em relação aos *cinco poderes* que se vinculam às artes manuais (...)”, mas a “minha preocupação aqui não é com as artes, mas com a filosofia; e escrevo não concernente a poderes manuais,

¹³⁴ Da introdução do *Problemata Mechanicae*. Veja, Aristotle, 1955a.

mas a poderes naturais, concentrando-me principalmente em aspectos relacionados à gravidade, levidade, força elástica, resistência dos fluidos, e forças semelhantes a essas, quer atrativas, quer impulsivas”. Embora aplicada a campos diferentes, Newton parece considerar que a sua abordagem e a dos antigos são essencialmente do mesmo tipo, uma vez que ambas se preocupam sobretudo com *forças*.

A razão, todavia, que eu acredito ser a mais importante para levar Newton a decidir chamar sua geometria dinâmica de “mecânica racional” é o fato dela englobar os resultados da mecânica racional dos antigos. Como veremos mais adiante no *Escólio das Leis do Movimento*¹³⁵, Newton mostrou que as leis que extraiu das suas investigações empíricas do movimento explicam os poderes mecânicos por meio de princípios mais elementares do que aqueles utilizados pelos antigos, como, por exemplo, a lei da alavanca¹³⁶. A razão mais importante para Newton chamar a sua abordagem de mecânica racional me parece ser o fato dela unificar, sob um único modelo causal relacionado com *forças*, os princípios tanto dos poderes mecânicos quanto dos poderes naturais. Newton se sente, assim, autorizado a redefinir o campo da mecânica racional. Esse campo não mais seria a ciência mista dos poderes mecânicos. Como ele afirma numa das passagens mais significativas do Prefácio, a mecânica racional, “nesse sentido”, ou seja, no sentido em que ele a está inaugurando, “será a ciência dos movimentos a partir de forças, quaisquer que sejam; e das forças que são requeridas para produzir quaisquer movimentos, proposta de maneira exata e demonstrativa”. De maneira mais ampla, Newton defende que a mecânica racional é uma ciência exata e demonstrativa – ou seja, uma matemática mista ou uma geometria mecânica – dos movimentos a partir das forças, quaisquer que sejam essas forças; sejam elas relacionadas às máquinas mecânicas ou aos poderes causais da natureza.

É interessante lembrar nesse momento que, não obstante a mecânica racional ser bem mais antiga que o matemático britânico, foi em virtude dessa redefinição empreendida por ele que esse campo frequentemente se encontra associado ao seu nome, e não poucas vezes o intitula como seu fundador. E não sem certa razão, pois Newton expandiu significativamente as fronteiras desse domínio e lhe deu uma nova roupagem¹³⁷. Uma nova mecânica racional que seria amplamente estudada no séc. XVIII surgiu com o nascimento dos *Principia*: a *Scientia Motuum qui ex viribus*¹³⁸ – “Ciência dos Movimentos a partir de forças”, para fazer uma comparação com a nova *Scientia Motuum* de Galileu. Então, a *mecânica racional* é o

¹³⁵ Seção 5.2.

¹³⁶ Os poderes mecânicos são importantes elementos de confirmação das leis do movimento para Newton.

¹³⁷ Veja Truesdell, 1968, cap. II.

¹³⁸ Do Prefácio do autor original em Latim.

nome escolhido por Newton para designar a sua geometria mecânica de forças cultivada especialmente para a investigação em filosofia natural.

2.6 A EXATIDÃO GEOMETRICA DA NATUREZA

A essa altura já deve estar claro para o leitor as respostas aos questionamentos que foram feitos anteriormente sobre como seria possível *cultivar* a matemática de modo que ela se adequasse à investigação em filosofia natural, ou, mais especificamente, como seria possível cultivar a matemática de modo que pudesse proporcionar os “princípios” da filosofia natural. Há ainda, no entanto, uma questão importante pendente sobre a exatidão dessa abordagem proposta por Newton. Duas questões poderiam ser formuladas. Primeiro: e se os princípios mecânicos colhidos por meio das investigações empíricas – as leis do movimento – estiverem errados? Na verdade, os princípios extraídos das nossas investigações empíricas estão muito longe de serem exatos, alguém poderia objetar. E a segunda pergunta: que garantia temos de que a própria *natureza* é exata? Não sendo a natureza exata todo esse projeto viria abaixo, uma vez que é problemático aplicar uma ciência exata a um domínio que não o é. Acredito que Newton se interessa principalmente em dar uma resposta à essa segunda questão no Prefácio. Ainda assim, esboçarei uma resposta também para a primeira, embora uma compreensão mais plena dela dependa do leitor acompanhar essa trabalho até o fim.

Os princípios mecânicos que foram tomados como base da mecânica racional não podem estar errados? Podem. Mas esse não parece ser o ponto principal para Newton. O ponto principal parece ser o seguinte: *caso sejam aceitos*, todo o resto deve se seguir necessariamente. A questão não é que se está defendendo que esses princípios sejam absolutamente corretos, mas que se alguém os aceita, não pode negar as suas consequências. Como se verá mais adiante, Newton tomou o cuidado de colher princípios que foram, segundo ele, muito bem confirmados por experimentos, e, principalmente, amplamente consensuais entre os estudiosos. Ora, se os filósofos aceitarem os princípios mecânicos que ele está propondo, não podem defender uma hipótese explicativa que frontalmente contrarie esses mesmos princípios ou os teoremas deles decorrentes.

Agora sobre a segunda questão. A *natureza* pode não ser exata como a matemática. E se esse for o caso, ela não tem qualquer necessidade de se ajustar a essa ciência. Acredito que a única parte que não foi comentada do Prefácio até aqui tem o objetivo específico de responder essa questão. E evidentemente é uma questão que caso não seja respondida poderia deixar todo o trabalho de Newton sob suspeição. Apesar de ser uma passagem que geralmente

não chama muito a atenção, acredito que tem um papel fundamental, e não foi inserida no Prefácio por acaso. Trata-se do breve comentário sobre o *Mechanicus ominium perfectissimus*, ou “o mais perfeito dos mecânicos”. Vejamos a passagem:

Mas uma vez que os artífices não trabalham com grande exatidão, ocorreu que todo o conteúdo da mecânica foi distinguido da geometria pela atribuição de exatidão à geometria e de qualquer coisa menor que exatidão à mecânica. No entanto, os erros não estão na arte, mas nos artífices. Se um mecânico trabalha com pequena exatidão é um mecânico imperfeito; e se outro trabalhasse com perfeita exatidão seria o mais perfeito dos mecânicos.¹³⁹

Nessa passagem Newton está esclarecendo porque a geometria terminou por se distinguir definitivamente da mecânica. Em um determinado momento da história se passou a utilizar um critério de exatidão para classificar os dois campos. A geometria é um conhecimento exato; a mecânica, não. Entenda-se “mecânica” aqui como as *artes manuais*, a ciência da construção de dispositivos e máquinas. Segundo Newton, a simples observação de que os conhecimentos da geometria eram exatos e aqueles da mecânica inexatos nos levaram erroneamente a atribuir essa diferença à natureza desses conhecimentos. Ou seja, a exatidão pertenceria à natureza do conhecimento geométrico, enquanto que a inexatidão, à natureza do conhecimento mecânico. Esses dois campos seriam compostos por conhecimentos essencialmente diferentes. Mas esse entendimento seria um grande erro. A inexatidão “não está na arte, mas nos artífices”, declara Newton. O fato de não haverem dispositivos e máquinas construídas de maneira tão perfeita e exata quanto as construções geométricas revela apenas e tão somente a nossa limitação humana, a nossa falta de capacidade para trabalhar com perfeita exatidão também num campo mais complexo, tal como o das construções materiais. Mas o ponto é que, se houvesse um “mecânico perfeito”, um *Mechanicus ominium perfectissimus*, certamente para ele não estaria sujeito a essa limitação.

Alguns comentadores têm defendido que o objetivo dessa passagem do Prefácio seria combater a posição corrente lançada pela *Geometria* de Descartes acerca da inexatidão das *curvas mecânicas* (como várias usadas por Newton nos *Principia*), o que levaria à consequência delas não poderem ser adequadamente submetidas ao tratamento geométrico¹⁴⁰. Seria, então, uma resposta à geometria cartesiana. Outros vão além, defendendo que com essa

¹³⁹ *Prefácio (1ed)*. Original: “Cum autem Artifices parum accurate operari soleant, fit ut *Mechanica* omnis a *Geometria* ita distinguatur, ut quicquid accuratum sit ad *Geometriam* referatur, quicquid minus accuratum ad *Mechanicam*. Attamen errores non sunt Artis sed Artificum. Qui minus accurate operatur, imperfectior est *Mechanicus*, & si quis accuratissime operari posset, hic foret *Mechanicus omnium perfectissimus*”. Sublinhado meu e grifos do Newton.

¹⁴⁰ Donski identifica a *Geometria* de Descartes como um dos prováveis alvos do Prefácio de Newton. Donski, 2003. Veja também Guicciardini, 2009, p.294, 299 e 308.

passagem ele pretendia salvaguardar a certeza dos seus métodos geométricos visando, sobretudo, a sua aplicação à filosofia natural¹⁴¹. Mas acredito que o objetivo principal de Newton com essa passagem vai um pouco além desses, embora não exclua uma possível agenda também nos referidos sentidos. O ponto que me parece essencial aqui é que, se a *natureza* não for exata, em vão Newton se lançaria no propósito de construir os princípios matemáticos da filosofia natural. Em vão ele procuraria formular um programa para introduzir a certeza matemática na filosofia natural. Não se trata, então, de uma questão puramente metodológica. De nada adiantaria construir uma matemática análoga a natureza, supondo que esta possuía leis exatas, quando na verdade não possui. Então o ponto que me parece o essencial aqui é o seguinte: o que garante a Newton que a *natureza* possua tal exatidão? Precisamente o fato dela ser obra de um *Mechanicus ominium perfectissimus*.

A natureza nada mais é que um dispositivo mecânico exato, construído de maneira perfeita, porque foi construída pelo “mais perfeito dos mecânicos”. Embora Newton seja reticente e nebuloso sobre esse assunto no Prefácio, deve haver pouquíssimas dúvidas de que para ele há um *Mechanicus ominium perfectissimus* no universo, e este é o próprio Deus. E afirmo isso não supondo que ele tenha se inspirado em Copérnico, que sugeriu no prefácio da sua obra mais famosa que Deus seria o “maior de todos os artífices”¹⁴², mas porque o próprio Newton praticamente o afirmou textualmente poucos anos depois num longo tratado de geometria geralmente chamado de *Geometriae Libri Duo*, escrito na década de 1690. No tratado, Newton retoma o tema do seu Prefácio aos *Principia*, cita literalmente algumas de suas passagens sobre a origem mecânica da geometria, e dá a entender que “Deus, a Natureza ou qualquer técnico” são artífices que podem construir objetos¹⁴³. É claro, o termo “Natureza”, aqui, parece ser utilizado como um nome alternativo para Deus. Ora, isso me leva a crer que na passagem do Prefácio citada acima, Newton está defendendo que, pelo menos para Deus, não existe diferença de exatidão entre as construções mecânicas e as geométricas. Deus não conhece limitação, então, entre o gigantesco dispositivo mecânico da natureza, que é a obra de Deus, e a geometria, há o mesmo nível de exatidão. E podemos defender esse fato a despeito das nossas construções mecânicas estarem longe de uma exatidão. Esse me parece o ponto fundamental da passagem que foi citada acima. A natureza é uma construção exata, e

¹⁴¹ Guicciardini é um deles. Guicciardini, 2009, p.308.

¹⁴²No *Praefatio Authoris* de Copérnico, no *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (1543), p. 3, o mundo foi decrito como criado pelo “melhor e mais sistemático dos Artífices” - “ab optimo et regularis, omnium Opifice”. Apud Guicciardini, 2009, p.297.

¹⁴³Newton, *MP*, vol. 7, p. 287, 289. “Figuras quasvis planas a Deo Natura Artifice quovis confectas Geometra ex hypothesis quod sunt exacte fabricatae mensurat (...)”.

por isso podemos também investigá-la por meio de princípios geométricos exatos. Essa, basicamente, seria a razão para ser possível propor os princípios matemáticos.

Sem dúvida podem existir outras agendas, mas o que me parece mais provável é que, num espaço textual tão exíguo quanto o Prefácio de 1687, essa passagem tenha servido ao propósito de simplesmente justificar a possibilidade da sua obra, e esse seja o seu ponto fundamental. E podemos constatar isso a partir da simples reconstrução completa do argumento de Newton no Prefácio, como agora já estamos em condições de apresentar:

- (1) A natureza é um mecanismo construído de modo exato pelo mais perfeito dos artífices, o que implica a existência de leis fixas e determinadas na sua estrutura.¹⁴⁴
- (2) A natureza pode ser reduzida à matéria, ao movimento e às forças que geram esses movimentos (cada qual associada a uma lei determinada).
- (3) O objetivo da filosofia natural é investigar as causas, ou forças, da natureza a partir dos efeitos, ou movimentos.
- (4) É possível cultivar a geometria a partir de diferentes princípios, sendo admissível escolher o mais conveniente de acordo com os objetivos que se almeje.
- (5) É possível cultivar, ou inventar, uma ciência matemática, exata e demonstrativa, em analogia com a natureza, a partir dos princípios mecânicos causais dos movimentos e forças extraídos da investigação empírica dos fenômenos.
- (6) Tal ciência matemática pode ser utilizada com sucesso para investigar as forças da natureza a partir dos fenômenos dos movimentos, ou, para investigar as causas a partir dos efeitos, porque a *natureza* também não carece da exatidão que há na geometria.
- (7) Sendo os axiomas dessa ciência matemática aceitos como verdadeiros, o restante de seus teoremas demonstrados matematicamente deve se seguir necessariamente.
- (8) Portanto, os axiomas e teoremas de uma ciência matemática como a indicada acima devem ser considerados como “princípios” nos quais a filosofia natural tem de se basear nas suas investigações sobre as forças da natureza, e por essa mesma razão merecem ser chamados legitimamente de “princípios matemáticos da filosofia natural”.

¹⁴⁴ Como vimos na seção 2.3, uma das premissas implícitas de Newton sobre a origem mecânica da geometria era que qualquer construção geométrica realizada de “modo exato” envolve a operação de leis determinadas na construção, e uma vez que não há diferença essencial entre construções geométricas e mecânicas para ele, essa exigência deve valer também para construções materiais tais como a própria natureza. A natureza seria, portanto, uma construção realizada por meio da manipulação da matéria e do movimento, vinculados a leis fixas e determinadas.

Está justificado, desse modo, a própria possibilidade de se propor uma tal obra, que pretende cultivar a matemática de tal modo que possa ser apresentada como princípios para a investigação em filosofia natural, ou como princípios para a investigação das “causas” dos fenômenos da natureza. Como se pode perceber da reconstrução acima, a exatidão da natureza é uma parte importante do argumento do Prefácio para justificar os *Principia*. Encerra-se, assim, a exposição das 33 linhas que compõem a primeira parte do primeiro parágrafo do Prefácio aos *Principia*. Entremos agora nas linhas que compõem a segunda parte.

2.7 DIVISÕES E MÉTODO

Conforme afirmei no início desse capítulo, dividi o primeiro parágrafo do Prefácio de Newton aos *Principia* em duas partes, sendo que na primeira Newton apresenta o tema, os objetivos, a pertinência e os fundamentos nos quais se estrutura o seu tratado. As últimas 19 linhas do primeiro parágrafo compõem a referida segunda parte, e nelas Newton apresenta as principais divisões da obra e alguns breves comentários sobre o seu método. A sentença que divide essas duas partes é aquela que já foi citada acima sobre “toda dificuldade da filosofia natural”. Antes de tecer alguns comentários sobre essa segunda parte, vejamos inicialmente essas linhas em seu conjunto, para depois proceder o cotejamento dos trechos mais significativos.

E por essa razão eu ofereço esse trabalho como os Princípios Matemáticos da Filosofia [Natural]. Porque toda a dificuldade da filosofia natural consiste nisso – a partir dos fenômenos dos movimentos investigar as forças da natureza, e então, a partir dessas forças, demonstrar os outros fenômenos; é para esse fim que as proposições gerais no primeiro e segundo livros são direcionadas. No terceiro livro forneço um exemplo disso na explicação do Sistema do mundo; pois por meio de proposições demonstradas matematicamente nos primeiros livros, no terceiro eu derivo, a partir dos fenômenos celestes, as forças da gravidade com as quais os corpos tendem para o Sol e os vários planetas. Então, a partir dessas forças, por meio de outras proposições que são igualmente matemáticas, deduzo os movimentos dos planetas, dos cometas, da Lua e do mar. E quem dera pudéssemos derivar o restante dos fenômenos da natureza pelo mesmo tipo de raciocínio a partir de princípios mecânicos, pois estou inclinado por muitas razões a suspeitar que todos [os fenômenos] dependam de certas forças pelas quais as partículas dos corpos, por meio de causas até o momento desconhecidas, são ou mutuamente impelidas em direção umas das outras, se aglutinando coesas em figuras regulares, ou se repelem e se afastam mutuamente. Sendo essas forças desconhecidas, em vão os filósofos até agora têm tentado investigar a natureza; mas espero que os princípios aqui estabelecidos possam lançar alguma luz nesse método de filosofar, ou em outro ainda mais verdadeiro.¹⁴⁵

¹⁴⁵ Segunda parte do primeiro parágrafo do *Prefácio (1ed)*.

2.7.1 Análise e Síntese

Como o leitor deve ter percebido na passagem anterior, a sentença sobre a “dificuldade da Filosofia Natural” não havia sido citada de maneira completa. Agora já podemos fazê-lo: “Porque toda a dificuldade da filosofia natural consiste nisso – a partir dos fenômenos dos movimentos investigar as forças da natureza, e então, a partir dessas forças, demonstrar os outros fenômenos”. Podemos identificar nitidamente dois movimentos distintos no procedimento de Newton. Ele afirma que o objetivo – e também a dificuldade – da filosofia natural é (1) a partir dos fenômenos dos movimentos investigar as forças da natureza; e (2) a partir dessas forças demonstrar os demais fenômenos. Em outras palavras, ir primeiro dos *movimentos* para as *forças*, e depois das *forças* para os *movimentos*. Esse é o famoso método escolástico da *análise e síntese*¹⁴⁶. A *análise* seria o percurso investigativo dos efeitos em direção às causas; a *síntese* seria o percurso das causas em direção aos efeitos ou fenômenos. Uma vez descobertas as causas dos fenômenos se poderia deduzir fenômenos ainda desconhecidos. O procedimento fica ainda mais claro pelo exemplo de aplicação referido logo na sequência do texto, a saber, a “explicação do sistema do mundo”, a respeito do qual ele adianta que será desenvolvido no Livro III:

No terceiro livro forneço um exemplo disso na explicação do Sistema do Mundo; pois por meio de proposições demonstradas matematicamente nos primeiros livros, no terceiro eu derivo, a partir dos fenômenos celestes, as forças da gravidade com as quais os corpos tendem para o Sol e os vários planetas. Então, a partir dessas forças, por meio de outras proposições que são igualmente matemáticas, deduzo os movimentos dos planetas, dos cometas, da Lua e do mar.¹⁴⁷

Como ele esclarece na citação, no Livro III ele parte dos “fenômenos celestes” e chega nas *forças* que causam esses fenômenos, qual sejam, as forças da gravidade que fazem os corpos tenderem para o Sol e para os planetas. Esse é o processo de *análise*. Em seguida, a partir dessas forças descobertas ele deduz outros efeitos, ou movimentos, alguns até desconhecidos, como, por exemplo, os movimentos de cometas, da lua e do mar. Esse é o processo chamado *síntese*. Importa destacar aqui, no entanto, que o método da análise e síntese, por si mesmo, não é uma novidade introduzida por Newton. Afirmou-se anteriormente que investigar as causas a partir dos efeitos não era nada muito novo em relação aos objetivos da filosofia

¹⁴⁶ Os termos “análise” e “síntese” não aparecem explicitamente no Prefácio de Newton de 1687. No entanto, no Prefácio à segunda edição dos *Principia*, Roger Cotes cita explicitamente esses termos, e também Newton os cita na famosa questão 31 da *Óptica*, ao explicar o seu método.

¹⁴⁷ *Prefácio (led)*.

natural. Mas tampouco o seu inverso, como ir das causas para os efeitos, ou mesmo a conjugação dessas duas etapas, como no método chamado de análise e síntese.

Ducheyne mostrou que o procedimento conhecido como análise e síntese era relativamente conhecido e divulgado pela tradição escolástica de lógica e método no século XVII¹⁴⁸. Ele lembra o frutífero trabalho de J. E. McGuire e Martin Tamny que destacou a relevância do treinamento de Newton na filosofia aristotélica, mostrando notas do jovem estudante sobre vários autores aristotélicos como Joannes Magirus, Daniel Stahl e Gerardus Vossius, sem contar com algumas notas do próprio *corpus* de Aristóteles¹⁴⁹. Mas Ducheyne também destaca que vários outros pensadores contemporâneos de Newton também foram influenciados pela mesma tradição, pensadores como Thomas Hobbes, John Wallis, Robert Sanderson, Aintoine Arnauld, Pierre Nicole, Samuel Smith, vários deles conhecidos e estudados pelo próprio Newton. Thomas Hobbes, como já vimos anteriormente, utilizou palavras muito semelhantes às do Prefácio aos *Principia* ao descrever os objetivos da filosofia natural. Nas linhas de abertura do *De Corpore* (1655) ele afirma:

A filosofia [natural] é o conhecimento dos efeitos ou aparências, tal como os adquirimos por meio de verdadeiras inferências a partir do conhecimento que temos primeiro das suas causas ou gerações: e, novamente, das causas e gerações, tais como podem ser, conhecendo primeiro os seus efeitos.¹⁵⁰

John Wallis, no mesmo ano da publicação dos *Principia*, em 1687, publicou *Institutio Logicae*, onde em certa passagem discorre sobre a ordem da natureza e a ordem do conhecimento aplicada à filosofia experimental nos seguintes termos:

Porque embora na ordem da natureza a progressão é das causas para os efeitos, na ordem do conhecimento a progressão é dos efeitos observados para a investigação das causas.¹⁵¹

Arnaud e Nicole, no *Logica sive ars Cogitandi* (1662), obra que Newton possuía na sua biblioteca, os autores sintetizam o processo de investigação científica em dois tipos de raciocínios, assim caracterizados:

¹⁴⁸ Ducheyne, 2012, cap I.

¹⁴⁹ McGuire e Tamny estudaram o chamado *Trinity Notebook* de Newton (CUL Add. Ms. 3996), caderno de notas que contém o famoso *Questiones Quaedam Philosophicae*, editado em Newton, 1983.

¹⁵⁰ Hobbes, 1994, p. 3. Veja também, Guicciardini, 2007, p.325. McGuire e Tamny defendem que Newton conhecia o *De Corpore*, de Hobbes, dos seus tempos de estudante em Cambridge. McGuire and Tamny's, 1983, p.219. Esses autores também defendem que Newton provavelmente se familiarizou com o método de análise e síntese a partir dos *Elements of Philosophy* (1656), de Thomas Hobbes. No capítulo IV dos *Elements of Philosophy*, intitulado "Of Method", contém uma discussão do método *Analítico* e *Sintético*. Hobbes, 1994, vol.1. Hobbes caracterizou esse método como "o mais curto caminho de encontrar os Efeitos pelas suas Causas conhecidas, ou de encontrar as Causas pelas seus Efeitos conhecidos". Veja as observações de Ducheyne, 2012, p.12.

¹⁵¹ Howell, 1971, p. 29 e 39. Veja também Ducheyne, 2012, p.13.

O primeiro, quando procuramos pelas causas por meio dos efeitos. O segundo quando procuramos encontrar os efeitos por meio das causas.¹⁵²

Samuel Smith, no seu *Aditus ad logicam* (1613), uma obra formativa reconhecida no séc. XVII, e que não há dúvida que foi estudada cuidadosamente por Newton nos seus anos iniciais em Cambridge, o autor declara que “A demonstração da causa a partir do efeito ocorre quando o efeito é mais conhecido e a causa é menos conhecida: até o ponto que mostramos de fato que a causa está em algum [efeito]”, e algumas páginas depois complementa a sua explicação por meio do esclarecimento daquilo que ele chama de método *regresso*:

Regressus é o método da demonstração no qual coletamos uma causa prévia desconhecida a partir de um efeito mais conhecido. Em seguida, trabalhando de forma reversa, demonstramos verdadeiramente o mesmo efeito a partir da mesma causa.¹⁵³

Há poucas dúvidas, então, que muitos autores no séc. XVII estavam pensando a filosofia natural em termos semelhantes ao procedimento de análise e síntese¹⁵⁴.

Mesmo considerando as diferenças de abordagens e contextos em que esses autores inserem o método que procede de efeitos para causas e de causas para efeitos é forçoso pensar que Newton estaria propondo alguma grande novidade em citar um procedimento que parte dos movimentos para as forças e depois das forças para os movimentos. E embora os estudiosos do método de Newton tenham se debruçado muitas vezes para investigar o seu método da análise e síntese, a partir das citações enunciadas resumidamente acima, somos tentados a acreditar que esse procedimento era praticamente um senso comum na sua época. A particularidade da filosofia natural proposta por Newton nos *Principia*, por conseguinte, não parece ser prosseguir dos efeitos para as causas, e depois das causas para os efeitos, ou o método da análise e síntese. O que a distingue das propostas de seus contemporâneos, como mostramos nas seções anteriores, era o *como* fazer isso, ou o *como* proceder dos efeitos para as causas e depois das causas para os efeitos *por meio da matemática*. O que confere uma

¹⁵² Arnould and Nicole, *Logic: the art of thinking*, 1696, apud Ducheyne, 2012, p.15. Eles ainda oferecem alguns exemplos. “A partir de vários efeitos do magneto, tentamos inferir as suas causas. Quando notamos o horror ao vácuo que ocorre na natureza, tentamos determinar as causas que produzem tais efeitos. Pelo fluxo e refluxo do mar procuramos estabelecer a causa verdadeira. Em seguida, desenvolvemos um raciocínio que é o reverso daquele. Quando determinamos que o vento e o mar têm uma grande força para mover corpos, então podemos tentar manipular essa força – por exemplo, para propósitos práticos – de modo a obter efeitos desejáveis”.

¹⁵³ Smith, *Aditus ad Logicam*, 1649, apud Ducheyne, 2012, p.16. Essas passagens exatas foram destacadas por Newton no seu exemplar original.

¹⁵⁴ O tema do método da análise e síntese será aprofundado ao longo desse volume, recebendo uma discussão específica no capítulo 14. Na seção 15.1 do volume II, apresenta-se um breve esboço da origem histórica desse método.

identidade própria à abordagem de Newton foi sustentar que o procedimento da análise e síntese deveria ser levado a efeito por meio dos “princípios matemáticos”. E isso está presente, também, nas afirmações da segunda parte do Prefácio que lemos mais acima. Atente agora para os trechos sublinhados:

No terceiro livro forneço um exemplo disso na explicação do Sistema do Mundo; pois por meio de *proposições demonstradas matematicamente nos primeiros livros*, no terceiro eu derivo, a partir dos fenômenos celestes, as forças da gravidade com as quais os corpos tendem para o Sol e os vários planetas. Então, a partir dessas forças, *por meio de outras proposições que são igualmente matemáticas*, deduzo os movimentos dos planetas, dos cometas, da Lua e do mar.¹⁵⁵

Newton parece introduzir duas importantes modificações no método da análise e síntese. Primeiro, ele reduziu causas e efeitos a elementos mecânicos como forças e movimentos¹⁵⁶. Segundo, ele introduziu um importante instrumento para raciocinar dos efeitos para as causas e depois das causas para os efeitos: a matemática. É precisamente a matemática introduzida nesse procedimento que distingue a aplicação particular que Newton efetua desse método. Em outras palavras, ao que parece a especificidade do método de Newton nos *Principia* está contida mais na intrincada primeira parte do primeiro parágrafo do Prefácio do que nessa parte final e mais conhecida.¹⁵⁷ E isso se torna ainda mais claro na sentença de continuação da passagem citada acima, na qual Newton afirma que desejaria poder derivar “o restante dos fenômenos da natureza pelo mesmo tipo de raciocínio a partir de princípios mecânicos”. O “tipo de raciocínio” (ou procedimento) que Newton afirma que gostaria de usar para derivar o resto dos fenômenos da natureza (ainda desconhecidos) não é o procedimento de análise e síntese, mas o “tipo de raciocínio a partir de *princípios mecânicos*”.¹⁵⁸ Os “princípios mecânicos” que Newton se refere aqui são os princípios que, como já vimos, ele tomou como axiomas da sua *mecânica racional*, ou da sua *geometria mecânica*, e os teoremas deles derivados; ou seja, são os próprios *princípios matemáticos*. Esse é o tipo de “raciocínio” Newton considera promissor aqui, e que apresenta como caracterizando o seu método. É essa abordagem a partir de princípios mecânicos – que também são matemáticos – que nos leva a crer que Newton esteja propondo no seu Prefácio algo realmente novo, e que podemos considerar sem exagero como um novo programa metodológico de filosofia natural. Após a apresentação geral dos *Principia* nesse trabalho,

¹⁵⁵ *Prefácio (1ed)*. grifos meus.

¹⁵⁶ Como já vimos na seção anterior esse ponto não era tão inesperado num cenário mecanicista.

¹⁵⁷ Mas isso não significa que o método da análise e síntese não tenha o seu valor na estruturação do programa científico atual, como se mostrará a partir do capítulo 14.

¹⁵⁸ Grifo meu.

retorno a esse tema do análise e síntese, procurando esclarecer em mais detalhes a versão particular desse método na abordagem de Newton.¹⁵⁹ Por ora, sigamos restritos ao estudo do Prefácio.

2.7.2 Um novo programa metodológico de filosofia natural

As últimas linhas da segunda parte que estamos considerando do Prefácio são muito interessantes porque, ao apresentarem algumas expectativas futuras da sua abordagem, elas também dão a entender que Newton está apresentando ao leitor um novo programa metodológico de filosofia natural. Um programa que seria proposto com um exemplo concreto e bem-sucedido de aplicação (A “explicação do sistema do mundo”), e uma agenda de pesquisa pré-estabelecida. Vejamos a passagem:

E quem dera pudéssemos derivar o restante dos fenômenos da natureza pelo mesmo tipo de raciocínio a partir de princípios mecânicos, pois estou inclinado por muitas razões a suspeitar que todos [os fenômenos] dependam de certas forças pelas quais as partículas dos corpos, por meio de causas até o momento desconhecidas, são ou mutuamente impelidas em direção umas das outras, se aglutinando coesas em figuras regulares, ou se repelem e se afastam mutuamente. Sendo essas forças desconhecidas, em vão os filósofos até agora têm tentado investigar a natureza; mas espero que os princípios aqui estabelecidos possam lançar alguma luz nesse método de filosofar, ou em outro ainda mais verdadeiro.¹⁶⁰

Na passagem acima Newton afirma que (1) suspeita por “muitas razões”¹⁶¹ que talvez todos os fenômenos da natureza dependam de certas forças. Até mesmo a coesão e forma dos corpos poderiam estar relacionadas a forças de atração ou repulsão; (2) sendo essa suspeita verdadeira, os filósofos estariam investigando a natureza em vão sem conhecer essas forças; ou seja, o primeiro passo para a compreensão da natureza deveria ser compreender essas forças; (3) essas forças podem ser investigadas de maneira bem sucedida pela abordagem proposta, por meio de princípios mecânico-matemáticos; (4) ele espera que esses princípios matemáticos cultivados nos *Principia* possam lançar luz a esse novo método de filosofar (a partir de princípios matemático-mecânicos), ou em outro método ainda mais verdadeiro.

O raciocínio de Newton aqui parece simples. Se a natureza, de fato, se resume a forças e movimentos, qualquer investigação da natureza que não procure descobrir essas forças é vã. E, além disso, se as forças e movimentos podem ser submetidas ao tratamento matemático, o

¹⁵⁹ Veja o capítulo 14.

¹⁶⁰ *Prefácio (1ed)*.

¹⁶¹ Razões que ele não explica aqui, mas que estão contempladas nas *Queries*, da *Óptica*. Veja principalmente Questão 31 a esse respeito. Newton, 1721.

método mais adequado de investigação da natureza é por meio da utilização de princípios matemáticos. Newton cultivou esses princípios para ilustrar como um tal método poderia ser aplicado com sucesso na filosofia natural. O que está sendo inaugurado por Newton nos *Principia*, portanto, é um novo programa metodológico de investigação da natureza no qual o seu autor propõe ao leitor que acompanhe a sua aplicação num exemplo concreto, qual seja, a explicação do sistema do mundo. A se basear somente pelo Prefácio, o ponto fundamental desse programa seria a maneira peculiar de utilizar a matemática eficientemente no conhecido procedimento de análise e síntese.

As observações de Newton nessa passagem, no entanto, não param por aí. Além de um exemplo de aplicação que ele pretende fornecer desse novo programa metodológico, também se sugere uma agenda de pesquisa para esse programa. Ele aplicou os princípios matemáticos-mecânicos para investigar as forças que regem os movimentos dos corpos celestes. Agora, os seus colaboradores e sucessores, sob a hipótese de trabalho que todos os fenômenos da natureza dependam de tais forças, possuem uma extensa agenda de investigação para as demais forças atrativas e repulsivas da natureza – e a menção de Newton a forças *repulsivas* aqui, ou seja, a forças por meio das quais os corpos “se repelem e se afastam mutuamente”, é sem dúvida uma alusão às forças elétricas e magnéticas. Newton levanta a hipótese, inclusive, de que até mesmo a coesão e forma dos corpos podem ser produzidas por forças que ainda não conhecemos e poderíamos vir a conhecer. Essa agenda de pesquisa poderia ser empreendida seguindo o mesmo tipo de procedimento exemplificado pelos *Principia*.

Como sabemos a partir do privilégio da visão retrospectiva, o programa de Newton e a sua agenda realmente foi seguida pelos filósofos naturais dos séculos seguintes. As forças elétricas e magnéticas de fato foram investigadas sob a inspiração do modelo newtoniano, inclusive com formulações muito semelhantes a aquelas que Newton fez, embora com uma roupagem matemática mais moderna. Esse programa de pesquisa culminou, de certa maneira, na teorização da natureza como composta por quatro interações fundamentais, a saber, a força gravitacional, elétrica, magnética e atômica, sendo que as forças atômicas e intermoleculares assumiram precisamente o papel das forças acerca das quais Newton manteve uma firme suspeita de serem responsáveis pela “coesão e formas dos corpos”.

Não há dúvidas, portanto, de que Newton tenha lançado um novo programa metodológico e de investigação em filosofia natural nos *Principia*. As dúvidas recaem sobre o que é mais fundamental nesse programa, e o seu papel e amplitude na história da ciência. Como vimos ao longo desse capítulo, a se basear somente pelo texto do Prefácio, o mais fundamental nesse programa seria a maneira peculiar pela qual Newton utilizou a *matemática*

para ir dos efeitos às causas, e depois das causas aos efeitos. A maneira que ele introduziu a sua nova abordagem matemática no conhecido e difundido método da análise e síntese.¹⁶²

¹⁶² O tema do programa de Newton é abordado em mais profundidade no cap. 20 do volume II.

3 DISCUSSÃO SOBRE O PREFÁCIO

Como mostrou ao longo do segundo capítulo, o Prefácio aos *Principia* apresenta um novo programa de investigação em filosofia natural. Esse programa consistiria em cultivar uma ciência matemática específica de modo a empregá-la no conhecido método de análise e síntese com o objetivo de investigar as causas dos fenômenos naturais. À primeira vista, o que fundamentaria realmente esse programa de Newton não estaria tanto na segunda e mais conhecida parte do Prefácio, e sim a primeira e mais complexa. A parte em que ele revela *como* e *porque* seria possível cultivar a matemática precisamente para esse fim. Se a natureza é uma gigantesca máquina construída de maneira exata, com leis fixas e determinadas em sua estrutura, e cuja investigação pode ser resumida na busca de forças a partir de movimentos; e se a geometria tem uma origem mecânica, e por isso mesmo pode ser reconstruída a partir de diferentes princípios, dentre os quais, princípios mecânicos que envolvem forças e movimentos numa relação análoga à natureza; então é possível usar a geometria eficientemente para investigar as forças da natureza a partir dos fenômenos dos movimentos. Esse é o argumento mais fundamental do Prefácio. E uma vez exposto esse argumento, podemos, agora, discutir alguns de seus pontos e explorar as suas fronteiras antes de prosseguirmos com a apresentação do conteúdo e do método do corpo propriamente dos *Principia*. É isso o que pretendo no último capítulo que encerra a *Parte 1*.

Refletindo sobre o argumento do Prefácio exposto acima não é difícil perceber que ele se sustenta principalmente em dois pilares. Primeiro: que a *geometria* tem origem mecânica, e é exata. Segundo: que a *natureza* também tem origem mecânica, e é exata. Aparentemente é a crença de que tanto a geometria quanto a própria natureza são exatas, e têm uma origem comum na prática mecânica, que move Newton a se lançar no projeto de propor e construir os princípios matemáticos da filosofia natural. Esses dois pilares seriam as bases de sustentação dos *Principia*, segundo o Prefácio. Cabe, agora, nos perguntarmos se são razoáveis essas crenças, e se há algum ponto que merece receber esclarecimentos adicionais. É realmente certo que tanto a geometria quanto a natureza tenham origem mecânica? Reflitamos, primeiro, sobre a questão da geometria.

3.1 GEOMETRIA, MECÂNICA E EMPIRISMO

É certo que a geometria tem sua origem na prática mecânica e que dela dependa? O argumento de Newton se sustenta na ideia de que não há essencialmente diferença de natureza

entre a mecânica e a geometria. A diferença estaria somente nos artifícios, e não na arte. Mas faria isso realmente sentido? A geometria não é por excelência um conhecimento abstrato, puro, *a priori*, descolado dos objetos concretos da realidade? Não trata a geometria de figuras idealizadas? Existiria realmente algum objeto que é um “comprimento sem largura”, como é definição euclidiana de linha?¹⁶³ Existiria alguma figura que obedece rigorosamente a definição convencional de *círculo*, como uma figura formada por uma linha curva fechada cujos pontos estão *absolutamente* a uma mesma distância de um centro? É certo – alguém poderia defender – que só construímos essas figuras por meio de movimento de instrumentos mecânicos, mas seria daí que surgiria a distinção característica da geometria, ou seja, a sua exatidão? Não seria a geometria uma matemática *pura* precisamente por ser um conhecimento idealizado, puramente inteligível, e por isso mesmo exato? Esses questionamentos nos levam a pensar no sentido justamente oposto ao que Newton sugere nos Prefácio, a saber, que os conhecimentos da mecânica e da geometria são, de fato, conhecimentos essencialmente distintos entre si. E não devido à limitação dos artifícios, mas devido à diferença entre as artes. Os conhecimentos da mecânica referem-se a coisas reais; os conhecimentos da geometria, a coisas idealizadas. Os conhecimentos da mecânica são sensíveis e concretos; os da geometria, inteligíveis e abstratos. De fato, entender a geometria sob esse ponto de vista implica a demolição do edifício proposto por Newton.

Inicialmente, o leitor deve considerar o seguinte ponto: a tese da origem mecânica da geometria é precisamente a recusa de Newton em aceitar que a geometria seja caracterizada dessa maneira idealizada, como foi sugerido no parágrafo anterior. Guicciardini nos lembra que vários estudos recentes sobre a história da matemática britânica têm relacionado os trabalhos matemáticos de Hobbes, Barrow e Newton com a filosofia empirista cultivada na Inglaterra e Escócia¹⁶⁴. Pycior enfatizou que a preferência pela geometria em detrimento da álgebra – manifesta por vários matemáticos britânicos – foi o resultado de uma busca por uma matemática fundada empiricamente¹⁶⁵. Sageng também definiu a escola fluxional britânica como dominada pelo “empirismo matemático”¹⁶⁶. Embora o foco dessa pesquisa não seja ingressar num estudo sobre filosofia da matemática, vale ao menos fazer alguns apontamentos a respeito da tradição de matemática empírica da qual Newton emergiu, uma vez que esses apontamentos poderão esclarecer a sua atitude adversa com respeito à concepção tradicional da geometria.

¹⁶³ Euclides, *Elementos*, Livro I, def. 2.

¹⁶⁴ Guicciardini, 2009, p.313.

¹⁶⁵ Pycior, 1997.

¹⁶⁶ Sageng, 1989.

Quando olhamos mais de perto as declarações e os trabalhos matemáticos dos pensadores britânicos que citamos acima, percebemos que eles realmente tinham uma concepção peculiar da geometria. Barrow, como vimos na seção 1.3, mostrou que a geometria mecânica não era meramente um método matemático, ou uma abordagem interessante para resolver alguns problemas. Essa abordagem tornava as coisas ao mesmo tempo mais simples e mais gerais. Mas ele não se preocupou em discutir a possível razão desse fato desconcertante. Deixou apenas algumas poucas pistas sobre isso nos seus escritos. Nas suas *Lectiones Mathematicae*, ele afirmou que a “magnitude é a afecção comum de todas as coisas físicas, está entrelaçada com a natureza dos corpos, misturada com todos os acidentes corpóreos”, portanto não há parte da física “que não implique em Quantidade (...) e, conseqüentemente, que não seja redutível à Geometria”. E, na sequência, chegou a afirmar que a matemática é “co-extensiva com a física”.¹⁶⁷ São fortes as afirmações de que a magnitude “é a afecção comum de todas as coisas físicas”, e que “é entrelaçada com a natureza dos corpos”; e igualmente as afirmações de que “não há parte da física que não seja redutível à Geometria”, e que a física e a geometria são “co-extensivas”. O que Barrow estaria querendo dizer com essas declarações? Que tipo de concepção matemática está defendendo? É difícil saber ao certo. Mas Guicciardini, comentando essas passagens, afirma que Barrow rejeitou nas suas *Lectures* a tradicional distinção entre o sensível e o inteligível na matemática, bem como aquela entre a matemática pura e mista.¹⁶⁸

A ideia de uma matemática empírica pode ser difícil de assimilar para o leitor contemporâneo, e as declarações de Barrow não parecem ajudar muito. Mas, uma vez que nem Barrow nem Newton se preocuparam em detalhar os fundamentos dessa concepção matemática em seus trabalhos, resta-nos recorrer às declarações de Hobbes, que embora diverjam em vários pontos das ideias de Barrow e Newton, têm o mérito de lançar luz nessa perspectiva da matemática, e de nos mostrar como é possível conceber uma geometria fundada empiricamente.

¹⁶⁷ *Usefulness*, p. 21, 22, 26. “For magnitude is the common affection of all physical things, it is interwoven in the Nature of Bodies, blended with all corporeal Accidents”; “I say there is no part of this [Physics] which does not imply Quantity . . . and consequently which is not in some way dependant on Geometry”; “Mathematics is adequate and co-extended with physics.”

¹⁶⁸ Guicciardini, 2009, p.27.

3.1.1 A concepção matemática de Hobbes

No *De Corpore* (1655), Hobbes defendeu abertamente que os objetos da matemática são materiais¹⁶⁹. Nesse tratado ele realizou uma longa discussão sobre a natureza dos métodos na matemática com o objetivo de tornar os fundamentos desse campo mais firmes e coerentes¹⁷⁰. Uma vez que a filosofia de Hobbes reconhece que nada há além de matéria, movimento e choques de matéria, ele procura fundar toda a geometria nos princípios de matéria e movimento. Ou seja, os objetos da matemática devem ser interpretados como *corpos*, ou, como *coisas produzidas pelo movimento de corpos*¹⁷¹. Naturalmente esse entendimento representa um afastamento da concepção tradicional da matemática. Como se sabe, Euclides definiu o *ponto* como aquilo que não tem dimensão, ou, mais precisamente, como “aquilo que não tem partes”; a *linha* como um “comprimento sem largura”, e a *superfície* como aquilo que possui “somente comprimento e largura”.¹⁷² Os filósofos e matemáticos depois de Euclides interpretaram tipicamente essas definições tendendo para a imaterialidade dos objetos geométricos, uma vez que nenhum corpo físico pode satisfazer tais definições.¹⁷³ A ideia tradicional e dominante era que matemática pura não se preocupa de maneira alguma com a natureza dos corpos físicos. É uma idealização. A linha, por exemplo, é uma abstração na qual o comprimento é mentalmente separado da largura. E não existe uma linha sem largura na natureza. A partir dessa concepção, uma ciência mista como a astronomia trataria os objetos físicos como *aproximações* das idealizações da matemática pura: um raio de luz pode ser considerado uma linha, um planeta pode ser considerado como um ponto com respeito à sua órbita.¹⁷⁴ Hobbes, entretanto, defende que aquelas definições euclidianas são ambíguas e levam a absurdos. No seu famoso debate com Wallis sobre a natureza da matemática, ele afirma ao seu antagonista:

¹⁶⁹ Jesseph, 1999, p.77.

¹⁷⁰ O tratado de *De Corpore* foi incluído no vol. 1 da edição das obras de Hobbes de Molesworth (Hobbes, 1994). Nos capítulos de 12-20 Hobbes apresenta a sua filosofia da matemática.

¹⁷¹ Ibid, p.77.

¹⁷² Euclides, *Elementos*, I, def. 1, 2 e 5.

¹⁷³ Por exemplo, Proclo e Clavius. Veja Jesseph, op.cit. No seu comentário aos *Elementos* de Euclides (publicado em *Clavius Mathematical Works*, vol.1, 1612), Clavius afirma (apud Jesseph, op.cit., p.78): “nenhum exemplo disso pode ser encontrado nas coisas materiais, a não ser que se entenda que a extremidade fina agulha expresse alguma similitude com um ponto; o que, não obstante, é totalmente falso, uma vez que esta extremidade pode ser dividida e cortada infinitamente, e um ponto deve ser suposto como indivisível”.

¹⁷⁴ Ibid, p.75.

Aquilo que é indivisível não é uma Quantidade; e se um ponto não for uma Quantidade, visto que não é nem substância e nem Qualidade, então não é nada. E se Euclides quis dizer isso com a sua definição (como você pretende), então ele poderia tê-lo definido de forma mais breve (embora ridícula): *um Ponto é nada*¹⁷⁵.

Mas Hobbes defende que não é tão certo que Euclides, ou mesmo Proclus, quisessem dizer o que pretendia Wallis. O autor do *Leviatã* cita uma passagem de Proclus, comentando Euclides, onde esse reconhece a imperfeição da definição do *ponto*.

(...) a definição de ponto, embora possa ser imperfeita de outro ponto de vista é perfeita naquilo que se refere à ciência considerada (...) ela afirma que “o que não tem partes é um ponto para os meus propósitos e um princípio para mim; e o mais simples objeto é nada além disso”.¹⁷⁶

Vale repetir a citação de Euclides que Proclus destaca na última sentença: “o que não tem partes é um ponto para os meus propósitos (...) e o mais simples objeto é nada além disso”. Nessa passagem, Euclides não só parece reconhecer o problema com a sua definição de ponto, justificando que ela se aplica sob ressalvas para propósitos específicos, como afirma que o ponto não se distinguiria do “mais simples objeto”. Hobbes, então, não concorda com Wallis que Euclides e Proclus realmente estivessem defendendo que um *ponto* não tem dimensões. Para ele, uma melhor definição para o *ponto* é que este é um *corpo* cujas dimensões “não são consideradas na demonstração”. E sob compreensão semelhante ele define a linha e a superfície. “Se a magnitude de um corpo que se move (embora sempre deva haver alguma) é considerada como nula, o caminho pelo qual ele se desloca é chamado uma *linha* ou uma simples dimensão, e o espaço percorrido ao longo desse comprimento, e o próprio corpo é chamado de *ponto*”.¹⁷⁷ Como nos informa Jesseph, “para Hobbes, a essência de um ponto é que a sua magnitude não é considerada na demonstração, e a sua definição alternativa captura essa característica essencial do ponto e posiciona toda a geometria sobre um firme fundamento”.¹⁷⁸

Na argumentação de Hobbes, essa concepção também resolve uma contradição percebida pelo próprio Proclus a respeito da definição de linha a partir do movimento de um ponto, que foi ensinada desde Aristóteles. Proclus rejeita essa definição de linha pelo movimento de um ponto precisamente porque caso a aceitasse precisaria se comprometer com uma concepção material da matemática, uma vez que um ponto sem dimensões não pode

¹⁷⁵ Hobbes, 1994, vol.7, p.201.

¹⁷⁶ Proclus, *Comentary to the first book of Elements*, 1970, p.76-77, apud Jesseph, 1999, p.79.

¹⁷⁷ Hobbes, 1994, vol.1, p.111. Veja também a tradução de Jesseph, op.cit., p.77.

¹⁷⁸ Jesseph, op.cit. p.79

gerar uma linha, porque com efeito não pode gerar nada¹⁷⁹. Hobbes aproveita esse dilema de Proclus e defende que essa é exatamente mais uma evidencia de que os objetos da matemática são materiais. Somente *corpos* podem se movimentar. Nas palavras de Hobbes:

Mas qualquer um sabe que nada além de um corpo pode ser movido, nem o movimento pode ser concebido de qualquer coisa exceto de um corpo. E todo corpo em movimento descreve um caminho não apenas com comprimento, mas igualmente com largura. Portanto, a definição de linha [ou segmento] deveria ser nos seguintes termos: *uma linha é o caminho traçado por um corpo em movimento, cuja quantidade não é considerada na demonstração.*¹⁸⁰

Acredito que essas passagens já sejam suficientes para mostrar que Hobbes rejeitou uma concepção de que os objetos da matemática são puramente abstrações mentais ou idealizações e procurou fundamentar uma concepção materialista da matemática, uma concepção de uma geometria que pode ser fundada empiricamente. O verdadeiro fundamento da geometria não seriam essas figuras idealizadas, mas *corpos*; corpos tomados, por assim dizer, no *limite da sua simplicidade*, de modo que algumas das suas dimensões não sejam consideradas na demonstração. Juntamente com esses corpos, também trajetórias geradas pelos movimentos desses corpos. Apenas dessa forma, argumenta Hobbes a Wallis, a geometria poderia ser admitida como parte de uma genuína filosofia, porque conteria a geração das coisas que ela estuda.¹⁸¹

3.1.2 As concepções matemáticas de Barrow e Newton

A essa altura, acredito que já temos condições de compreender melhor algumas declarações de Barrow nas suas *Lectioes*. Embora reconheça que haja diferenças entre as matemáticas de Barrow e Hobbes, como já disse anteriormente, as observações do autor do *Leviatã* nos mostram ao menos como é possível que a magnitude esteja “entrelaçada com a natureza dos corpos” ou que a geometria e a física sejam “co-extensivas”, como o matemático londrino declarou. Além disso, mostram por que é concebível sustentar uma rejeição da distinção entre o sensível e o inteligível na matemática, e entre a matemática pura e a mista. É importante notar que as considerações de Hobbes nos levam também à mesma rejeição. Sendo os objetos da matemática caracterizados como *corpos* e *trajetórias geradas pelo movimento de corpos*, nada há senão o *sensível* na matemática, e a divisão entre matemática pura e mista

¹⁷⁹ Proclus, *Comentary to the first book of Elements*, 1970, apud Jesseph, op.cit., p.80

¹⁸⁰ *Thomae Hobbes Malmesburiensis Opera Philosophica*, vol. 4, p.393, apud Jesseph, op.cit., 81. Grifos meus.

¹⁸¹ Ibid, p.81.

é, na verdade, ilusória. A matemática mista é não apenas anterior a matemática pura, mas, com efeito, a única que há. A astronomia não considera um planeta em relação a sua órbita como uma *aproximação* de um ponto em sua trajetória. É a matemática pura que investiga as propriedades de um *corpo* que, em relação a sua órbita, tem dimensões pequenas demais para serem consideradas na demonstração. E nessa situação específica ela chama esse planeta, ou esse corpo, pelo nome genérico de *ponto*. Nem a matemática pura é uma abstração puramente mental – uma idealização – nem a matemática mista é uma *aproximação* dos objetos físicos às abstrações idealizadas da matemática. Ambas são uma e a mesma matemática, divididas somente pelo fato da *pura* não estar preocupada com a investigação de nenhum caso em particular da natureza. Tanto as afirmações de Hobbes quanto de Barrow parecem conduzir a essa conclusão.

Assim como Barrow, poucas vezes Newton teve interesse de ingressar em discussões filosóficas sobre a natureza da matemática, e nas poucas vezes em que o fez não apresentou uma visão bem estruturada e definida sobre o assunto nos seus diferentes escritos, conforme vários comentadores da matemática newtoniana têm mostrado. Conforme assevera Guicciardini, é difícil classificar Newton como filósofo da matemática. Mas de todo modo é igualmente difícil negar a sua aproximação das concepções empiristas e realistas da matemática.¹⁸² No *De Quadratura*, por exemplo, Newton afirma repetidas vezes que as quantidades matemáticas por ele consideradas no seu método das fluxões têm a sua existência na *rerum natura*¹⁸³. Alguns anos mais tarde, na polêmica com Leibniz, ele defendeu que as magnitudes do seu método existem realmente na natureza enquanto que os infinitesimais do filósofo alemão não existem, sendo apenas ficções. Em outros lugares, ele ainda afirma que as *magnitudes* da sua matemática são apreensíveis na experiência e, por isso, são finitas e sensíveis¹⁸⁴. No *De Gravitatione*, ele declara que as curvas geradas mecanicamente “simulate the power of creation”, ou seja, são uma imitação dos poderes criadores de Deus e da natureza¹⁸⁵. Do mesmo modo, declara que as curvas, superfícies e sólidos gerados

¹⁸² Sepkoski (2007) classificou a filosofia da matemática de Newton de *fisicalista*; Peter Dear (1995) a classifica como associada ao *construtivismo matemático*; Guicciardini (2009) mostra que Newton oscila nos seus diferentes escritos entre uma concepção *empirista* e *realista* da matemática.

¹⁸³ *MP*, 8, p. 123. “Quantitates Mathematicas non ut ex partibus quam minimis constantes sed ut motu continuo descriptas hic considero (...) Hae Geneses in *rerum natura* locum vere habent & in motu corporum quotidie cernuntur. Et ad hunc modum Veteres ducendo rectas mobiles in longitudinem rectarum immobilium genesin docuerunt rectangulorum.” *MP*, 8, p. 122. Grifo meu.

¹⁸⁴ No tratado *De Quadratura Curvarum*, Newton escreve: “For fluxions are finite quantities and real, and consequently ought to have their own symbols; and each time it can conveniently so be done, it is preferable to express them by finite lines visible to the eye rather than by infinitely small ones.” *MP*, 8, p. 113, 115.

¹⁸⁵ “[T]he analogy between the divine faculties and our own may be shown to be greater than has formerly been perceived by philosophers. (...) Moreover, in moving bodies we create nothing, nor can we create anything, but

mecanicamente apresentam “gerações que existem na *rerum natura*”¹⁸⁶. Independente de como poderíamos classificar exatamente a filosofia matemática de Newton, é inegável que ele estava filiado a uma tradição matemática que rejeitava a concepção dos objetos matemáticos como entidades idealizadas.

Mas talvez a passagem mais significativa dos *Principia* que aproxima inegavelmente a concepção de Newton sobre a matemática daquelas de Hobbes e Barrow acima referidas é o escólio da proposição 73 da seção 12 do Livro I, seção em que ele inicia a sua análise a respeito das “forças atrativas em corpos esféricos”. Nessa seção Newton começa demonstrando proposições sobre a força atrativa atuando em superfícies esféricas, ou *cascas esféricas*, e na altura da proposição 73 ele faz a transição para *esferas sólidas*. No escólio, Newton justifica o método que ele usa na proposição para fazer a transição entre cascas esféricas para esferas sólidas numa passagem altamente reveladora acerca da sua concepção sobre a matemática:

As superfícies das quais os sólidos são compostos aqui *não são puramente matemáticas*, mas globos [ou cascas esféricas] tão extremamente finos que a sua espessura pode ser considerada nula: a saber, globos evanescentes dos quais a esfera ultimamente consiste quando o número desses globos é aumentado e a sua espessura diminui indefinidamente. De modo semelhante, quando se diz que linhas, superfícies, e sólidos são compostos de pontos, esses pontos devem ser entendidos como iguais *partículas de magnitude tão pequena que esta pode ser ignorada*.¹⁸⁷

Nessa passagem é notável a semelhança entre as observações de Newton e as concepções de Hobbes sobre a matemática, mencionadas mais acima. As superfícies consideradas por Newton são superfícies evidentemente matemáticas, porém ele afirma que elas “não são puramente matemáticas”, pois podem ser consideradas como cascas tão finas que a sua espessura se torna praticamente nula, equivalendo-se a uma superfície matemática. Em outras palavras, utilizando o seu método das razões primeiras e últimas, Newton pode defender que uma casca esférica *material*, no limite da sua espessura diminuindo indefinidamente, coincide com uma casca esférica *matemática*. Além disso, o mesmo se pode considerar, por exemplo,

we only simulate the power of creation. (...) if anyone, however, prefers this our power to be called the finite and lowest level of the power which makes God the creator, this no more detracts from the divine power than it detracts from his intellect that intellect belongs to us in a finite degree too”. Newton, 2004, p. 30.

¹⁸⁶MP, vol. 2, p. 243.

¹⁸⁷ CW, p.593. Grifos meus. Na tradução do Mote-Cajori: “By the surfaces of which I here imagine the solids composed, I do not mean surfaces purely mathematical, but orbs so extremely thin, that their thickness is as nothing; that is, the evanescent orbs of which the sphere will at last consist, when the number of the orbs is increased, and their thickness diminished without end. In like manner, by the points of which lines, surfaces, and solids are said to be composed, are to be understood equal particles, whose magnitude is perfectly inconsiderable”. MC, p.196. Última frase no latim: “Similiter per puncta, ex quibus linem, superficies, & solida componi dicuntur, intelligendae sunt particulae aequales magnitudinis contemnendae”.

quando se diz que linhas são compostas de “pontos”. Esses “pontos”, diz Newton, “devem ser entendidos como iguais *partículas*” tão pequenas que a sua magnitude pode ser ignorada. Naturalmente, com “partícula”, nessa passagem, ele quer dizer um *corpo* muito pequeno. E isso nos lembra o que disse Hobbes sobre um ponto ser um corpo tão pequeno que suas dimensões (ou sua *quantidade*) podem ser desconsideradas na demonstração. No caso específico de Newton, um *corpo* cujas dimensões diminuem indefinidamente, no limite, coincide com um ponto matemático; e uma casca esférica *material* cuja espessura diminui indefinidamente, no limite, coincide com uma superfície esférica matemática. Assim como Hobbes e Barrow, Newton considera que o fundamento da matemática seja material. Nessa altura, certamente já ficou claro ao leitor que a suposta crítica que poderia ser levantada ao projeto dos *Principia* a partir do argumento de que a mecânica e a matemática são, na verdade, conhecimentos essencialmente diferentes – sendo o primeiro sensível e o segundo inteligível – não cabe a Newton. A defesa por ele empreendida da origem mecânica da geometria surge precisamente da sua recusa em aceitar essa distinção. Surge de uma concepção da geometria que, embora seja difícil de delinear especificamente para o caso de Newton, tem seus contornos em nítida oposição à concepção idealista, vinculada à tradição de uma matemática fundada empiricamente, fortemente estabelecida na Inglaterra por meio de expoentes tais como Hobbes e Barrow. Para essa tradição, comprometida com uma visão empirista e materialista da matemática, de fato não há problema em negar uma diferença essencial entre geometria e mecânica. A diferença está, sim, nos artífices. Conseguimos trabalhar com exatidão quando as dimensões relativas dos corpos e trajetórias são pequenas o suficiente para não serem consideradas nas demonstrações realizadas com o auxílio dos instrumentos que utilizamos para traçá-los. Quando essas dimensões se tornam consideráveis, não somos mais capazes de trabalhar com a mesma exatidão. Isso ocorre não por uma limitação própria do objeto traçado, mas por uma limitação de nós mesmos, os artífices encarregados de traçá-los.

Conforme veremos adiante, essa concepção de Newton sobre a matemática não terá somente o papel de afastar a crítica do idealismo matemático. Ela será fundamental na estruturação de um entendimento mais profundo sobre o sentido dos “princípios matemáticos” que Newton propõe nos *Principia*. Além disso, terá impacto na maneira de enxergarmos o método de Newton na sua obra. Mas não nos adiantemos nesses assuntos. Discutamos, antes, o segundo pilar de sustentação do argumento do Prefácio a que nos referimos há pouco, que não apenas *geometria* tem origem mecânica, e é exata, mas também a *natureza*.

3.2 NATUREZA, MECÂNICA E DEUS

Como foi mencionado anteriormente, o argumento do Prefácio se sustenta em dois pilares. Primeiro: que a *geometria* tem origem na mecânica, e é exata. Segundo: que a *natureza* tem origem na mecânica, e é exata. O primeiro pilar foi discutido na seção anterior. Vimos que ele não pode ser abalado se for compreendido sob os auspícios de uma concepção *material* da matemática. O segundo pilar é precisamente o que faz Newton acreditar que ele pode usar a geometria com êxito em sua aplicação à natureza. A natureza tem a mesma origem da geometria: a prática mecânica. E ela é construída, como a geometria, de maneira exata. Mas seriam mesmo aceitáveis essas concepções de Newton sobre a natureza? O que fundamentaria esse segundo pilar?

Como foi abordado na seção 2.6, a origem mecânica da natureza e sua exatidão surgem parcialmente da tese representada pelo primeiro pilar, e parcialmente do argumento do *Mechanicus Ominum Perfectissimus*. Da tese da *origem mecânica da geometria* se seguem duas possibilidades: ou a geometria *não é* exata, pois a mecânica não é exata; ou a geometria *é* exata, pois a mecânica é exata. Como já sabemos, Newton rejeita a primeira possibilidade e defende a segunda, afirmando que a inexatidão não estaria nas artes, mas nos artífices, e que pelo menos para Deus, o mais perfeito dos mecânicos, a geometria e a mecânica teriam o mesmo nível de exatidão, sendo a natureza o exemplo mais concreto dessa construção mecânica perfeita. Naturalmente, uma maneira de criticar esse segundo pilar seria colocando Deus em questão. Mas é evidente que essa discussão estaria para além dos propósitos desse trabalho. Não obstante, parece-me possível refletir sobre essa questão a partir de um outro caminho: questionando não as convicções de Newton sobre Deus, mas as suas convicções sobre a *mecânica*. Obviamente, seria impossível sustentar a ideia de que a natureza tem uma origem mecânica sem delinear precisamente o que se entende por “mecânica”. Então nos perguntamos: seria possível retirar do Prefácio uma ideia mais precisa de “mecânica”? Conforme o leitor já deve ter percebido até aqui, “mecânica” é o termo mais importante do Prefácio de Newton, e a chave para a compreensão desse texto de abertura dos *Principia*. Mesmo uma breve inspeção no Prefácio mostrará de imediato que “mecânica” é de longe o termo que mais se repete. São quinze repetições no curto percurso textual do Prefácio, e em todas as vezes com destaque, contra nove do termo “geometria” – o segundo que mais se repete. De fato, qualquer que seja a mensagem que Newton tenha procurado transmitir no seu Prefácio, ela passa necessariamente pelo entendimento adequado do termo “mecânica”.

Mas o que seria a “mecânica” para Newton, afinal? No Prefácio, vimos que ele começa apelando para a história desse campo. A mecânica surgiu com aquilo que veio a ser chamado pelos discípulos de Heron de “mecânica prática”. A arte de construir máquinas, instrumentos, dispositivos úteis para o ser humano; em outras palavras, a arte de construir *mekhanes*. Dessa arte, conforme também vimos, surgiu a *geometria* e a *mecânica racional*, que não deixam de ser artes de construir – porém construir *figuras* por meio de mecanismos específicos. Contudo Newton sugere em seguida que também Deus é um artífice e, portanto, o próprio mundo é da mesma forma um dispositivo construído pela arte mecânica. Nesse ponto percebemos, com certa surpresa, que para Newton não somente a geometria, a mecânica racional e a mecânica prática, mas *tudo* parece surgir dessa grande ciência universal que é a mecânica. Não seria sem razão, portanto, que o vemos usar no Prefácio a expressão “mecânica universal” (*Mechanicae Universalis*):

Portanto, a *geometria* está fundada na prática mecânica e nada mais é do que a parte da *mecânica universal* [*Mechanicae Universalis*] que propõe a arte da medição de maneira exata e demonstrativa.¹⁸⁸

A expressão *Mechanicae Universalis* tem chamado a atenção dos historiadores pelo seu caráter abstruso, principalmente porque Newton não a explica no Prefácio, e aparentemente não o faz em qualquer outro texto.¹⁸⁹ Mas à luz do contexto que expomos até aqui parece tomar forma a ideia de que Newton entende o termo “mecânica” num sentido muito mais amplo do que se poderia imaginar inicialmente. Seria dessa ciência universal da *mecânica* que surgiria tanto a “mecânica prática” (ou as artes manuais) quanto a “geometria”, a “mecânica racional”, e até mesmo a grande máquina da natureza¹⁹⁰. A *mecânica*, dessa perspectiva newtoniana, seria a grande ciência da criação, construção e manipulação de *mekhanes*. *Mekhanes* que poderiam variar desde simples figuras construídas no papel até complexas estruturas tais como aquelas em que consiste a própria natureza. Mas, de qualquer maneira, sempre se trataria de um trabalho de seres racionais – artífices – que necessariamente empregariam regras e leis determinadas na construção dessas estruturas. E embora nós, artífices humanos, sejamos limitados em relação ao ponto em que conseguimos trabalhar com o nível de exatidão demonstrativa nessas construções, Deus, o *Mechanicus Ominium*

¹⁸⁸ Prefácio (1ed). Ênfase do Newton.

¹⁸⁹ Confio aqui na pesquisa frustrada de Guicciardini por outras ocorrências desse termo. Guicciardini, 2009, p.298.

¹⁹⁰ Guicciardini sugere interpretar “mecânica universal” como formada de mecânica prática e mecânica racional. Mas ele mesmo reconhece que essa interpretação é apenas a mais “tentadora”, à primeira vista. Aqui sugiro uma interpretação mais ampla que a dele. Guicciardini, 2009, cap.13.

Perfectissimus, criador e engenheiro do mundo, não estaria sujeito a tal limitação, e construiria a natureza no mínimo com o mesmo nível de exatidão da nossa geometria. Assim, tudo parece ser construído por meio da arte mecânica. Figuras geométricas, máquinas de trabalho, e a própria natureza. E o que todas essas coisas teriam em comum seriam os “mecanismos de geração”, ou melhor, as formas de construção vinculadas a leis fixas e determinadas¹⁹¹.

A caracterização da mecânica universal feita no parágrafo anterior forneceria a delineação do entendimento de Newton sobre a ciência da mecânica, que acredito ser possível extrair desse contexto de estudos do Prefácio aos *Principia*. Creio que esse entendimento da ciência mecânica realmente dá conta de sustentar o segundo pilar do argumento do Prefácio, a saber, a tese da origem mecânica da natureza e a sua exatidão. Entretanto, a caracterização que delineei da *Mechanicæ Universalis* nos impulsiona a continuar refletindo sobre ela, tendo em vista a importância das implicações que essa concepção pode ter sobre o nosso estudo.

3.3 A MECHANICÆ UNIVERSALIS

A procura por uma concepção de mecânica no Prefácio aos *Principia* nos levou a caracterização do campo que Newton chamou de *mechanicæ universalis*. Como vimos, esse campo poderia ser caracterizado como a ciência da criação, construção e manipulação de *mekhanes*. Dispositivos ou estruturas construídas e definidas por leis determinadas e exatas. Essa concepção nos leva a duas consequências interessantes que merecem ser comentadas. A primeira consequência é sobre o entendimento do próprio argumento do Prefácio de Newton. Do que foi exposto até aqui é possível perceber que as duas teses de sustentação do argumento do Prefácio discutidas anteriormente poderiam ser reduzidas, com efeito, a uma única sobre a mecânica universal. Tanto a geometria, quanto a mecânica racional, as artes manuais e a própria natureza pertencem ao grande campo da mecânica universal. O argumento fundamental do Prefácio aos *Principia* se sustentaria, então, na tese da *mechanica universalis*: tudo surge da arte mecânica.

Mas a segunda consequência da concepção de mecânica universal do Prefácio é a que mais nos interessa. Essa consequência está associada ao impacto que essa concepção pode ter sobre o entendimento da relação entre a *geometria* e a *natureza*. Aparentemente, o que está implícito na concepção de *mechanicæ universalis* do Prefácio é que *é possível apreender parte da essência do mundo por meio da geometria*.

¹⁹¹ No caso das artes manuais, é claro, as leis seriam tão exatas quanto nos fosse possível.

A concepção de mecânica universal pressupõe que tanto a geometria, quanto as artes manuais, a mecânica racional e a natureza têm algo em comum. Todos esses domínios têm *a mesma origem*. Todos são construídos a partir de um projeto de seres racionais – artífices – que utilizam *mecanismos de geração* com leis fixas e determinadas a eles inerentes e, no caso particular das artes manuais, como já vimos, haveria uma carência de exatidão tão somente em virtude da nossa limitação. Mas essa limitação não afetaria o domínio da geometria. A geometria e a natureza possuiriam em comum o fato de serem construções mecânicas *e exatas*, e por isso carregariam nos seus *mecanismos de geração* leis determinadas e exatas. Isso nos leva a entender que em certas estruturas mais simples da natureza (nas quais se apresentassem movimentos que gerassem curvas eventualmente como aquelas já conhecidas na geometria) estariam operando *as mesmas leis* fixas e determinadas que também operam na geometria e que poderiam ser apreendidas por meio dos seus *mecanismos de geração*. Ademais, isso seria garantido, paralelamente, pela concepção empírico-material da geometria, que já foi discutida anteriormente. Uma vez que não haveria essencialmente uma diferença ontológica entre a geometria concebida da maneira material e o movimento de um corpo no mundo com dimensões relativas equivalentes aos pontos e linhas da geometria, as leis fixas e determinadas operando nos mecanismos de geração na natureza seriam precisamente *as mesmas* que operariam também na geometria mecânica. Disso se segue que haveria pontos de contato entre o mundo e a geometria; e seria possível apreendermos ao menos parte da essência do mundo por meio da geometria.

Mas cabe aqui dizer que do exposto acima *não se segue* que a essência do mundo é geométrica, no mesmo sentido que defenderam Platão, Galileu e muitos outros. A tradição que sustentou a crença na essência matemática do mundo surgiu provavelmente entre os pitagóricos e alcançou sua maturidade com Platão, mas talvez a sua versão mais conhecida está incorporada na famosa declaração de Galileu sobre o livro da natureza ser escrito em caracteres matemáticos. Será proveitoso lembrar aqui a conhecida passagem de Galileu para depois contrastar com a posição que estaria implícita no Prefácio aos *Principia*, tornando-a, assim, mais clara. Afirmou Galileu:

A Filosofia é escrita nesse grande livro que permanece sempre diante dos nossos olhos (eu me refiro ao universo), mas não o compreendemos se primeiro não aprendermos a linguagem e os símbolos com os quais é escrito. Esse livro é escrito na linguagem matemática, e os símbolos são triângulos, círculos e outras figuras geométricas, sem ajuda dos quais seria humanamente impossível compreender uma única palavra dele, e sem o qual permaneceríamos vagando ao longo de um escuro labirinto.¹⁹²

De fato, é muito tentador interpretar essa passagem de Galileu como uma defesa da essência geométrica do mundo. O grande livro da natureza estaria escrito em linguagem matemática, ou talvez, como teria defendido Platão, seria composto de formas geométricas, como triângulos, círculos e assim por diante. Não nos importa aqui discutir a precisão dessa interpretação, se Galileu ou Platão teriam realmente defendido isso ou não. O que nos importa é dizer que esse *não é* o caso de Newton no seu Prefácio. Da concepção de *mechanicae universalis* não se segue que a essência do mundo é geométrica. O que estaria implícito nessa tese fundamental, precisamente, não é que a essência do mundo é geométrica, ou deriva da geometria, mas, ao contrário, que a geometria é que deriva do mundo. É a geometria que surge do mundo, não o mundo, da geometria. Essa diferença é fundamental. A ontologia do mundo pode ser muito mais ampla, complexa, rica que a da geometria. Por isso importa agora dizer o que há tempos o leitor já deve ter concluído: que a concepção que emerge do Prefácio aos *Principia* sobre esse assunto é que essência do mundo não é *geométrica*; é *mecânica*. A categoria *mecânica*, para Newton, é necessariamente mais ampla que a *geométrica*, e, com efeito, a engloba. Por outro lado, é preciso enfatizar com veemência o que disso se segue. A partir da concepção da *mechanicae universalis* que emerge do Prefácio concluímos que há, também, geometria no mundo. O mundo não é geométrico; a essência do mundo não é geométrica; mas há, também, geometria no mundo. A geometria não está excluída do mundo. E no final das contas, os pitagóricos, Platão, Galileu, teriam certo grau de razão. No máximo teriam, talvez, exagerado em certa medida as coisas. Como teria opinado Aristóteles acerca de Platão: “ele mergulhou tão fundo na geometria que ficou fascinado demais por ela”.¹⁹³ De todo modo, eles estariam certos quanto à presença da geometria na estrutura do mundo.

Uma questão natural poderia surgir nesse ponto. A concepção de natureza como possuindo uma essência mecânica não seria nada além do óbvio no séc. XVII? Em que a concepção de *mechanicae universalis* do Prefácio de Newton se distinguiria do mero senso

¹⁹² “La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi (io dico l' universo), ma non si può intendere, se prima non s' impara a intendere la lingua, e conoscer i caratteri ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto”. Galilei, 1864, p.60.

¹⁹³ *Discorsi* [Drake], p.203.

comum da sua época? Para refletirmos sobre essa questão devemos perceber que, em primeiro lugar, a concepção de “mecânica” que Newton está usando no Prefácio não é necessariamente a mesma concepção difundida entre os modernos. Huygens, por exemplo, ao criticar a ideia de gravitação universal de Newton, o faz a partir do argumento de que essa ideia estaria precisamente se afastando da concepção da filosofia mecânica. “Mecânica”, para Huygens, bem como para Descartes e muitos outros, estava principalmente relacionada com a concepção de inteligibilidade pelo *contato*. O estudo do Prefácio até aqui nos mostra que a concepção de “mecânica” de Newton não é a mesma. Aparelmente, a mecanicidade do mundo está relacionada ao fato dele ser criado por um ser racional, o que implica na sua construção a partir de leis fixas e determinadas em sua estrutura, mas que não necessariamente precisariam ser concebidas pelo contato.

Mas convém lembrarmos que a concepção de mundo mecanicista dos modernos, ao enxergar a natureza como uma gigantesca *máquina*, a associava com os dispositivos pertencentes ao campo das *artes manuais*. O leitor deve notar que esse era um campo que tradicionalmente não lidava com conhecimentos e procedimentos *exatos*. Como os antigos já o haviam mostrado, os *poderes mecânicos* poderiam ser submetidos ao universo da quantidade. A mecânica racional dos antigos era um exemplo disso. Entretanto havia aí uma declarada restrição à inexatidão da mecânica prática ou das artes manuais. Aliás, é contra esse entendimento tradicional que Newton se volta no Prefácio. A mecânica racional é exata, a mecânica prática não. Os modernos entendiam a mecânica prática, as artes manuais, as máquinas construídas por essas ciências, não como possuindo uma estrutura exata, compostas por leis precisas, e assim, tampouco a natureza, sendo concebida dessa forma, necessariamente o possuiria. Tanto as máquinas das artes manuais quanto a natureza concebida à maneira mecanicista teriam a virtude da possibilidade de serem submetidas ao universo da quantidade, mas essa sujeição, aparentemente, poderia ser apenas no nível de uma *aproximação*; os objetos da mecânica poderiam ser *aproximados* daqueles da matemática, e assim haveria uma grande utilidade dessa ciência na investigação da natureza. É aparentemente nesse espaço interpretativo um tanto difuso que se localizaria a concepção de Descartes. A natureza é concebida mecanicamente. Essa concepção evidencia a possibilidade de submeter a natureza ao universo da quantidade. Evidencia a possibilidade do surgimento de uma *mathesis universalis*, uma ciência geral capaz de explicar tudo com respeito à ordem e quantidade, independente dos objetos que se considera, e que pode ser aplicada, sobretudo, à

natureza.¹⁹⁴ Mas Descartes parece hesitar entre a concepção da exatidão da própria natureza e da *mathesis* se tratar apenas de uma *aproximação* dos objetos concretos do mundo aos objetos idealizados da matemática. Essa concepção não parece ser aquela que está implicada no Prefácio de Newton.

Como já vimos, Newton é categórico em dizer que não há diferença de exatidão entre a mecânica e a geometria. Isso significa que a sua concepção se distingue daquela mecanicista convencional dos modernos pelo motivo de não conceber a natureza apenas como mecânica, mas como mecânica, *e exata*. A natureza é mecânica, e a mecânica é exata. Portanto, a natureza é mecânica *e exata*. Ponto final. Essa cláusula de exatidão da mecânica, e consequentemente da natureza, não me parece ser consensual na época de Newton. E ironicamente, nesse sentido, o mecanicismo de Newton parece ser ainda mais radical que o de Descartes. Não haveria uma *mathesis universalis*, como uma ciência geral da quantidade que poderia ser aplicada em tudo o que diz respeito à ordem e quantidade. Haveria, sim, uma *mechanicae universalis*, uma ciência universal e exata por natureza, a partir da qual tudo surgiria, incluindo a própria *mathesis*.

A concepção de Newton, portanto, não estaria relacionada apenas a uma questão de *aplicar* a matemática à natureza. A natureza e a geometria teriam uma essência comum, e em algumas situações poderiam se sobrepor perfeitamente. Defender que a essência do mundo é *mecânica*, para Newton, sob a sua concepção da *mechanicae universalis*, não leva a uma abordagem de matematização da natureza, tal como vários modernos a concebiam, e talvez o próprio Descartes. Na concepção de Newton, não estaria em jogo, em princípio, idealizações e aproximações. Embora a essência do mundo não seja geométrica, a geometria pode apreender parte da essência do mundo. Essa é a síntese da relação entre natureza e geometria que surge como consequência da concepção de *mechanicae universalis* do Prefácio de Newton. Como veremos em mais detalhes ao longo desse trabalho, o restante dos *Principia* também substancia essa compreensão.¹⁹⁵

A consequência da concepção de *mechanicae universalis* do Prefácio de Newton aos *Principia*, que foi discutida nos parágrafos anteriores, sugere, ainda, duas reflexões com as quais pretendo encerrar esse capítulo. A primeira reflexão é sobre o sentido da expressão “princípios matemáticos” que tomam parte no título da obra magna de Newton. A discussão precedente sugere a possibilidade de uma interpretação mais forte dessa expressão “princípios

¹⁹⁴ A tese da *mathesis universalis* é apresentada por Descartes em *Regras para direção do espírito*. Veja também Paty, 1998.

¹⁹⁵ Sobre a diferença entre a concepção de mecanicismo de Newton e de outros filósofos modernos como Descartes e Leibniz, veja os capítulos 12 e 13.

matemáticos”, e especialmente do termo “princípios”. A segunda reflexão é sobre o método de Newton. A concepção de *mechanicae universalis* sugere uma forma peculiar de entender o método de Newton nos *Principia*, e uma chave interpretativa útil que guiará essa pesquisa.

3.4 PRINCÍPIOS MATEMÁTICOS: EM QUE SENTIDO?

Os esclarecimentos adicionais que foram feitos sobre a *mechanicae universalis* na seção anterior nos levam, talvez, à principal questão que poderíamos levantar sobre este estudo do Prefácio aos *Principia*. Haveria algum sentido mais profundo na expressão “princípios matemáticos” que Newton poderia ter em vista ao propor o seu tratado? Quais seriam os sentidos possíveis para essa expressão, considerando a investigação que foi apresentada até aqui?

Poderíamos entender os “princípios matemáticos” em pelo menos quatro sentidos básicos. Primeiro, num sentido mais genérico. “Princípios” como *regras*, *diretrizes* ou *leis*. Nesse sentido, os “princípios matemáticos” denotariam simplesmente “leis matemáticas”, o que não distinguiria o trabalho de Newton dos demais modernos que estavam “submetendo os fenômenos da natureza a *leis matemáticas*”. Conforme argumentei ao longo de toda essa primeira parte¹⁹⁶, esse sentido não faz plena justiça ao que Newton está propondo nos *Principia*.

O segundo sentido em que a expressão “princípios matemáticos” poderia ser entendida é como relacionada a *causa* dos fenômenos da natureza. Os “princípios matemáticos” corresponderiam a uma geometria cultivada especialmente para investigar as *causas* dos fenômenos – as forças – a partir dos fenômenos dos movimentos. Ou seja, os resultados matemáticos apresentados por Newton nos *Principia* mereceriam o título de “princípios” pelo fato de terem uma importância fundamental na investigação das *causas* dos fenômenos da natureza. Esse seria o segundo sentido. Mas esses resultados matemáticos mereceriam esse título não apenas por isso. A essa altura também já somos capazes de perceber que esse uso da matemática na investigação das causas dos fenômenos só é possível porque os “princípios matemáticos” são também “princípios mecânicos”, uma vez que a própria geometria tem origem na mecânica. Corrobora essa interpretação não apenas a discussão que foi feita até aqui, mas também os sinônimos usados por Newton no Prefácio para substituir a expressão “princípios matemáticos”. Em uma ocasião ele substitui os “princípios matemáticos” por

¹⁹⁶ Principalmente na seção 1.2.3.

“proposições gerais”; em outra ele substitui por “princípios mecânicos”. Lembremos das passagens:

E por essa razão eu ofereço esse trabalho como os *Princípios Matemáticos* da Filosofia [Natural]. Porque toda a dificuldade da filosofia natural consiste nisso – a partir dos fenômenos dos movimentos investigar as forças da natureza, e então, a partir dessas forças, demonstrar os outros fenômenos; é para esse fim que as *proposições gerais* no primeiro e segundo livros são direcionadas. (...) E quem dera pudéssemos derivar o restante dos fenômenos da natureza pelo mesmo tipo de raciocínio a partir de *princípios mecânicos* (...).¹⁹⁷

Percebemos, então, que seria possível entender que quando Newton fala de “*princípios matemáticos* da filosofia natural” ele estaria querendo dizer simplesmente “*princípios mecânicos* da filosofia natural”, que poderiam ser resumidos nas *leis do movimento* e nos teoremas delas derivados. Em suma, as *leis do movimento* seriam os “princípios mecânicos” por meio dos quais seria possível partir dos *efeitos* e chegar às *causas* dos movimentos da natureza; mas uma vez que a geometria tem origem na mecânica esses princípios *mecânicos* também poderiam ser chamados de princípios *matemáticos*. Esse é o terceiro sentido que poderíamos entender da expressão “princípios matemáticos” de Newton, e nessa perspectiva esses princípios não se distinguiriam tanto dos princípios das ciências empíricas.

O terceiro sentido que poderia ser atribuído aos “princípios matemáticos” é o sentido derivado das ciências demonstrativas. Como veremos no capítulo 4, geralmente uma ciência matemática era desenvolvida pelo método axiomático, e isso implica obter todos resultados de maneira dedutiva a partir de “primeiros princípios”, que seriam axiomas matemáticos. Inegavelmente os *Principia* foram escritos à maneira axiomática, e ao menos em certo sentido os “princípios matemáticos” estão relacionados ao método axiomático.

Esses três sentidos poderiam esgotar a nossa reflexão e nos darmos por satisfeitos nesse ponto. Mas sabemos que o termo “princípio”, em filosofia, também é utilizado frequentemente no sentido metafísico de “essência”, de “real”, ou de “realidade absoluta”. Se tomássemos os “princípios matemáticos” de Newton num sentido mais forte, o Prefácio poderia estar sugerindo que esses “princípios” estariam apresentando, em alguma medida, a essência do mundo. Então nos perguntamos: seria possível que Newton, ainda que sutilmente, estivesse propondo algo como os *princípios matemáticos do mundo*? Como vimos na seção anterior, a concepção de *mechanicae universalis*, que também pressupõe uma concepção material da matemática, nos leva a conclusão de que a geometria mecânica nos informa, pelo menos potencialmente, sobre uma parcela da essência do mundo. Nesse sentido, descobrir e

¹⁹⁷ Prefácio (1ed). Grifos meus.

explicitar as leis dos mecanismos de geração das curvas geométricas análogas aos movimentos da natureza seria equivalente a explicitar os princípios matemáticos *do mundo*. Mas não precisaríamos ir tão longe assim. Sejam um pouco mais moderados dizendo, por exemplo, que a matemática, na pior das hipóteses, nos aproximaria do real; e não nos afastaria dele.

A esse respeito é conveniente nos lembrarmos novamente do realismo de Galileu. O realismo matemático do filósofo italiano, conforme nos mostraram vários de seus comentadores, não repousa somente na passagem sobre o livro da natureza que citamos anteriormente, que facilmente poderia ser considerada como uma hipérbole poética. Quando o aristotélico Simplicio afirma no *Discorsi* que as entidades matemáticas "se aplicam muito bem no abstrato, mas não funcionam quando aplicadas aos assuntos sensíveis e físicos", e que os matemáticos podem provar suficientemente bem em teoria que "a esfera toca um plano em apenas um ponto"¹⁹⁸, mas que na prática "as coisas acontecem de outro modo", ele encontra resposta mordaz do seu debatedor – que representa Galileu – que afirma que apenas "pessoas ignorantes acreditam que uma esfera física toca um plano em mais de um ponto". Além disso, apresenta a conclusão de Sagredo que reitera a impossibilidade referida no fim da famosa citação que cotejei acima: "Deve-se admitir que procurar lidar com problemas físicos sem a geometria é intentar o impossível".¹⁹⁹

Galileu perseguiu assiduamente uma lei matemática para a queda dos corpos porque ele acreditava que a natureza *possuía* uma lei exata que regulava esse fenômeno. E não é demais lembrar nesse contexto que tanto Descartes quanto Cavalieri fizeram fortes objeções à identificação que Galileu fez das entidades matemáticas com os corpos físicos reais. Para Descartes, a lei galilaica da queda dos corpos era uma mera idealização matemática, que se *afastava* da realidade física das coisas, não que se *aproximava*. Porém, como nos informa Shea, mesmo com a crítica cartesiana, Galileu, Gassendi, e muitos outros, jamais deixaram de acreditar que a lei da queda dos corpos era realmente verdadeira²⁰⁰. Shea conclui acerca do filósofo italiano: "Galileu nunca hesitou na sua fé na matemática como a fonte das noções que nos permitem conhecer o real mundo da natureza. Ele percebeu que a física poderia ser completamente capturada pela linguagem da geometria".²⁰¹

¹⁹⁸ "*Sphaera tangit planum in puncto*".

¹⁹⁹ *Discorsi* [Drake], p.203.

²⁰⁰ O próprio Newton, nos *Principia*, também não demonstra dúvidas da verdade da lei de Galileu, tanto que a usou como confirmação da sua teoria, sem necessidade de discussão.

²⁰¹ Shea, 2004, p. 81.

As observações acima são importantes porque, primeiro, Galileu foi um dos grandes influenciadores da concepção de geometria mecânica que vários matemáticos aderiram, inclusive os ingleses. Segundo, porque coloca em perspectiva o ferrenho anti-cartesianismo de Newton, que os comentadores da sua obra têm destacado. Como Guicciardini chamou a atenção, a rejeição de Newton a Descartes parece ter origens nas suas concepções a respeito da matemática²⁰². A resistência de Newton em ser associado como nomes como Descartes e Leibniz, bem como as suas amplas reservas contra a álgebra e a nova análise emergente, estavam fortemente vinculadas com à sua concepção empírico-realista da matemática que estaria associada, por sua vez, com os nomes de Hobbes, Barrow e o próprio Galileu. Não seria tão admirável, no final das contas, que Newton tenha evitado citar o nome de Descartes nos *Principia*; e até mesmo num caso tão difícil de se esquivar quanto o do *princípio de inércia*²⁰³ (que ele havia aprendido nos *Princípios da Filosofia* de Descartes) ele tenha preferido atribuir os créditos a Galileu que ao filósofo francês. Galileu representava alguém a quem Newton podia se vincular; Descartes, não. E isso, aparentemente, devido as suas concepções sobre a matemática e a sua íntima relação com o mundo. Galileu acreditava que a matemática nos aproximava da realidade das coisas. Descartes acreditava que ela nos afastava.

Por essa razão nos perguntamos se os “princípios matemáticos” propostos nos *Principia* não poderiam significar mais do que um mero instrumento para nos ajudar a investigar as causas de fenômenos naturais, ou uma mera referência à terminologia tradicional das ciências matemáticas. Se Newton possuía uma concepção de que Deus construiu mecanicamente o mundo de maneira exata, e que poderíamos *imitar* algumas dessas construções com o auxílio da geometria mecânica, as causas mecânicas encontradas nessas construções geométricas poderiam realmente informar as *verdadeiras causas* dos fenômenos investigados da natureza, e por isso mesmo mereceriam o título de “princípios”, no seu sentido mais forte. Essas pistas nos fazem pensar que é bem possível que, ao apresentar os “princípios matemáticos da filosofia natural”, Newton acreditasse, mesmo não declaradamente, que estivesse apresentando os *princípios matemáticos do mundo*. Mas é evidente que ainda é cedo para uma conclusão dessa monta. Por ora, acredito que as reflexões sobre essa possibilidade de interpretação dos princípios matemáticos podem se converter numa chave útil para guiar a investigação sobre o método ao longo do tratado. E será recorrendo sobre isso que pretendo concluir a primeira parte dessa pesquisa.

²⁰² Guicciardini, 2009, p.315.

²⁰³ Trata-se da primeira e segunda *leis da natureza*. A denominação “lei da inércia” não é de Descartes.

3.5 REFLEXÕES PRELIMINARES SOBRE O MÉTODO DOS *PRINCIPIA*

A discussão feita até aqui sobre o Prefácio de Newton aos *Principia* tem, evidentemente, muitos desdobramentos interessantes. Nesse trabalho, interessa-me principalmente os desdobramentos que se relacionam com o método. Gostaria de introduzir duas questões que poderiam ser levantadas em relação ao método a partir desse estudo do Prefácio. Eis a primeira delas: o programa metodológico de filosofia natural que emerge do argumento do Prefácio de Newton é coerente com o procedimento efetivamente seguido nos *Principia* e com os comentários mais famosos, inseridos a partir da segunda e terceira edição? Em outras palavras, os comentários do Prefácio à primeira edição são fieis em relação aos aspectos mais inovadores e relevantes do projeto de Newton nos *Principia*? A leitura do Prefácio apresentada até aqui nos sugere uma resposta afirmativa, embora a sua confirmação exija, evidentemente, que o leitor acompanhe esse trabalho até o final.

A segunda questão. Como entender o método de Newton a partir da principal tese de sustentação do Prefácio, a tese da *mechanicae universalis*? Como entender o método de Newton a partir do programa de filosofia natural que emerge dessa tese? A concepção da *mechanicae universalis*, bem como do realismo matemático de Newton, oferecem de fato um bom itinerário para a compreensão da metodologia dos *Principia* de Newton? Novamente, a leitura apresentada do Prefácio até aqui nos sugere que sim. Com base na discussão realizada nesse capítulo é possível concluir que a tese da *mechanicae universalis* permite a Newton sustentar uma indistinção ontológica entre os princípios geradores da geometria e da natureza, os quais seriam, por sua vez, mecânicos. Assim, haveria a possibilidade de construir uma geometria mecânica em imitação às leis que relacionam movimentos e forças na natureza, de modo que o raciocínio matemático poderia ser incorporado no método da análise e síntese para investigar as causas dos fenômenos naturais. Esse seria o esquema do método empregado por Newton nos *Principia*, segundo o Prefácio, bem como o esboço dos seus principais fundamentos. O roteiro natural de investigação que se seguiria desse esquema seria (1) determinar as leis empíricas que relacionam forças e movimentos na natureza (que representariam de maneira mais próxima possível os princípios mecânico-matemáticos do mundo em relação às forças e movimentos); (2) construir uma geometria mecânica a partir desses princípios; (3) empregar a geometria mecânica em associação com o método da análise e síntese para investigar as causas dos fenômenos da natureza, ou, em outros termos, para investigar as “forças da natureza”. Conforme pretendo mostrar ao longo desse volume, em linhas gerais Newton seguiu esse roteiro nos *Principia*. Na *Parte 2* – a seguir – apresento

o Livro I dos *Principia* e veremos como Newton determinou as leis empíricas que relacionam forças e movimentos e as utilizou para construir uma geometria mecânica dinâmica. Na *Parte 3*, apresento o Livro III e como ele aplicou a geometria mecânica em conjunto com o método da análise e síntese para investigar as “forças da natureza”, e descobrir as causas dos movimentos planetários. Entremos, agora, no estudo do Livro I.

Parte 2.
Livro I dos Principia:
A geometria mecânica de forças

“Tanquam ex ungue leonem” (“Um leão se reconhece pelas garras”).

Johann Bernoulli, 1697, sobre o método matemático de Newton.

Na *Parte I* desse volume o Prefácio de Newton aos *Principia* foi analisado discutido detalhadamente. Conforme argumentei, no Prefácio está incorporado uma tese que defende uma origem mecânica comum tanto da natureza quanto da geometria, sendo possível, portanto, construir uma *geometria mecânica* cujos axiomas sejam análogos às leis que vinculam movimentos e forças na natureza. Essa “origem comum” entre a geometria e a mecânica permitiria que a geometria mecânica, a partir de seus axiomas, pudesse ser utilizada eficientemente para investigar as *causas* dos fenômenos naturais. Portanto, o Prefácio de Newton não seria apenas a apresentação de um tratado matemático, mas a apresentação de um novo programa de investigação em filosofia natural. Acima de tudo, no seu tratado Newton estaria inaugurando um “modo mais seguro” de argumentar em filosofia natural, fundado numa determinada metafísica da natureza, e numa determinada concepção da matemática e suas relações com o mundo natural, o que foi resumido na tese da *mecânica universal*.

O Livro I dos *Principia* é precisamente o livro no qual Newton estabelece os princípios desse “modo mais seguro” de argumentar. Esses princípios se resumem nos axiomas da sua geometria mecânica e nos teoremas deles derivados. Como esses axiomas deveriam ser estabelecidos rigorosamente em analogia com as leis do movimento da natureza, a primeira etapa dos *Principia* é apresentar precisamente esses princípios, que Newton chama de “leis ou axiomas do movimento”. Ainda que ele não se preocupe em discutir a validade dessas leis no seu tratado, um esboço dos fundamentos empíricos desses princípios é apresentado na forma de um escólio. Newton não ignora que a credibilidade do seu programa depende da validade dessas leis. Após introduzir as leis do movimento e um esboço dos seus fundamentos, ele estabelece esses princípios como os axiomas da sua geometria mecânica (ou da sua mecânica racional), e deriva deles uma sequência de teoremas e corolários que permite resolver um número considerável de problemas matemáticos imaginados, que se relacionam direta ou indiretamente com algumas situações semelhantes na natureza. Talvez o principal desses problemas seja o assim chamado “problema de Hooke”, formulado por Robert Hooke no fim da década de 1670, que indagava sobre as condições matemáticas das forças que regem os movimentos planetários, tal como haviam sido descritos por Kepler. A maior parte dos comentadores está de acordo a respeito desse problema ter sido a motivação inicial que eventualmente culminou na composição dos *Principia*.

A história acerca da composição original dos *Principia* é bastante conhecida. No verão de 1684, Edmond Halley visitou Newton em Cambridge para verificar se ele seria capaz de resolver um problema matemático que estava consumindo os seus esforços, assim como os de Hooke e Wren. O problema se resumia em descobrir a lei de força atuando num corpo que se

move numa trajetória elíptica. Halley se surpreendeu ao perceber que Newton sabia que a resposta era uma força que variava com o inverso do quadrado da distância. Ele já havia resolvido esse problema quando Hooke o propusera por meio de correspondência pessoal há alguns anos antes. Newton, contudo, não havia repassado a resposta para Hooke, e tampouco foi capaz de encontrar os detalhes da sua solução para apresentá-la a Halley durante a sua visita. Incentivado pelo astrônomo britânico, Newton preparou um breve tratado intitulado *De Motu* (Sobre o movimento) que submeteu à *Royal Society* alguns meses depois. Porém, como afirma Cohen, uma vez iniciado esse trabalho, Newton “não pôde conter o poder criativo do seu gênio, e o produto final desse esforço deu origem aos *Principia*”²⁰⁴. Newton não se limitou ao estudo do problema de Hooke, mas, ao contrário, aproveitando a ocasião desse problema colocou em prática um projeto muito mais ambicioso, um projeto que, como já foi mencionado, terminava não somente no argumento gravitação universal, mas em um novo programa de investigação em filosofia natural. De qualquer modo, o tratado *De Motu*, originalmente composto para resolver o problema de Hooke, constitui-se no núcleo principal do Livro I dos *Principia*. Além da solução desse problema específico, nesse livro Newton apresentou ferramentas matemáticas poderosas, métodos geométricos até então desconhecidos, problemas inéditos e, é claro, os fundamentos da sua mecânica racional, da sua “ciência do movimento a partir de forças”, ou, como tenho aqui chamado, da sua geometria mecânica análoga à natureza.

Nessa segunda parte do trabalho, o meu objetivo principal é mostrar como, exatamente, Newton construiu essa geometria mecânica em analogia com a natureza. Para atingir esse objetivo, inicialmente ofereço um breve capítulo introdutório sobre o “método axiomático dos *Principia*” (capítulo 4), para que o modo peculiar de apresentação dos *Principia* não obscureça a compreensão do leitor contemporâneo. A finalidade desse capítulo é apenas familiarizar o leitor com alguns termos técnicos do método axiomático e as características básicas dessa antiga abordagem que, não obstante, gerou alguns problemas terminológicos para Newton algumas décadas após a publicação dos *Principia*. Em seguida, no capítulo 5, apresento e discuto as “leis do movimento”, que Newton adotou como axiomas da sua geometria mecânica, bem como os fundamentos empíricos por ele mobilizados para sustentar a validade dessas leis. No capítulo 6, abro um parêntese para reforçar a transição entre as leis do movimento na natureza e os axiomas da geometria mecânica. Essa transição provavelmente foi considerada trivial por Newton nos *Principia*, razão pela qual ele não deve

²⁰⁴ Cohen, 1999, p.12.

ter se preocupado em desenvolvê-la. Aqui, entretanto, adicionei uma seção específica para destacar nitidamente essa transição, mostrando como seria possível usar as leis do movimento simplesmente para construir uma geometria, independente de qualquer interesse em se solucionar um problema em particular. E no capítulo 7 apresento detalhadamente a solução de Newton para o problema matemático dos movimentos planetários, tal como proposto por Hooke e Halley. Embora as proposições relativas à solução desse problema sejam uma fração pequena do Livro I dos *Principia*, apenas essas proposições são estritamente necessárias para a compreensão do argumento da gravitação universal no Livro III, como Newton mesmo nos informa²⁰⁵. Isso significa que a resolução completa desse único problema já será suficiente para ilustrar como Newton pode usar a geometria mecânica para investigar as causas dos fenômenos naturais no Livro III. No entanto, essa última etapa do procedimento de Newton nos *Principia* será apresentada somente na *Parte 3* desse volume, quando ingresso no estudo do Livro III.

Por fim, alerto que algumas vezes os desenvolvimentos matemáticos dessa segunda parte poderão se tornar extensos e enfadonhos para o leitor não especializado. Ainda que poderia tê-los incluído na forma de apêndices ao final, resolvi mantê-los no corpo dessa segunda parte por perceber que eles são fundamentais para uma compreensão precisa acerca do modo como Newton construiu a sua geometria mecânica, e, conseqüentemente, o seu método. Assim, em vez de recorrer aos apêndices, decidi informar o leitor sobre as passagens matemáticas que não seriam absolutamente necessárias de serem acompanhadas para uma compreensão geral do conteúdo desse volume. Para os leitores que se enquadram nessa situação, informo que o capítulo 7 – “A solução do Problema de Hooke” – pode ser omitida na leitura, com exceção de 7.1 e 7.7. Além disso, convém informar que várias figuras utilizadas nessa parte foram propositadamente construídas *à mão* e escaniadas, em vez de serem construídas digitalmente. Isso porque a matemática de Newton nos *Principia* é sobretudo a geometria, e esta, com efeito, na sua versão *mecânica*. Desenhar as figuras usando compasso, régua, fios e outros dispositivos mecânicos é percebido aqui como uma imersão importante para compreender o pensamento e o método de Newton. A exposição desse esforço, creio, pesa em favor das conclusões que aqui serão apresentadas.

²⁰⁵ Newton oferece esse conselho no pequeno texto introdutório ao Livro III dos *Principia*. “Eu não aconselharia a todos o estudo prévio de cada proposição desses livros [Livro I e II]; pois elas podem demandar muito tempo, até mesmo para os leitores com boa formação matemática. É suficiente que se leia cuidadosamente as Definições, as Leis do Movimento, e as primeiras três seções do primeiro livro. Pode-se, então, passar para esse livro [Livro III], e consultar as demais proposições dos primeiros dois livros à medida que as referências nesse último, e as ocasiões, assim exigirem”. MC, p.397.

Realizadas essas observações preliminares, é possível seguir com os conteúdos da presente etapa. Nessa etapa, basicamente, veremos que se confirma o projeto anunciado pelo Prefácio. É perfeitamente possível construir uma geometria mecânica de forças em analogia com as leis da natureza.

4 O MÉTODO AXIOMÁTICO DOS *PRINCIPIA*

4.1 O MÉTODO AXIOMÁTICO

Como se sabe, o chamado “método axiomático” é um procedimento bastante antigo, que consiste em deduzir rigorosamente o conhecimento, ou uma ciência, a partir de princípios sólidos e seguros conhecidos como “axiomas”. A origem precisa desse método é incerta, mas a maioria dos historiadores da matemática concordam que ele foi desenvolvido pelos geômetras antigos e já era praticado, ao menos informalmente, desde Tales de Mileto (VI a.C). Todavia, foi com a composição dos *Elementos* de Euclides (IV a.C), a célebre obra matemática escrita pelo pensador grego em treze livros, que o método axiomático foi consolidado e difundido definitivamente. A qualificação *elementos* não é exclusiva de Euclides, estando diretamente ligada aos elementos que se relacionam com o método axiomático. O método se resume em apresentar os conhecimentos da geometria em forma de proposições precisas e objetivas, preferivelmente numeradas, dividindo-as basicamente em “princípios” e “conclusões”²⁰⁶. Os “princípios” seriam os pontos de partida do conhecimento, sendo chamados geralmente de “axiomas” ou “postulados”²⁰⁷. As “conclusões” seriam o resultado rigoroso de um procedimento dedutivo a partir desses princípios, o que daria origem aos “teoremas”. Sob essa perspectiva, os *Elementos* de Euclides consistem num tratado geométrico rigorosamente arquitetado sobre o fundamento de primeiros princípios a partir dos quais se deriva a cadeia de teoremas matemáticos que dão origem ao que conhecemos hoje como Geometria Euclidiana²⁰⁸. Assim como Euclides, vários outros geômetras compuseram os seus próprios “Elementos”, sendo que o primeiro que se tem notícia são os *Elementos* de Hipócrates de Quios (V a.C). No caso particular de Euclides, temos um número expressivo de teoremas geométricos deduzidos a partir de cinco postulados, que vale a pena citar como exemplo.

Postulados.

1. Fique postulado traçar uma reta a partir de todo ponto até todo ponto.
2. Também prolongar uma reta limitada, continuamente, sobre uma reta.
3. E, com todo centro e distância, descrever um círculo.
4. E serem iguais entre si todos os ângulos retos.

²⁰⁶ *Usefulness*, p.102.

²⁰⁷ Abordo a diferença entre esses dois princípios mais adiante.

²⁰⁸ Os historiadores da matemática têm discutido largamente as lacunas no formalismo e no rigor dos *Elementos* de Euclides à luz dos padrões da lógica atual. Essa discussão, porém, não nos interessa nesse trabalho. Considero o “rigor” do método axiomático dos *Elementos* de Euclides apenas e tão somente em relação aos conhecimentos produzidos na sua época, ou, no máximo, até o quadro da ciência e lógica do século XVII.

5. E, caso uma reta, caindo sobre duas retas, faça os ângulos interiores e do mesmo lado menores do que dois retos, sendo prolongadas as duas retas, ilimitadamente, encontrarem-se no lado estão os menores do que dois retos.²⁰⁹

A partir desses cinco postulados, juntamente com 23 definições auxiliares e cinco “noções comuns”, Euclides demonstra toda a sua coleção de teoremas matemáticos. O método axiomático ilustrado magistralmente pelos *Elementos* de Euclides teve uma grande influência sobre os matemáticos de várias gerações seguintes. Ainda na antiguidade, Arquimedes aplicou o estilo euclidiano em vários dos seus estudos mecânicos, como por exemplo em *Sobre o Equilíbrios dos Planos*, onde ele apresentou a sua doutrina sobre as “balanças” e centros de gravidade partindo de sete postulados. Abaixo estão dois desses postulados, para dar uma ideia do espírito desse empreendimento:

Eu postulo o seguinte:

1. Pesos iguais a iguais distâncias estão em equilíbrio, e pesos iguais a distâncias desiguais não estão em equilíbrio mas há uma inclinação em direção ao peso que está numa maior distância.
2. Se, quando pesos a certas distâncias que estão em equilíbrio, algo for adicionado a um deles, não mais estarão em equilíbrio, mas haverá uma inclinação em direção do peso no qual algo foi adicionado.²¹⁰

Na Idade Média a influência do estilo euclidiano pode ser percebida pelo comentário de Proclo aos *Elementos* de Euclides, no qual o renomado comentador ressalta as virtudes da forma de apresentação e justificação do método axiomático. Ele afirma que um tratado escrito à maneira dos *Elementos*

(...) deve se livrar de tudo o que é supérfluo (pois isso é um obstáculo à aquisição do conhecimento); deve selecionar tudo o que abrange o assunto ... (pois isso é de suprema serventia para a ciência); deve ter em grande consideração a clareza e a concisão (pois a sua falta gera problemas ao nosso entendimento); (...) a sua perfeição orgânica e a clareza são asseguradas pela progressão do mais simples para o mais complexo (...). Uma vez que, partindo dos elementos, estaremos aptos da mesma forma para adquirir o conhecimento de outras partes dessa ciência, enquanto que sem eles nos seria impossível chegar a uma compreensão de um assunto tão complexo (...).²¹¹

Proclo afirma que coisas “supérfluas”, falta de clareza e concisão são “obstáculos à aquisição do conhecimento”, causam “problemas ao nosso entendimento”, e o método axiomático, em contrapartida, expurga esses vícios da argumentação, reunindo somente o essencial. Além

²⁰⁹ Euclides, 2009, p.98. Tradução de Irineu Bicudo. Veja também a tradução de Heath em Euclid, 1968, vol. 1, p.154-155.

²¹⁰ Arquimedes, 1897, p.189.

²¹¹ Proclus, *Comentário ao livro I dos Elementos*, apud Heath, 1968, p. 115,116.

disso, a “perfeição orgânica” e sistemática assegurada pela progressão do conhecimento “do mais simples para o mais complexo”, torna viável se chegar a resultados que, de outra maneira, não seriam possíveis. Dessa citação de Proclo, pode-se perceber como o método axiomático já era visto como um modelo de rigor e precisão a ser seguido.

No início da modernidade a forma de apresentação e justificação axiomática se tornou praticamente canônica nas ciências matemáticas²¹². Sua influência se espalhou também para outros campos de conhecimento. Copérnico, Kepler, Galileu, Huygens e muitos outros nomes de destaque escreveram seus tratados utilizando uma estrutura axiomática inspiradas em Euclides e Arquimedes. Na Terceira Jornada do *Discorsi* de Galileu, por exemplo, o matemático italiano construiu a sua argumentação a partir de quatro axiomas que foram mobilizados posteriormente na demonstração da “lei dos números ímpares”, como Galileu chamou a sua lei da queda dos corpos. Eis os quatro axiomas do filósofo de Pisa:

Axiomas.

1. No caso de um mesmo movimento uniforme, a distância percorrida durante um intervalo de tempo mais longo é maior que a distância percorrida durante um intervalo de tempo menor.
2. No caso de um mesmo movimento uniforme, o tempo requerido para percorrer uma distância maior é mais longo que o tempo requerido para percorrer uma distância menor.
3. No caso de um mesmo intervalo de tempo, a distância percorrida numa velocidade mais alta é maior que a distância percorrida numa velocidade mais baixa.
4. A velocidade requerida para percorrer uma distância mais longa é maior que aquela requerida para percorrer uma distância mais curta durante o mesmo intervalo de tempo.²¹³

Partindo desses quatro axiomas e de uma definição de “movimento uniforme”, Galileu demonstrou a sua lei da queda dos corpos graves, que afirma ser a velocidade de um corpo em queda proporcional ao quadrado do tempo de queda.

Assim como a maior parte dos tratados matemáticos do seu tempo, a obra magna de Newton não seguiu uma orientação diferente. Ele foi construído sob uma estrutura axiomática. Antes de entrarmos no detalhamento dessa estrutura, entretanto, é mister especificar mais alguns elementos do método axiomático que terão relevância na apresentação do Livro I.

²¹² Uma exceção à regra seria a *Geometria* de Descartes.

²¹³ *Discorsi* [Crew-Salvio], p. 154-155. Tradução minha.

4.2 ELEMENTOS DO MÉTODO AXIOMÁTICO

Como foi apresentado há pouco, o método axiomático consiste na estruturação e justificação do conhecimento com um maior rigor lógico, dividindo as proposições de uma ciência em duas categorias básicas, a saber, os “princípios” e as “conclusões”. A virtude mais evidente desse método é que a validade das conclusões é assegurada pela validade dos princípios. Conforme ensina Barrow a esse respeito, “toda força de qualquer argumento demonstrativo é fundamentado na certeza e evidencia dos primeiros princípios”.²¹⁴ Se o proponente apresenta pontos de partida seguros, as conclusões seguem-se necessariamente. Naturalmente, essa característica do método axiomático coloca em relevo a “os primeiros princípios”, uma vez que todo o sistema axiomático dependerá do grau de certeza assumido para esses princípios. À vista disso, convém detalharmos um pouco mais a doutrina dos primeiros princípios.

Nos *Segundos Analíticos*, Aristóteles forneceu uma das análises mais valiosas e influentes sobre o método axiomático. Juntamente com os tratados matemáticos exemplares de Euclides e Arquimedes, entre outros, esse texto de Aristóteles tornou-se o pano de fundo básico que orientava a maior parte da educação matemática na Europa nos séculos XVI e XVII. Nesse escrito, Aristóteles aborda o “método das ciências demonstrativas” e, em particular, faz uma esclarecedora discussão sobre a espécie e natureza dos primeiros princípios. Afirma Aristóteles:

Pois toda a ciência demonstrativa está relacionada com três coisas, (1) as coisas que se assume que existam, a saber, o *genus* (assunto-objeto) em cada caso, as propriedades essenciais que ciência investiga, (2) os assim chamados axiomas comuns, que são as fontes primárias da demonstração, e (3) as propriedades em relação às quais tudo o que é assumido é o significado de termos respectivamente usados. (...). Mas ainda assim é verdade que há três coisas naturalmente distintas, o assunto-objeto da prova, as coisas provadas, e os axiomas a partir dos quais as provas se iniciam.²¹⁵

Aristóteles ensinou que os primeiros princípios são proposições imediatas e indemonstráveis. “Por primeiros princípios de cada *genus* eu quero dizer aqueles cuja verdade não é possível provar”²¹⁶, explica o filósofo grego. A justificativa fornecida por ele é simples: caso uma ciência não comece de princípios indemonstráveis os passos demonstrativos seriam infinitos²¹⁷. Toda a ciência deve partir, por conseguinte, de princípios indemonstráveis. Dentre

²¹⁴ *Usefulness*, p.102.

²¹⁵ *Anal. Post.*, Livro I. 2, 72a 14-24, apud Heath, 1968, p.118.

²¹⁶ *Ibid*, p.117.

²¹⁷ *Ibid*, p.119.

os primeiros princípios Aristóteles distingue aqueles que são comuns a todas as ciências e aqueles que pertencem a uma ciência particular.

Agora, das premissas usadas nas ciências demonstrativas algumas são peculiares a cada ciência e outras comum (a todas), as últimas sendo comuns por analogia, porque é claro que elas são realmente úteis na medida em que são aplicadas ao assunto-objeto incluído sob uma ciência particular.²¹⁸

Esses princípios podem ser classificados em quatro espécies: “axiomas”, “postulados”, “hipóteses” e “definições”. Os axiomas são princípios imediatos, auto-evidentes, necessários e comuns a todas as ciências²¹⁹. Aristóteles usa termos alternativos para designar um axioma em outras passagens e textos. Por vezes ele os chama de “axiomas comuns”, “coisas comuns” ou “opiniões comuns”. Os postulados e as hipóteses já são princípios assumidos, não possuindo, portanto, o mesmo estatuto dos axiomas. Via de regra, os postulados e hipóteses seriam os pontos de partida da maior parte das ciências particulares. Aristóteles também esclarece a diferença entre um postulado e uma hipótese:

Agora, qualquer coisa que o professor assuma e, embora sendo objeto de prova, não prove para si mesmo, é uma hipótese se a coisa assumida é acreditada pelo aprendiz, e é além disso uma hipótese, não absolutamente, mas relativamente para um pupilo particular; mas, se ao mesmo tempo é assumida quando o aprendiz ou não tem qualquer opinião sobre o assunto ou tem opinião contrária, é um postulado.²²⁰

Da passagem citada acima é possível perceber que para Aristóteles a diferença entre o postulado e a hipótese está na concordância entre o professor e o aprendiz. Se professor e aprendiz concordam acerca do que se supõe teríamos uma *hipótese*. Se o aprendiz não tem opinião a respeito ou não concorda com o professor teríamos um *postulado*.

No seu comentário aos *Elementos*, Proclo oferece uma síntese do ensino de Aristóteles sobre as ciências demonstrativas que pode nos ser proveitosa nesse momento.

²¹⁸ *Anal.Post.* I. 6, 74b 5, apud Heath, p.117.

²¹⁹ Estou seguindo a interpretação de Heath, op.cit., p. 119.

²²⁰ *Anal. Post.* I. 2, 72a 14-24, apud Heath, op.cit., p.118.

O compilador de elementos na geometria deve fornecer separadamente os princípios da ciência, e em seguida as conclusões a partir desses princípios, não oferecendo qualquer explicação desses princípios mas apenas das suas consequências. Nenhuma ciência prova os seus próprios princípios, ou mesmo discorre acerca deles. Eles são considerados como auto-evidentes. (...) Assim, o primeiro passo essencial foi distinguir os princípios das suas consequências. (...) Depois ele [Aristóteles] dividiu os próprios princípios comuns em *hipóteses*, *postulados*, e *axiomas*. Pois cada um desses é diferente um do outro: um axioma, um postulado e uma hipótese não são a mesma coisa, como o inspirado Aristóteles em algum lugar afirma. Mas, sempre que o que é assumido e ordenado como um princípio e seja tanto conhecido pelo aprendiz como o tenha convencido, tal coisa é um axioma; por exemplo, a afirmação de que coisas que são iguais à mesma coisa também são iguais entre si. Quando, por outro lado, o pupilo não tem a noção do que lhe foi dito (...), mas estabelece e consente que seja assumido, tal assentimento é uma hipótese. Assim, não preconcebemos por virtude de uma noção comum, e sem que seja ensinado, que o círculo é tal e tal figura, mas, quando somos informados, assentimos sem demonstração. Quando, novamente, o que é asserido é desconhecido e assumido mesmo sem a concordância do aprendiz, então, ele afirma, chamamos isso de *postulado*.²²¹

Embora Proclo não mencione as “definições” entre os primeiros princípios, Aristóteles faz alguns comentários sobre elas nos *Segundos Analíticos*. No entanto, o texto aristotélico parece não lhes conferir um papel tão importante quanto os três princípios elencados anteriormente. Aparentemente as *definições* teriam mais uma função de apoio e suplementação aos princípios e ao sistema axiomático como um todo. A principal exigência acerca delas é que sejam entendidas. Afirma Aristóteles:

Agora, as definições não são hipóteses, pois elas não asserem a existência ou a não existência de qualquer coisa, enquanto que as hipóteses estão entre as proposições. As definições requerem apenas que sejam entendidas: uma definição é portanto não uma hipótese, a não ser, com efeito, que seja afirmado que qualquer discurso audível é uma hipótese. Uma hipótese é aquela [afirmação] a partir da qual a verdade, se assumida, pode levar ao estabelecimento de uma conclusão.²²²

A essa altura é importante que se diga que a descrição aristotélica do método das ciências demonstrativas e, em particular, as distinções e caracterizações de Aristóteles para os axiomas, postulados, hipóteses e definições, conforme apresentadas acima, não passaram sem muitas polêmicas ao longo das várias gerações de comentadores dos *Segundos Analíticos*. Aparentemente não havia um consenso no entendimento dos geômetras acerca de cada um dos termos analisados por Aristóteles. Por não haver uma regra definindo cada conceito, ao que parece cada matemático usava os termos mencionados acima mais ou menos à sua própria maneira. Por exemplo, apenas três dos postulados de Euclides se alinha com a caracterização aristotélica de postulado. Alguns matemáticos chamavam de postulados o que outros chamam de axiomas, e vice-versa. Alguns incluíam as definições entre os princípios; outros a

²²¹ Proclus, op. cit., apud Heath, op.cit., p.121.

²²² *Anal. Post.* I. 2, 72a 14-24, apud Heath, op.cit., p.119.

excluía²²³. De todo modo, a compreensão mais geral parece relacionar os axiomas com princípios auto-evidentes e consensuais, e os postulados e hipóteses, com princípios que são *assumidos* como verdadeiros. Mais adiante precisaremos entrar no que Newton parece entender por esses termos, tal como eles se apresentam nos *Principia*, mas por ora é suficiente essa exposição preliminar.

A respeito das proposições que pertencem à categoria das “conclusões” na estrutura axiomática cabe agora distinguir entre “teoremas” e “problemas”. Os teoremas são consequências que se seguem diretamente das premissas e devem ser demonstradas com base na dedução rigorosa a partir dos primeiros princípios previamente estabelecidos. Depois que um teorema é demonstrado ele adquire a força de um princípio, e assim pode ser usado como princípio de demonstração de outro teorema. Os problemas são exemplos de aplicação dos princípios e dos teoremas em situações concretas ou imaginárias. Para que um problema seja resolvido ele deve ser igualmente deduzido a partir dos teoremas e princípios. Nas palavras de Proclo, nos “(...) os teoremas nós propomos para verificar e determinar o que se segue das premissas, enquanto que nos problemas somos instados a encontrar ou fazer alguma coisa (...)”.²²⁴ Usualmente, ao final da demonstração de um teorema ou da resolução de um problema se inserem as iniciais “Q.E.D.” (*Quod Erat Demonstrandum*) ou “Q.E.I.” (*Quod Erat Inveniendum*), “o que era para ser demonstrado” e o “o que era para ser encontrado”, respectivamente.

Outros termos técnicos que ainda merecem ser mencionados são os “Corolários”, “Lemas” e “Escólios”. Os “corolários” não passam de consequências retiradas dos teoremas. De um teorema podem ser deduzidas várias outras conclusões que mereçam ser destacadas ou explicitadas. Quando o autor julga necessário que se mostrem essas consequências ele lança mão de corolários ao teorema. O lema, por sua vez, é um resultado que é assumido sem que tenha sido demonstrado no corpo do tratado. Ele não se confunde com os “princípios” do tratado – que também não são demonstrados – porque geralmente se trata de um teorema já demonstrado em outro tratado, ou uma proposição que não requer necessariamente uma demonstração pelo fato de possuir um papel secundário em relação ao objeto central apresentado. No caso específico dos *Principia*, a maior parte dos lemas são resultados demonstrados em outros tratados ou por outros autores. Já os *escólios* não são elementos imprescindíveis num tratado estruturado axiomáticamente. Eles consistem simplesmente em anotações marginais, comentários do autor, observações, ou parênteses filosóficos que tem

²²³ Barrow, por exemplo.

²²⁴ Citado por Heath, op.cit., p.122.

mais o objetivo de fazer uma discussão livre sobre um resultado, teorema, ou uma parte qualquer do sistema axiomático em questão. Na introdução do Livro 3 dos *Principia*, Newton afirma que se utilizou largamente dos escólios nos dois primeiros livros para que o texto não ficasse muito áridos para os leitores que não fossem versados na matemática.

Para terminar essa parte preliminar sobre o método axiomático, resta-nos agora apresentar um esboço da estrutura axiomática dos *Principia*, a fim de que tenhamos um panorama geral desse tratado. Como já dissemos anteriormente, Newton não divergiu da tradição matemática da sua época, e escreveu os *Principia* seguindo fielmente o estilo axiomático dos seus antecessores, tais como Euclides, Arquimedes, Galileu, Huygens, entre outros. O seu sistema axiomático, no entanto – como já mostraram alguns comentadores²²⁵ – é deveras mais complexo que a maioria dos seus antecessores.

4.3 A ESTRUTURA AXIOMÁTICA DOS *PRINCIPIA*

Os *Principia* de Newton foi dividido em três livros. Os dois primeiros livros receberam o mesmo título: “O Movimento dos Corpos”²²⁶. O terceiro livro foi intitulado “O sistema do mundo”. À primeira vista os dois primeiros livros são tratados puramente matemáticos, enquanto o terceiro livro pode ser considerado uma obra de filosofia natural. Cada um dos livros foi subdividido em seções. O Livro I é o maior dos três livros, possuindo 14 seções. O Livro II possui 9 seções, e o Livro III está dividido em 3 grandes seções, embora elas não sejam assim designadas²²⁷. Conforme já foi mencionado anteriormente, o tratado de Newton foi todo estruturado de forma axiomatizada, ou, para usar as suas próprias palavras, “à maneira matemática”²²⁸.

Antes de iniciar propriamente o Livro I, Newton introduz o seu tratado com duas seções preliminares que apresentam precisamente os “princípios” da sua estrutura axiomática, assim como a maior parte dos trabalhos matemáticos da tradição euclidiana a que já nos referimos. A primeira seção é intitulada “Definições”, e a segunda, “Axiomas, ou Leis do Movimento”. Após essas duas seções preliminares, onde são estabelecidos os “princípios” sobre os quais a sua obra será erigida, inicia-se a primeira das 14 seções do Livro I. Nessa primeira seção, ainda de forma preliminar, Newton apresenta um conjunto de *lemas*

²²⁵ Veja Meli, 2010, por exemplo.

²²⁶ Com a diferença que o Livro II acrescenta um importante detalhamento, “nos meios resistentes”, que falarei logo adiante.

²²⁷ O Livro III está dividido em três partes, intituladas “Fenômenos”, “Regras para Filosofar” e “Proposições”.

²²⁸ Introdução do Livro III.

matemáticos que serão utilizados ao longo do seu tratado²²⁹. Só então, a partir da segunda seção, Newton inicia a série de 98 proposições que compõem o Livro I, das quais 50 proposições são *teoremas* e 48 são *problemas*.

O Livro II começa com uma nova série de proposições, mas trata-se de uma continuação do primeiro livro, como o seu próprio título já sugere. A principal diferença apresentada por Newton entre os dois primeiros livros está no *meio* em que os corpos se movimentam. No Livro II se considera o movimento dos corpos em “meios resistentes”, enquanto que no Livro I se considera o movimento dos corpos em meios em que não há resistência. No Livro III, por outro lado, a estrutura axiomática sofre uma leve modificação. O leitor deve se lembrar que nessa altura do tratado ocorre a transição da matemática para a filosofia natural. Newton introduz, desse modo, uma nova série de “princípios” numa seção intitulada “Hipóteses”. Por razões que comentarei mais adiante, na segunda e terceira edição do tratado de Newton essa seção inicial foi reestruturada e transformada em duas seções distintas, intituladas “Regras para Filosofar” (*Regulae Philosophandi*) e “Fenômenos” (*Phaenomena*). Para os meus propósitos nesse trabalho é importante não perder de vista a designação que Newton usou na primeira edição.

Convém agora fazer um resumo da estrutura axiomática completa do *Principia*. O tratado de Newton é composto por 3 axiomas e 8 definições, que formam o quadro dos “princípios” do Livro I; 9 hipóteses²³⁰, que se somam ao quadro dos “princípios” para o Livro III; 193 proposições, destas 111 teoremas e 82 problemas; 47 lemas e dezenas de escólios espalhados ao longo dos três livros. Como veremos em mais detalhe ao longo dessa e da próxima parte, no Livro I Newton apresenta os *princípios* do seu tratado e estudos matemáticos relacionados à hipótese dos planetas se moverem num meio sem resistência e sob a ação de uma força atrativa direcionada para um corpo central. No Livro II Newton apresenta seus estudos matemáticos relacionados a outra hipótese para o movimento dos planetas, a saber, a hipótese vorticial, com os planetas se movendo arrastados pela matéria desses vórtices. E no Livro III, após provavelmente concluir que a primeira hipótese é a única em concordância com princípios matemáticos apresentados, Newton aplica a sua geometria mecânica à situação concreta dos movimentos planetários do Sistema Solar a fim de deduzir as causas desses movimentos. Como sabemos, essa causa é a gravidade universal pela qual os

²²⁹ Trata-se do “método das razões primeiras e últimas”, um método matemático alternativo ao “método dos infinitesimais”, desenvolvido por Newton para evitar lidar com quantidades infinitamente pequenas.

²³⁰ Nove Hipóteses na primeira edição. Na terceira edição se tornaram 4 regras, 6 fenômenos e 1 hipótese. Veja a tabela 1 na seção 8.2.

planetas são atraídos para o sol e os satélites, para os planetas. Mas deixemos isso para o momento oportuno. Entremos, agora, nos *princípios matemático-mecânicos* de Newton.

5 OS PRINCÍPIOS MATEMÁTICO-MECÂNICOS

No capítulo 3 foi mencionado que Barrow desenvolveu vários métodos de geometria mecânica para resolver problemas geométricos. Ele considerou esses métodos vantajosos porque, primeiro, eles eram mais simples e gerais que aqueles da geometria tradicional; segundo, porque permitiam trabalhar com curvas mais complexas, como, por exemplo, a quadratriz e a espiral; e terceiro, e acima de tudo, porque possuíam um grande potencial de aplicabilidade na filosofia natural, uma vez que carregavam informações matemáticas sobre as *causas* do movimento. Um dos principais métodos de geometria mecânica utilizados por ele consistia na composição de dois movimentos perpendiculares que obedeciam a uma regra fixa, a partir da qual seria possível construir curvas de variados graus. Àquela altura, Barrow provavelmente já sabia que uma força provocava uma mudança no movimento ou na “celeridade” dos corpos e, portanto, de uma determinada curva descrita por um corpo, seria possível extrair informações sobre a força nele atuando. Em outras palavras, Barrow sabia que era possível construir um “método” para determinar as forças atuando nos corpos que se movem em trajetórias geométricas conhecidas na natureza. No entanto, para que um tal “método” pudesse ser concretizado, era necessário uma minuciosa investigação empírica para determinar as relações matemáticas exatas entre as forças e mudanças de movimentos na natureza, uma tarefa não tão simples de ser realizada. Como sabemos, Newton foi capaz de levar essa tarefa a cabo. Nesse capítulo será apresentado os resultados desse complexo empreendimento de determinar as leis que vinculam as forças aos movimentos na natureza. Numa primeira etapa serão apresentadas as três leis do movimento tal como formuladas nos *Principia*, complementadas por alguns breves comentários quando necessários. Em seguida se apresentará e se discutirá o escólio que Newton oferece a essas leis, no qual ele menciona os fundamentos empíricos que contam a favor da validade desses princípios. Por fim se mostrará como é possível construir uma geometria mecânica em analogia com as leis movimento, assim como Barrow vislumbrava, abrindo caminho para a compreensão do fundamento básico que sustenta o Livro I dos *Principia*.

5.1 LEIS DO MOVIMENTO

5.1.1 Primeira lei do Movimento

Nos *Principia* as famosas três leis do movimento foram apresentadas em forma de proposições objetivas, seguidas de uma breve explicação. Pela importância dessas leis, inclusive para o presente trabalho, vale a pena citá-las na íntegra, com as respectivas observações que Newton faz a cada uma. Diz o enunciado da primeira lei do movimento:

Lei 1. Todo corpo continua em seu estado de repouso, ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja compelido a mudar esse estado por forças impressas sobre ele.

Os projéteis continuam em seus movimentos, contanto que não sejam retardados pela resistência do ar, ou impelidos para baixo pela força da gravidade. Um pião, cujas partes coesas são continuamente desviadas dos seus movimentos retilíneos, não cessa a sua rotação, exceto quando é retardado pelo ar. Os corpos maiores dos planetas e cometas, encontrando menos resistência em espaços mais livres, preservam os seus movimentos, tanto progressivo quanto circular, por muito mais tempo.²³¹

Naturalmente, essa é a lei que hoje conhecemos como *lei da inércia*.²³² Como muitos historiadores já mostraram, essa lei constitui-se numa mudança conceitual significativa em relação à filosofia aristotélica²³³. Para Aristotéles, todo movimento (não natural) era entendido como gerado por meio da ação de um *motor*, uma força, e na ausência dessa força, não poderia haver movimento. Essa concepção foi sofrendo modificações ao longo do tempo para responder a vários problemas que surgiram – como, por exemplo, aqueles relacionados à influência da resistência do ar e a ação da gravidade no movimento. Uma das mais importantes modificações da doutrina aristotélica foi a introdução da ideia de *impetus*, na qual se concebia que uma força, uma vez aplicada num corpo, imprimia-lhe algo, um *impetus*, que mantinha o corpo em movimento mesmo depois de cessada a força, mas se corrompia gradativamente pela ação da resistência do ar e da gravidade. A doutrina do *impetus* ainda foi inicialmente admitida por Galileu, porém desde então a sua utilização foi progressivamente declinando em favor do que hoje conhecemos como inércia.²³⁴ Como se sabe, não foi Newton

²³¹ MC, p.13.

²³² Na época de Newton o termo “inércia” não era utilizado correntemente para designar essa lei. No entanto, na definição 3 Newton aplica a palavra “inércia” para designar uma propriedade dos corpos que seria responsável pelo comportamento expresso pela lei.

²³³ Por exemplo, Koyré, 1957; Cohen, 1961; Grant 2007.

²³⁴ Para mais detalhes sobre a lei da inércia e o seu contexto de consolidação histórica lei o Apêndice A. No momento, basta dizer que com a transição da doutrina da doutrina medieval do *impetus* para a inércia dos modernos, o movimento deixa de ser encarado como uma *mudança* (ocasionada pela implantação do *impetus*) e

quem formulou inicialmente essa lei, e, além disso, esse princípio já era amplamente estabelecido e aceito na sua época²³⁵. Por essa razão interessa-me nesse momento mais as observações de Newton sobre a lei do que o próprio enunciado em si, que pouco difere do Descartes²³⁶. Newton cita três exemplos de aplicação da primeira lei nas suas observações adicionais. (1) O exemplo do movimento dos projéteis; (2) o exemplo do movimento de rotação de um pião; (3) o exemplo do movimento dos planetas e cometas.

O primeiro exemplo lembra os trabalhos de Buridan e Galileu. Na sua teoria do *impetus*, Buridan defendeu que um projétil em movimento tinha o seu *impetus* corrompido pela resistência do ar e pela gravidade. Se não fosse pela ação desses dois fatores o *impetus* do corpo não seria corrompido e ele permaneceria no seu movimento²³⁷. Na Quarta Jornada do *Discorsi*, quando Galileu apresenta o seu estudo sobre o movimento dos projéteis, uma abordagem semelhante à de Buridan pode ser percebida. O movimento dos projéteis pode ser entendido como composto por dois movimentos: um horizontal e uniforme, e o outro vertical e uniformemente acelerado, embora ambos os movimentos, na prática, sejam “destruídos” pela resistência do meio²³⁸. Na observação de Newton sobre a primeira lei, ele afirma que os “os projéteis continuam em seus movimentos, contanto que não sejam retardados pela resistência do ar, ou impelidos para baixo pela força da gravidade”. Essa observação facilmente poderia ser identificada com os estudos de Buridan e Galileu.

O segundo e o terceiro exemplos fornecidos por Newton também têm um aspecto interessante. Ambos remetem, direta e indiretamente, aos movimentos dos astros. “Os corpos maiores dos planetas e cometas”, afirma Newton, “encontrando menos resistência em espaços mais livres, preservam os seus movimentos, tanto progressivo quanto circular, por muito mais

passa a ser compreendido como um genuíno *estado*, isto é, algo cuja presença ou ausência em nada afeta as qualidades intrínsecas da matéria nem pressupõe a anexação transitória de qualquer qualidade (*impetus*, *potência*, *força* etc.) extrínseca à sua própria natureza.

²³⁵ A primeira formulação mais próxima da que temos hoje é de Descartes. Mas é possível que esse princípio já fosse adotado tacitamente mesmo antes de Descartes.

²³⁶ O enunciado de Newton é muito próximo ao enunciado da primeira e segunda lei da natureza de Descartes. Alguns chegam a defender que foi plágio, uma vez que Newton não deu os créditos ao filósofo francês. Apresento uma perspectiva diferente no apêndice A.

²³⁷ “When a mover sets a body in motion he implants into it a certain *impetus*, that is, a certain force enabling a body to move in the direction in which the mover starts it, be it upwards, downwards, sideways, or in a circle. The implanted *impetus* increases in the same ratio as the velocity. It is because of this *impetus* that a stone moves on after the thrower has ceased moving it. But because of the resistance of the air (and also because of the gravity of the stone) which strives to move it in the opposite direction to the motion caused by the *impetus*, the latter will weaken all the time. Therefore the motion of the stone will be gradually slower, and finally the *impetus* is so diminished or destroyed that the gravity of the stone prevails and moves the stone towards its natural place. In my opinion one can accept this explanation because the other explanations prove to be false whereas all phenomena agree with this one”. Jean Buridan, *Quaestiones* sobre a Física de Aristóteles, apud Pedersen, 1993, p.210.

²³⁸ *Discorsi* [Crew-Salvio], p.250-251.

tempo”. E antes disso ele dá o exemplo do pião em rotação, que “não cessa a sua rotação, exceto quando é retardado pelo ar”. Não é difícil perceber que o brinquedo era um instrumento heurístico útil para imaginar o movimento de rotação dos astros.

Esses exemplos são interessantes por duas razões. Primeiro, porque o movimento eterno dos astros é aqui entendido como evidência da lei da inércia, ou seja, da permanência dos corpos em movimento, e o leitor deve lembrar que durante a vigência da tradição aristotélica as leis do mundo supralunar não eram as mesmas do mutável mundo terrestre. A *permanência* era uma característica fundamental daquele mundo. O exemplo de Newton, portanto, mostra bem o declínio dessa concepção. E o exemplo do pião reforça ainda mais esse fato. O movimento de rotação dos astros no céu é comparado ao movimento de rotação de um pião na terra. Busca-se uma mesma explicação para ambos. O pião é mantido girando por um minúsculo ponto de contato com o solo, cuja ação da resistência da superfície é mínima, restando tão somente a resistência do ar, que é atenuada pela sua forma e o seu movimento de rotação. Permanece, por isso, um longo tempo girando. Quanto mais se diminui a sua área de contato com o plano (até tornar-se, no limite, um único ponto) e aperfeiçoa-se a sua forma, tanto mais tempo o pião permanece no seu giro. No caso dos planetas, uma vez que no céu a resistência do meio é supostamente menor, os seus movimentos permanecem por muito mais tempo. Pião e planetas são subsumidos sob a mesma espécie de explicação.

A segunda razão pela qual esses exemplos são interessantes decorre do fato de serem exemplos de situações *imaginárias*. Inclusive o primeiro exemplo, dos projéteis. Todos os três exemplos têm em comum o fato de que são exemplos que dependem, em alguma medida, da imaginação. Em todos eles se demanda do leitor que imagine uma situação em que não há resistência do ar. Se não houvesse resistência do ar o movimento horizontal do projétil seria permanente e uniforme; se não houvesse resistência do ar o pião não pararia de girar; e pelo fato de não haver resistência no espaço interplanetário – ou ser ela muito pequena – os planetas continuam seus movimentos por um período indefinidamente longo de tempo. Nenhuma das três situações pode ser confirmada. É por essa razão que muitos filósofos da ciência contemporâneos consideram o princípio da inércia uma “lei vácuca”, ou, uma lei que possui uma “vacuidade empírica”, por assim dizer, que não pode ser nem validado nem invalidado pela experiência. A propósito desse conhecido entendimento contemporâneo gostaria de fazer duas considerações.

Em primeiro lugar é preciso notar que as observações que Newton faz ao enunciado das suas leis de modo algum devem ser entendidas como *evidências* ou justificativas para

esses princípios, mas tão somente como *esclarecimentos*. Nas observações de Proclo acerca do procedimento usual na construção de um sistema axiomático, citadas anteriormente, ele afirma que o “compilador de elementos na geometria deve fornecer separadamente os princípios da ciência, e em seguida as conclusões a partir desses princípios, não oferecendo qualquer explicação desses princípios, mas apenas das suas consequências”. E conclui a sua observação afirmando que “nenhuma ciência prova os seus próprios princípios, ou mesmo discorre acerca deles. Eles são considerados como auto-evidentes”. Mesmo que os princípios apresentados possam ser demonstrados, justificados ou debatidos (numa ciência superior, por exemplo), o procedimento comum era não discutir os seus fundamentos, mas tomá-los simplesmente como evidentes, caso contrário não deveriam ser considerados os “princípios” do sistema.

Barrow, comentando essa mesma passagem de Proclo, também segue essa orientação. Inicialmente ele assegura que – talvez com exceção dos princípios mais fundamentais da razão²³⁹ – seria mesmo muito difícil encontrar um princípio realmente indemonstrável. Em se tratando das várias ciências particulares, a maioria dos seus princípios são demonstráveis, e não só podem como devem ser demonstrados ao aprendiz quando assim for solicitado.²⁴⁰ Em seguida ele defende que, ainda assim, não cabe disputa sobre eles no interior de uma ciência. Eles devem apenas ser suficientemente aceitáveis e, caso não sejam, é preciso começar com princípios ainda mais elementares. Afirma Barrow:

Aristóteles ensina sabiamente (...) que os princípios de nenhuma ciência particular são necessária e simplesmente autoevidentes e indemonstráveis, mas apenas devem ser críveis e suficientemente manifestos para um bom preparo do ouvinte (...) ²⁴¹.

Barrow adota uma concepção mais pragmática dos primeiros princípios no seu discurso, mas a minha ênfase aqui é destacar que os princípios não são demonstrados no interior da ciência que eles se propõem a construir. Não obstante, o mentor de Newton ensina que se os princípios assumidos forem obscuros é mister ilustrá-los com exemplos²⁴². É isso o que aparentemente Newton está fazendo na apresentação das leis do movimento nos *Principia*. Ele se limita a *apresentar* – não *justificar* – os seus axiomas. Esse era o procedimento padrão na tradição axiomática. As observações adicionais que ele oferece visam apenas esclarecer, ou ilustrar, os princípios com alguns exemplos – algo que se tornará ainda

²³⁹ Ele cita o princípio da não contradição com exemplo de um princípio indemonstrável.

²⁴⁰ *Usefulness*, 1734.

²⁴¹ *Ibid*, p.106.

²⁴² *Ibid*, p.104.

mais evidente no caso das próximas leis. Os comentários de Newton sobre a primeira lei nessa passagem, portanto, não podem ser usados como argumento para defender a vacuidade da lei da inércia ou, pelo menos, a vacuidade empírica da explicação de Newton.²⁴³

Isso me leva à segunda consideração que devo fazer sobre esse ponto. Embora na estrutura axiomática não caiba justificar ou demonstrar os primeiros princípios, veremos que Newton não se furta de oferecer ao menos um esboço dos seus fundamentos num escólio que propõe ao final da apresentação das leis do movimento. Naturalmente, devido à necessidade de haver correspondência entre as suas leis e o comportamento dos corpos na natureza, necessidade essa imposta por seu próprio projeto de investigação em filosofia natural, Newton será impelido a apresentar, em linhas gerais, um panorama das evidências empíricas que permitem assegurar aquela correspondência até que ela possa ser, finalmente, estabelecida com a construção da teoria da gravitação universal²⁴⁴.

5.1.2 Força Inata e Força Impressa

Conforme foi afirmado anteriormente, na ordem de apresentação original dos *Principia* Newton introduziu primeiramente uma seção intitulada “Definições” e, em seguida, outra chamada “Axiomas, ou Leis do Movimento”. Omiti propositadamente a seção sobre as definições porque penso ser mais conveniente lançar mão delas somente à medida que forem se tornando necessárias, como é o caso agora. A apresentação adequada da segunda lei do movimento exige o estabelecimento prévio de algumas definições. Tratam-se das definições 1 a 4, que definem os conceitos de “quantidade de matéria”, “quantidade de movimento”, “força inata” e “força impressa”, respectivamente. Eis o enunciado das definições (sem os comentários adicionais de Newton):

Definições

1. A quantidade de matéria é a medida da matéria que surge da sua densidade e volume conjuntamente.
2. A quantidade de movimento é a medida do mesmo, que surge da sua velocidade e quantidade de matéria conjuntamente.
3. A força ínsita [*vis ínsita*], ou a força inata da matéria, é um poder de resistir, pelo qual todo corpo, na medida em que se encontra, permanece no seu presente estado, seja de repouso, ou de movimento uniforme em linha reta.
4. Uma força impressa é uma ação exercida sobre um corpo de modo a mudar o seu estado, seja de repouso ou movimento uniforme em linha reta.²⁴⁵

²⁴³ No apêndice A argumento contra a vacuidade empírica da lei da inércia.

²⁴⁴ O escólio às leis do movimento será apresentado na seção 5.2.

²⁴⁵ MC, p.1-2.

Todas as definições têm em comum o fato de estabelecerem alguma *quantidade* ou de alguma *propriedade* relacionada aos corpos. A definição 1 estabelece uma quantidade chamada “quantidade de matéria” ou *massa* de um corpo, que pode ser definida como o produto da sua densidade pelo seu volume. A *definição 2* estabelece a “quantidade de movimento”, que surge do produto da velocidade e da quantidade de matéria de corpo²⁴⁶. Numa linguagem mais familiar ao leitor contemporâneo:

$$m = dV \quad [1]$$

$$Q = mv \quad [2]$$

Na definição 3 a inércia é chamada por Newton de “força ínsita” ou “força inata” e é definida como uma propriedade dos corpos, um “poder” de resistir à mudança do seu estado, seja de repouso ou movimento uniforme em linha reta. O breve comentário de Newton a essa definição é bastante rico, mas por ora me limitarei a destacar somente o elementar. O “poder de resistir” surge somente na ação de uma força impressa no corpo, se opondo a essa força, e é “sempre proporcional ao corpo”, isto é, à massa do corpo.

$$F_{inata} \propto m \quad [3]$$

A definição 4 estabelece que a “força impressa” é uma ação exercida sobre um corpo a de modo a alterar o seu estado, seja de repouso ou movimento uniforme em linha reta. No comentário a essa definição Newton enfatiza que essa força está presente somente na *ação*, não permanecendo no corpo ao extinguir a ação. Essa observação parece ter o objetivo de afastar qualquer identificação dessa força com a doutrina do *impetus*.

Estabelecidas essas definições podemos agora passar à segunda lei do movimento. Como veremos a seguir, a segunda lei do movimento depende das noções de “força impressa”, “força ínsita”, “quantidade de matéria” e “quantidade de movimento”, que foram introduzidas nesta seção.

²⁴⁶Será útil perceber que frequentemente Newton diz “proporcional à matéria” ou “proporcional aos corpos” quando na verdade está se referindo à *quantidade* de matéria dos corpos, assim como diz “proporcional ao movimento” quando quer dizer proporcional à “quantidade de movimento”.

5.1.3 Segunda lei do movimento

Lei 2. A mudança de movimento é proporcional à força motriz impressa; e ocorre na direção da linha reta na qual a força é impressa.

Se qualquer força gera um movimento, o dobro dessa força irá gerar o dobro do movimento, o triplo dessa força irá gerar o triplo do movimento, quer essa força seja impressa integralmente de uma única vez, ou gradualmente e sucessivamente. E se o corpo estiver se movendo previamente, o novo movimento (uma vez que o movimento é sempre na mesma direção da força geradora) será adicionado ao original se o movimento for na mesma direção, e subtraído do original se for na direção oposta; se for numa direção oblíqua é combinado obliquamente de modo a produzir um novo movimento composto pela direção de ambos os movimentos.²⁴⁷

A famosa segunda lei do movimento é enunciada em duas partes. A primeira parte afirma que a mudança na quantidade de movimento de um corpo é proporcional à força motriz impressa sobre ele. A segunda, afirma a mudança na quantidade de movimento do corpo ocorre na direção da força impressa no corpo. Conforme já foi muitas vezes ressaltado pelos comentadores, a segunda lei do movimento de Newton jamais foi enunciada na sua conhecida formulação contemporânea, $F = ma$, geralmente atribuída a Euler. Baseando-se estritamente no enunciado acima percebemos que Newton está simplesmente afirmando a proporcionalidade entre a força e a mudança na quantidade de movimento, algo que poderia no máximo ser expresso na linguagem simbólica atual como:

$$F \propto \Delta mv \quad [4]$$

O leitor familiarizado com a física notará que, para a formulação acima se aproximar da conhecida equação atual da segunda lei, seria necessário haver uma consideração sobre o intervalo de tempo de aplicação da força. Ou seja, o enunciado apresentado por Newton na segunda lei está se referindo a “forças impulsivas”, ou o que hoje chamaríamos de “impulsos” na linguagem da física, enquanto que a equação de Euler é uma formulação para “forças contínuas”, aplicadas ao longo de um intervalo de tempo determinado. Geralmente se aceita que o enunciado de Newton seria um caso particular da formulação euleriana quando o intervalo de tempo da ação da força é muito pequeno. Entretanto, como mostrou Westfall, essa leitura da segunda lei do movimento não se sustenta diante de uma análise cuidadosa análise dos *Principia*. Embora Newton não tenha realmente formulado $F = ma$, são várias as passagens que mostram Newton usando a sua segunda lei para o caso das forças contínuas.

²⁴⁷ MC, p.13.

Analisando algumas dessas passagens é possível argumentar, inclusive, que o enunciado de Newton é mais geral do que a equação de Euler.

Corroborando o que foi afirmado anteriormente, as observações de Newton que se seguem ao enunciado da segunda lei visam apenas esclarecê-la, não justificá-la. Ele afirma que se uma força gera uma mudança na quantidade de movimento de um corpo, o dobro dessa força gerará o dobro de mudança na quantidade de movimento, três vezes essa força gerará o triplo de mudança na quantidade de movimento e assim por diante. A observação que vem em seguida é importante: o enunciado anterior é verdadeiro “quer essas forças sejam impressas todas juntas, de uma vez, ou gradualmente e sucessivamente”. Em outras palavras, a quantidade de movimento será duplicada ainda que a força tenha a sua intensidade duplicada por ser aplicada duas vezes sucessivamente. A importância dessa nota se coaduna com o que Newton diz na sequência. Caso o corpo já esteja em movimento antes da impressão da força, esta será somada ou subtraída ao movimento do corpo dependendo da sua direção, a favor ou contra o movimento inicial. Caso a força impressa seja oblíqua ao movimento, haverá uma mudança da direção do movimento do corpo que poderá ser obtida pela combinação dos dois movimentos.

Consideradas em conjunto, essas duas notas finais de esclarecimento revelam um elemento importante que frequentemente não é facilmente detectado do enunciado da lei. O princípio oferecido por Newton não vale apenas para uma única força, mas para várias forças conspirando conjuntamente ou sucessivamente, no mesmo sentido, em sentidos opostos ou mesmo em sentidos oblíquos. Isso significa dizer que Newton não ignora o que hoje chamaríamos de “força resultante”. Essa constatação faz com que tenhamos de reformular ligeiramente a expressão simbólica contemporânea equivalente à segunda lei que apresentamos acima. Uma melhor representação da segunda lei seria:

$$F_R \propto \Delta mv \quad [5]$$

Onde F_R significa *força resultante*. A mudança na quantidade de movimento de um corpo é proporcional à força resultante, ou à força líquida impressa sobre ele. O leitor perceberá a seguir que essa pequena modificação tem uma importância destacada na conexão da segunda lei com a primeira.

Outro ponto que merece destaque sobre a segunda lei é que ela possui ainda uma *terceira parte*, que está apenas subentendida. Isso significa que a segunda lei do movimento

tem um enunciado na forma de *uma* lei, mas que, com efeito, poderia ser desdobrado em três partes. Duas dessas partes já foram comentadas aqui. Convém explicitar também a terceira:

- (i) *Toda mudança na quantidade de movimento de um corpo é gerada por uma força.*
- (ii) *A mudança na quantidade de movimento é proporcional à força.*
- (iii) *A mudança na quantidade de movimento ocorre na direção da força.*

É possível perceber que a proposição universal que figura acima como (i) está apenas subentendida no enunciado de Newton à segunda lei. Se Newton não fizesse as observações que nos levaram à substituição de F por F_R , essa proposição universal teria validade apenas em um sentido: *toda mudança na quantidade de movimento é gerada por uma força, mas nem toda força gera uma mudança na quantidade de movimento*. Por exemplo, quando uma pessoa empurra uma parede. A força aplicada na parede não gera uma mudança na sua quantidade de movimento. Mas com a mudança de F para F_R a proposição universal considerada passa a valer nos dois sentidos: *toda mudança na quantidade de movimento de um corpo é gerada por uma força resultante líquida diferente de zero; e toda força resultante diferente de zero gera uma mudança na quantidade de movimento de um corpo*. No caso de uma pessoa empurrando uma parede a força resultante atuando na parede é igual a zero.

É claro que Newton considera a primeira parte que foi expressa em (i) trivial, e por isso se presta a apresentar somente a relação de proporcionalidade entre força e mudança na quantidade de movimento. Mas o fato é que a proposição (i) não é tão trivial assim quanto parece. Possivelmente desde antes de Aristóteles até bem próximo da época de Newton que o senso filosófico comum sustentava que todo movimento era gerado por uma força. No entanto, o que está subentendido no enunciado da segunda lei do movimento é que não é o *movimento* que é gerado por uma força, mas sim a *mudança no movimento*. Esse detalhe é deveras importante porque torna inseparáveis a primeira e a segunda lei do movimento. Se toda mudança na quantidade de movimento de um corpo é gerada uma por uma força resultante diferente de zero, então na ausência de uma força resultante diferente de zero a quantidade de movimento do corpo não sofrerá alteração. Os corpos permanecerão em repouso ou movimento uniforme em linha reta. Em suma: dessa perspectiva, a primeira lei do movimento não passaria da conversa da segunda lei.²⁴⁸

²⁴⁸ Vários comentadores já chamaram a atenção para a estreita relação entre a primeira e a segunda lei do movimento. Por exemplo, Tait e Thompson [Lord Kelvin] (1912), Mach (1919), Herivel (1965), Westfall (1971). Westfall, em particular, afirmou que não sabe como Descartes não chegou à compreensão de que as suas

5.1.4 Terceira lei do movimento

Lei 3. Para toda ação sempre haverá uma reação igual e oposta; ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e opostas em direção.

O que quer que empurre ou puxe alguma coisa é na mesma medida empurrado e puxado. Se alguém empurra uma pedra com o dedo, o dedo é igualmente empurrado pela pedra. Se um cavalo puxa uma pedra por meio de uma corda, o cavalo (por assim dizer) será igualmente puxado pela pedra; porque a corda, distendida a partir das duas extremidades, impelirá o cavalo em direção à pedra e a pedra em direção ao cavalo por meio de um único e mesmo esforço de retrair, e impedirá o movimento adiante de um tanto quanto promoverá o movimento do outro. Se um corpo colide com outro, e por meio dessa força muda o movimento do outro, esse corpo da mesma forma (pela igualdade das pressões mútuas) sofrerá uma igual mudança no seu próprio movimento na direção contrária. As mudanças realizadas por meio dessas ações são iguais, não em suas velocidades, mas nos movimentos dos corpos; isto é, se os corpos não forem obstados por nenhum impedimento. Isso porque as mudanças das velocidades dos corpos ocorrem em direções opostas e são inversamente proporcionais aos corpos, o que gera iguais mudanças de movimento. Essa lei é válida igualmente para as atrações, como será provado no próximo escólio.²⁴⁹

Esse é o texto da lei hoje popularmente conhecida como “lei da ação e reação”. “Para toda ação há sempre uma reação oposta e igual”. Em seus comentários adicionais, Newton esclarece a terceira lei com uma observação que apela nitidamente para o senso comum. “O que quer que puxe ou empurre outro corpo é na mesma medida puxado ou empurrado por esse corpo”. Ele fornece, em seguida, três exemplos cotidianos desse princípio: (1) quando uma pessoa pressiona uma pedra com o dedo o seu dedo também é pressionado; (2) quando um cavalo puxa uma pedra amarrada por uma corda ele será puxado igualmente pela corda; (3) quando alguém provoca uma mudança na quantidade de movimento de um corpo esse alguém sofrerá a mesma mudança na sua quantidade de movimento no sentido contrário. O terceiro exemplo de Newton faz alusão ao contexto específico a partir do qual provavelmente ele teve a ocasião de formular essa lei: os experimentos sobre o impacto entre corpos, realizados por Huygens, Wallis e Wren por volta da década de 1670. Como veremos adiante em mais detalhes, esses estudos experimentais basicamente corroboraram, com alguns ajustes, a regra de Descartes sobre a conservação da quantidade de movimento dos corpos.

duas primeiras leis da natureza (a lei da inércia) implicavam uma relação como a segunda lei do movimento de Newton. Herivel mostrou pelos axiomas 1 e 2 do *Waste Book* que Newton percebeu cedo essa relação entre o primeiro e segundo axiomas do movimento (Herivel, 1965). De todo modo, com essa observação não quero dizer que o enunciado da primeira lei é desnecessário nos *Principia*. O objetivo é mostrar que embora Newton tenha feito essa divisão didática entre a primeira e a segunda lei elas devem ser consideradas como parte de um único todo inseparável.

²⁴⁹ MC, p.13.

No *Dióptrica*, Descartes havia construído um modelo mecânico para as leis da reflexão considerando “bolas” sendo refletidas numa terra perfeitamente plana e dura. A partir desses estudos, e com a adição de outros, o filósofo francês formulou uma hipótese sobre a conservação da quantidade de movimento dos corpos, que foi apresentada com um princípio metafísico nos *Princípios de Filosofia*, juntamente com as suas famosas regras sobre o impacto dos corpos. Embora a hipótese da conservação da quantidade de movimento dos corpos e as referidas regras provavelmente tenham sido formuladas com base em experimentos rudimentares que o próprio Descartes deve ter realizado, a justificativa utilizada por ele nos *Princípios de Filosofia* não se fundamentava em experimentos, mas, como disse, na metafísica.

A regra sobre o impacto dos corpos apresentada acima é importante no contexto dessa discussão porque ela pode ser entendida com um corolário da terceira lei do movimento enunciada por Newton. Durante o choque entre dois corpos, para que a conservação referida aconteça, a quantidade de movimento *adquirida* por um dos corpos após o choque deve ser igual à quantidade de movimento *perdida* pelo outro. Ou, como os referidos ajustes realizados por Huygens e Newton, a soma vetorial da quantidade de movimento dos dois corpos é sempre igual.²⁵⁰ Esse é precisamente o terceiro exemplo mencionado por Newton no seu esclarecimento da terceira lei:

Se um corpo colide com outro, e por meio dessa força muda o movimento do outro, esse corpo da mesma forma (pela igualdade das pressões mútuas) sofrerá uma igual mudança no seu próprio movimento na direção contrária. As mudanças realizadas por meio dessas ações são iguais, não em suas velocidades, mas nos movimentos dos corpos; isto é, se os corpos não forem obstados por nenhum impedimento. Isso porque as mudanças das velocidades dos corpos ocorrem em direções opostas e são inversamente proporcionais aos corpos, o que gera iguais mudanças de movimento.²⁵¹

Cabe enfatizar aqui, todavia, que Newton não está apresentando a sua lei como um corolário da regra da conservação da quantidade de movimento, mas precisamente o contrário. Ele está apresentando a regra da conservação da quantidade de movimento como um corolário da sua terceira lei. A igual mudança na quantidade de movimento de dois corpos em sentidos opostos ocorre “por causa da igualdade das pressões mutuas”, e não o contrário, por causa da lei da conservação da quantidade de movimento do Universo. Como veremos a partir do capítulo 6, essa mudança de perspectiva é fundamental para a construção da

²⁵⁰ Naturalmente, Newton e Huygens não falavam em “soma vetorial” naquela época.

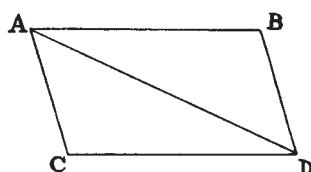
²⁵¹ Ibid.

geometria mecânica de Newton, porque substitui a análise cinemática dos choques de Descartes por uma análise dinâmica.

5.1.5 O paralelogramo de Newton

Após apresentar as três leis do movimento Newton ainda acrescenta uma série de seis corolários às leis. Apresentarei aqui apenas o primeiro deles devido a sua importância próxima no decorrer desse trabalho. Os demais corolários serão introduzidos na medida em que se tornarem necessários. Abaixo segue o enunciado do primeiro corolário que decorre das leis, que aqui eu chamo de regra do paralelogramo de Newton.

Corolário 1. Um corpo, submetido a ação de duas forças simultâneas, descreverá a diagonal de um paralelogramo no mesmo tempo que descreveria os lados por essas forças separadamente.²⁵²



Que o leitor não corra o risco nesse momento de pensar que Newton está apresentando algum tipo de soma de vetores. Não se trata de forças representadas por segmentos de reta. Com efeito, os segmentos de reta da figura representam o percurso de corpos em movimento. Vejamos a explicação do próprio Newton:

Considere que, num determinado tempo, um corpo, seja carregado com movimento uniforme de A até B por uma força isolada M impressa sobre A, e, por uma força N impressa também isoladamente no mesmo lugar, seja carregado de A até C; então, complete o paralelogramo ABCD, e por ambas as forças o corpo será carregado no mesmo tempo ao longo da diagonal de A até D.²⁵³

Da primeira parte dessa explicação já é possível perceber que ele não está representando as forças por segmentos. Como foi mencionado, os segmentos representam corpos em movimento. Mas tampouco representam o movimento de corpos sob a ação de uma força, pois se assim fosse os movimentos não seriam uniformes, ao contrário do que Newton supõe na explicação.

²⁵² Ibid, p.14.

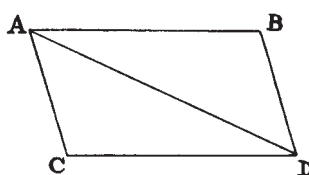
²⁵³ Ibid.

A explicação de Newton é simples, e lembra o procedimento da composição de movimentos, já bastante conhecido em sua época. O movimento de um corpo partindo de A até D num determinado tempo pode ser considerado como a combinação de dois movimentos: o movimento de A até C e o movimento A até B, ambos no mesmo intervalo de tempo que o corpo percorre AD. Esse procedimento é o que hoje chamaríamos de “composição de velocidades”. A velocidade do corpo na direção AD pode ser decomposta em duas velocidades distintas nas direções AC e AB, respectivamente. Os comprimentos de cada segmento representam as distâncias percorridas pelo corpo em cada direção no mesmo intervalo, considerando a velocidade específica que ele possui em cada direção. É o célebre exemplo do barco com velocidade constante atravessando de uma margem a outra um rio com uma correnteza transversal também com velocidade constante. A questão aqui, no entanto, é saber o que autoriza Newton a usar esse procedimento para *forças*, uma vez que se o caso em consideração fosse um corpo sofrendo a ação de duas *forças*, os movimentos não poderiam ter velocidade constante.

O que autoriza Newton usar o método da composição de movimentos também para *forças* é o fato dele saber que a distância percorrida por um corpo em movimento sob ação de uma força é proporcional à força exercida sobre ele ($F \propto D$). E, da mesma forma, saber que na *geometria mecânica* uma distância, um comprimento, ou um segmento de reta qualquer pode ser adequadamente representado por um corpo em movimento com velocidade constante. Isso permite que Newton represente a força não por um segmento cujo comprimento é proporcional à sua intensidade, como faríamos hoje, mas por um corpo movendo-se com determinada velocidade constante. Apesar de nos parecer um procedimento totalmente contra-intuitivo hoje, que trabalhamos com soma vetorial, o que Newton fez foi aproximar o trabalho geométrico com as forças dos já conhecidos métodos de composição de movimentos da mecânica racional das máquinas simples e da geometria mecânica. Em suma, as forças de Newton são aqui representadas geometricamente por corpos em movimento com velocidades constantes, e cujas velocidades representam a intensidade das forças. É por essa razão que Newton pode justificar a sua regra apelando para a primeira e a segunda lei do movimento:

Pois uma vez que a força N age na direção da linha AC , paralela a BD , essa força (pela segunda lei) não produzirá qualquer mudança na sua velocidade ao longo da linha BD , que é gerado pela outra força. Portanto, o corpo chegará na linha BD no mesmo tempo, quer a força N seja impressa ou não; e assim ao final desse tempo se encontrará em algum lugar sobre a linha BD . Pelo mesmo argumento, ao final do tempo ela se encontrará em algum lugar na linha CD , e assim será encontrada na intersecção D de ambas as linhas. E, pela lei 1, avançará com movimento uniforme de A até D .²⁵⁴

Uma vez que pela segunda lei o resultado da ação de uma força ocorre sempre na direção da própria força, ao aplicar duas forças a um mesmo corpo, nas direções AB e AC , se produzirá cada qual um efeito na sua respectiva direção, sem que um influencie no efeito do outro. Além disso, uma vez que cada uma das duas forças pode ser representada como um corpo movendo-se a uma velocidade constante cuja quantidade é correspondente à intensidade da força, então, é fácil perceber que a composição desses dois movimentos será dado por AD e, portanto, o segmento AD pode convenientemente representar o resultado da ação das duas forças inicialmente aplicadas. Embora na sua explicação Newton não siga exatamente esse caminho, acredito que a justificativa acima preserve bem o espírito da sua abordagem nesse corolário.²⁵⁵



O corolário 1 esclarece uma importante consideração sobre as “forças oblíquas” que fora apresentado no comentário à segunda lei. Newton havia mencionado que se uma força fosse aplicada na direção oposta ou a favor de um corpo já em movimento essa força seria subtraída ou somada respectivamente. Caso a força fosse oblíqua ela teria a direção que emergiria da composição da direção da força e do movimento. Nesse corolário Newton apresenta em detalhes a justificativa desse procedimento. Como vários comentadores já mostraram, o corolário 1 é importante porque amplia a aplicação segunda lei para além dos

²⁵⁴ Ibid.

²⁵⁵ Talvez uma forma mais clara de compreender a explicação que o próprio Newton oferece ao corolário pode ser apresentada como a seguir. Pela segunda lei do movimento, o resultado de duas forças sendo aplicadas simultaneamente ou sucessivamente sobre um determinado corpo é o mesmo. Assim, as duas forças simultâneas aplicadas no corpo podem ser substituídas por duas forças sucessivas. A primeira força é aplicada na direção AB , numa intensidade que pode ser representada pelo deslocamento do corpo pela distância AB num determinado intervalo de tempo. A segunda força é aplicada em seguida na direção BD , paralela a AC , numa intensidade que pode ser representada pela distância BD . Da mesma maneira poderíamos inverter a ordem de aplicação dessas forças. A primeira força é aplicada na direção AC e é representada pelo deslocamento AC . A segunda força é aplicada em seguida na direção CD , paralela a AB , sendo representada pelo deslocamento CD . Porém, uma vez que as duas forças são aplicadas simultaneamente, e, pela primeira lei, o corpo percorrerá necessariamente uma linha reta, o resultado da ação das duas forças simultâneas poderá ser representado por uma força cuja direção e intensidade é representada pela diagonal do paralelogramo formado nas etapas anteriores.

resultados possíveis de se obter a partir das investigações de Wren, Wallis e Huygens sobre a colisão entre corpos²⁵⁶.

5.2 FUNDAMENTOS EMPÍRICOS DAS LEIS DO MOVIMENTO

Após enunciar as três leis do movimento e seus corolários, Newton abre um extenso escólio para apresentar um resumo das evidências empíricas que asseguram esses princípios. Em suas palavras, os princípios que constituem as leis do movimento são “aceitos entre os matemáticos e confirmados por uma multiplicidade de experimentos”²⁵⁷. Sinteticamente, no escólio Newton argumenta que as duas primeiras leis do movimento são confirmadas pelos trabalhos experimentais de (1) Galileu, na investigação sobre a queda dos corpos e movimento dos projéteis; (2) Huygens, na investigação sobre o movimento dos pêndulos; e (3) Wren, Wallis e Huygens, na investigação sobre as leis que regem o impacto entre os corpos. Já a terceira lei do movimento é confirmada (1) pela mesma referida investigação das leis dos impactos; (2) pelos próprios experimentos complementares de Newton sobre a leis dos impactos; (3) pelos numerosos exemplos de aplicação da ciência dos poderes mecânicos; (4) por experimentos realizados com ímãs e outros corpos atrativos. Além disso, uma leitura cuidadosa desse escólio revelará que Newton também leva em conta como evidência desses princípios aquilo que poderíamos chamar genericamente de “convergência de resultados independentes”, que, no caso, teriam sido obtidos (1) a partir de investigações independentes; (2) pesquisadores independentes; (3) métodos e procedimentos independentes; e (4) campos de investigações diferentes.²⁵⁸ No entanto, uma análise sobre a racionalidade envolvida nessa “convergência de resultados” será considerada somente no segundo volume. A exposição abaixo se limitará a discutir as evidências que Newton explicitamente assim as considera.

5.2.1 Galileu e Huygens

A primeira evidencia apontada como confirmação das leis do movimento remete aos estudos de Galileu sobre a queda dos corpos e o movimento dos projéteis. Newton afirma:

²⁵⁶ Como se mostrará na seção 5.2.2.

²⁵⁷ Traduzido diretamente do latim: “Hactenus *Principia* tradidi a Mathematicis recepta & experientia multiplici confirmata”.

²⁵⁸ Sobre essa “convergência de resultados” como um argumento para o realismo científico veja Ghins, 2013.

Por meio das duas primeiras leis e dos dois primeiros corolários, Galileu descobriu que a queda dos graves varia com o quadrado do tempo [lit. *in duplicata ratione temporis*] e que o movimento dos projéteis ocorria numa parábola, ambos em concordância com a experiência, exceto por esses movimentos serem ligeiramente retardados pela resistência do ar.²⁵⁹

Newton afirma que Galileu descobriu “por meio das duas primeiras leis e dos dois primeiros corolários” que a queda dos corpos varia com o quadrado dos tempos e que a trajetória dos projéteis é uma parábola. Antes de avaliar se essa afirmação realmente procede vamos acompanhar a explicação de Newton sobre como Galileu teria feito isso. O filósofo italiano devia saber que os corpos caem em direção ao solo devido à ação de uma força constante, a saber, a força da gravidade. Além disso, devia conhecer o resultado trivial de que a mudança de velocidade de um corpo é proporcional à força exercida sobre ele ($F \propto \Delta v$), e que a força da gravidade é proporcional à massa dos corpos ($F_g \propto m$). Assim, Galileu poderia combinar facilmente esses dois resultados, obtendo $F_g \propto m\Delta v$, ou seja, a segunda lei do movimento. Ora, sabendo Galileu dessa lei, mesmo sem enunciá-la explicitamente, ele deve ter deduzido sem dificuldades a lei da queda dos corpos, conforme explicou Newton no sumário que apresentou em seguida:

Quando um corpo está caindo, a força uniforme da gravidade, agindo igualmente em iguais intervalos de tempo, imprime iguais forças sobre o corpo gerando, portanto, iguais velocidades; e no tempo total imprime a força total gerando a velocidade total proporcional ao tempo. E os espaços descritos em tempos proporcionais estão para o produto da velocidade e do tempo; ou seja, como o quadrado dos tempos.²⁶⁰

Na passagem acima Newton continua a sua especulação sobre como Galileu teria deduzido a sua regra da queda dos corpos da segunda lei do movimento. Se Galileu sabia que $F_g \propto m\Delta v$, e que esta força era “uniforme”, ou seja, “contínua e constante”, então ele sabia que em cada intervalo de tempo igual (Δt_i) o corpo sofreria uma força igual (F_i), que produziria uma mudança de velocidade igual (Δv_i), proporcional ao respectivo intervalo de tempo. Assim, é possível perceber que a velocidade do corpo no final da queda (a soma de todos os Δv_i) será proporcional ao intervalo de tempo total de queda (a soma de todos os Δt_i). Chamando a velocidade final de V e o tempo total de T , teríamos:

$$V \propto T$$

ou

$$V = kT \quad [6]$$

²⁵⁹ MC, p.21.

²⁶⁰ Ibid.

Onde k é uma constante relacionada à quantidade de mudança de velocidade que o corpo experimenta num caso específico. Além disso, era um fato bem conhecido que a distância percorrida por um corpo é proporcional à sua velocidade e ao tempo de percurso, o que poderia ser escrito como:

$$\begin{aligned} D &\propto VT \\ \text{ou} \\ D &= cVT \end{aligned} \tag{7}$$

Onde c é uma constante qualquer.

Combinando as eq. [6] e [7], teremos, para o intervalo de tempo total considerado, a distância percorrida pelo corpo em queda:

$$\begin{aligned} D &= cKT^2 \\ \text{ou} \\ D &\propto T^2 \end{aligned} \tag{8}$$

O espaço percorrido por um corpo em queda varia com o quadrado dos tempos, que é a lei de Galileu para a queda dos corpos. É claro que Newton omitiu um importante detalhe na explicação. A distância é proporcional ao tempo quando a velocidade do corpo é *constante*, e em [6] a velocidade não é constante. As equações [6] e [7] só podem ser combinadas quando os intervalos de tempo Δt_i são muito pequenos. Pois nesse caso as velocidades em cada intervalo podem ser consideradas como constantes.

No caso do estudo de Galileu sobre a trajetória dos projéteis ser em forma de parábola, lembramos que ele admitiu que o movimento desses corpos poderia ser considerado como composto por dois movimentos: um vertical, uniformemente acelerado obedecendo a lei do quadrado dos tempos, e outro horizontal, uniforme e em linha reta. Em outras palavras, Galileu teve que admitir a primeira lei do movimento para considerar que a componente horizontal do projétil é uniforme e em linha reta, e da mesma forma teve que utilizar a regra do paralelogramo do corolário 1. Portanto, foi pelas duas primeiras leis do movimento e pelos

dois primeiros corolários que Galileu chegou às suas regras, “ambas em concordância com a experiência”.

Apresentada essa possibilidade de leitura sobre a suposta maneira como Galileu descobriu as suas leis, resta-nos indagar se ele realmente fez isso. Teria Galileu realmente realizado as suas descobertas a partir das duas primeiras leis do movimento, como Newton sugeriu? Acredito que dificilmente. Como já foi comentado na seção 1.3.3, Galileu declarou abertamente que abandonara qualquer consideração sobre as causas do movimento nas suas investigações sobre a queda dos corpos. Ele estava considerando puramente o fato de que os corpos caem com um movimento acelerado, independente do que viesse a ser a causa desse movimento, uma força, a gravidade ou qualquer outra coisa. Do mesmo modo, na análise do movimento dos projéteis, Galileu admitiu que a componente horizontal poderia ser considerada uniforme e em linha reta, independe de especulações a respeito de como isso era possível, se os corpos permanecem naturalmente em movimento, se eram animados pelo *impetus* ou pelo que fosse²⁶¹. É muito difícil, portanto, aceitar que Galileu tenha usado as duas primeiras leis do movimento para chegar aos seus resultados.

Podemos conceder a Newton, entretanto, que ele tenha cometido apenas um abuso de linguagem. Galileu, de fato, não lançou mão formalmente dessas leis para chegar aos seus resultados, mas possivelmente as utilizou como hipóteses de trabalho. Uma vez que tanto a queda dos corpos como o movimento dos projéteis não poderiam ser avaliados sem a influência da resistência do ar, Galileu teve de partir de algumas hipóteses para proceder a sua investigação, que, ao final foram confrontadas com a experiência. Qual seria o comportamento dos corpos caso estivessem sob a ação de uma força constante? Qual seria o comportamento dos corpos supondo que atue sobre eles uma força constante vertical, enquanto eles permanecem em movimento horizontal uniforme, sem que isso exija uma força adicional? E, com base nessas hipóteses de trabalho, equivalentes às duas primeiras leis, Galileu teria, portanto, chegado aos seus resultados.

A sugestão acima é igualmente difícil de acatar. Embora seja possível que Galileu conhecesse alguma relação semelhante a $F \propto m\Delta v$ para forças de percussão entre corpos, é muito improvável que ele fosse capaz de aplicá-la para o caso da força da gravidade. Galileu ainda estava ligado, ao menos parcialmente, à concepção aristotélica de gravidade e, portanto, a concebia não como rigorosamente uma *força*, mas um movimento natural dos corpos em direção ao seu lugar natural²⁶². Em outras palavras, para Newton, a força da gravidade era

²⁶¹Como se sabe, Galileu admitia uma inércia circular. Veja o apêndice A.

²⁶² Westfall, 1971, cap.1.

considerada uma *ação* de um corpo sobre outro, então ele podia usar aquela relação tanto para a gravidade quanto para qualquer outra interação entre dois corpos. Para Galileu, as duas situações eram bastante distintas, e é provável que ele não tenha concebido uma relação semelhante para nenhuma das duas.²⁶³ Entretanto, mesmo admitindo que o matemático italiano dificilmente tenha feito as suas descobertas por meio das duas primeiras leis do movimento, acredito que isso em nada afeta a referência de Newton aos estudos de Galileu como uma evidência experimental para as leis do movimento. De fato, é possível deduzir as regras de Galileu das primeiras leis do movimento, como Newton mostrou na passagem que analisamos. E, se alguém admite que os estudos de Galileu concordam realmente com a experiência, as duas primeiras leis do movimento devem ser igualmente consideradas adequadas aos fenômenos.

Após fazer essas observações sobre Galileu no escólio, Newton ainda acrescenta que das duas primeiras leis e os dois primeiros corolários também “dependem aquelas coisas que foram demonstradas concernentes aos tempos de vibração dos pêndulos, sustentados pela experiência cotidiana com relógios”. Aparentemente Newton está se referindo aqui aos trabalhos de Gassendi e Huygens que continuaram os estudos de Galileu sobre a queda dos corpos. Mas, em especial, ele deve ter em mente o celebrado tratado *Horologium Oscillatorium* (O Relógio de Pêndulo), do matemático holandês Christiaan Huygens, publicado em 1673, considerada geralmente como um dos três mais importantes tratados sobre a mecânica do séc. XVII (ao lado dos *Principia* e do *Discorsi* de Galileu). Essa obra era bem conhecida de Newton e muito estimada por ele. Numa carta a Richard Bentley, em 1691, ele recomenda ao teólogo uma lista de livros e autores para melhor compreender os *Principia*, e depois de terminar a lista de obras, observa: “Essas obras serão suficientes para a compreensão do meu livro. Mas se o senhor conseguir o *Horologium Oscillatorium* de Hugenius, o exame dele o deixará muito mais preparado”.²⁶⁴ Infelizmente, Newton se limita a afirmar que o movimento dos pêndulos também depende das duas primeiras leis do movimento, mas não dá detalhes adicionais a respeito. Não é difícil de imaginar, contudo, a conexão. Huygens usou os experimentos com pêndulos para levar a lei da queda dos corpos a um alto grau de precisão e evidência. Mas talvez Newton não tenha se preocupado em discutir os experimentos de Huygens porque diante das próximas evidências tal discussão se tornaria desnecessária.

²⁶³ Ibid, cap.1.

²⁶⁴ Carta de Newton a Richard Bentley em 1691. Newton, 1961, p.155-156.

5.2.2 Wren, Huygens e Wallis sobre as leis dos impactos

Na sequência da apresentação do seu escólio Newton declara que por meio das três leis do movimento os maiores geômetras do seu tempo determinaram as leis do impacto e reflexão dos corpos duros.

Pelas mesmas leis e corolários, e também pela Lei 3, Sir Christopher Wren, Dr. Wallis, e Mr. Huygens, os maiores geômetras do nosso tempo, independentemente determinaram as regras das colisões e reflexões dos corpos duros, e por volta da mesma época comunicaram as suas descobertas à *Royal Society*, concordando inteiramente entre si a respeito dessas regras.²⁶⁵

Na seção 5.1.4 informei que as investigações sobre as leis que explicavam o comportamento dos corpos em colisão que culminou no trabalho dos três geômetras supracitados teve como principal ponto de partida, no século XVII, os estudos de Descartes sobre a reflexão da luz. Na verdade, o filósofo francês havia abordado um tema antigo e chegara a um conjunto de leis e regras sobre as colisões. Como aqueles que investigaram o problema antes dele, Descartes procurou empreender uma análise das colisões assumindo como referência o modelo da mecânica racional dos antigos, que, como já vimos, procederam uma elaboração matemática das máquinas simples a partir de uma determinada noção de “força”.²⁶⁶ Para empreender algo semelhante a uma mecânica racional dos antigos aplicada ao estudo das colisões, ele precisava, em primeiro lugar, construir um parâmetro para aquilo corresponderia à “força” nessa nova situação. Assim, admitiu como indicador da força de um corpo o produto entre o seu “tamanho” e a sua “velocidade”, algo que ele chamou de “força do movimento”²⁶⁷, e que hoje poderia ser comparada ao que conhecemos como *momento*, *quantidade de movimento* ou *mv*.²⁶⁸ Mas o pensador francês deve ter encontrado dificuldades

²⁶⁵ MC, p.22.

²⁶⁶ Essa observação e as que se seguirão podem ser consultadas em Westfall, 1971, cap.1.

²⁶⁷. A ‘force of a body to act’, ou a ‘force of its motion’, ou ainda a sua ‘force to continue to move’. Westfall, op.cit., p.63.

²⁶⁸ Essa concepção de “força do movimento” já havia sido utilizada por Buridan na determinação do *impetus* de um corpo. Esse ponto merece uma reflexão cuidadosa porque cria um vínculo entre a ideia de *força* na mecânica racional dos antigos com a ideia de *força* como causa do movimento na filosofia aristotélica. Por conseguinte, uma tentativa de determinação de um conveniente parâmetro de força vinculado ao impacto entre os corpos parece sugerir um intuito, já na época de Buridan, de seguir o modelo de matematização da mecânica racional dos antigos em considerações que se relacionassem à *causa* dos movimentos dos corpos. Uma vez que na filosofia mecânica do século XVII a causa dos movimentos estava diretamente relacionada ao impacto entre os corpos, o conceito de “força do movimento” semelhante ao de Buridan, utilizado por Descartes, e a dedicação do filósofo francês em formular as regras dos impactos, deveria estar vinculada a uma tentativa de matematização das leis da natureza que incorporavam as *causas* do movimento de uma maneira frutífera. Portanto, deve haver poucas dúvidas que o grande interesse pela determinação do parâmetro correto para definir o que deveria ser admitido com a “força” no caso das interações entre os corpos estava relacionado com esses contextos ligados à tradição aristotélica das causas do movimento e a mecânica racional dos antigos. A melhor escolha para esses parâmetros, no entanto, era uma questão bastante controversa. Pelo menos três sugestões poderiam ser

para formular uma explicação para o comportamento dos corpos nas colisões com base na sua noção de *força do movimento*. A força do movimento aumentava após certas colisões, e, da mesma maneira, havia um recuo em corpos que se chocavam com outros em repouso, o que feria um dos princípios fundamentais de Descartes, a saber, o princípio da inatividade da matéria. Posto que a matéria era considerada inativa, um corpo em repouso não deveria ser capaz de exercer uma força em outro corpo. Diante dessas dificuldades é provável que ele tenha buscado formas alternativas de explicar o comportamento dos corpos em colisão. Ele havia percebido, em contrapartida, que a quantidade de movimento total dos corpos antes e após o impacto era constante, com uma ressalva a respeito da determinação (direção) dos movimentos. Esse comportamento foi atribuído a uma lei da conservação da quantidade de movimento dos corpos, ainda hoje reconhecida por esse nome. Essa formulação de Descartes, todavia, o afastou de uma interpretação dos fenômenos cujo elemento primário fosse a noção de “força”, um conceito consagrado tanto na mecânica racional dos antigos como na tradição aristotélica, e que, além disso, estava fortemente associado com a ideia de causa dos movimentos. Nas palavras de Westfall, Descartes abriu mão de uma interpretação “dinâmica” por uma interpretação “cinemática” dos fenômenos²⁶⁹. Mas é bastante provável que nem todos os filósofos naturais estivessem dispostos a fazer a mesma concessão. Paralelamente a isso, e não menos importante, as regras de Descartes sobre a colisão dos corpos continham muitos erros quando confrontadas com a experiência. Era praticamente uma unanimidade entre os matemáticos e filósofos que essas regras precisavam ser reexaminadas e reformuladas com um maior rigor experimental. Em suma, as regras de Descartes estavam longe de ser palavra final sobre o assunto.

Em 1668, a *Royal Society* tomou a iniciativa de escolher para discussão o polêmico tema das leis sobre o impacto dos corpos, e desafiou três matemáticos de renome, os britânicos John Wallis e Christopher Wren, e o holandês Christiaan Huygens, para procederem um cuidadoso estudo experimental sobre as regras dos impactos, um tema fundamental em pleno séc. XVII. Os três ilustres membros da *Royal Society* desenvolveram uma investigação minuciosa fortemente embasadas numa estrutura matemática e experimental muito mais sofisticada que aquela que provavelmente Descartes dispusera. Newton dá um exemplo dessa sofisticação experimental apresentando o dispositivo pendular usado por Wren para investigar as regras dos impactos. Segundo Newton, foi o arquiteto inglês Christopher

destacadas, mesmo adotando certo anacronismo para simplificar o assunto. A força como mv , de Descartes; a força como mv^2 , de Leibniz, e a força como Δmv , de Newton, mas que já havia sido antecipado por outros, talvez apenas não com a mesma clareza que ele. Veja Westfall, 1971. Veja também o Apêndice D.

²⁶⁹ Westfall, op.cit.

Wren quem primeiro “confirmou a verdade da coisa perante a *Royal Society* com experimentos com pêndulos”.

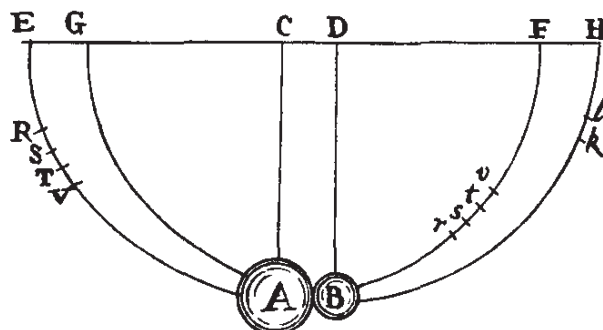


Figura 4: Ilustração de Newton no Escólio das Leis do Movimento exemplificando os experimentos de colisão usando pêndulos.

O dispositivo de Wren, composto por dois pêndulos dispostos como na figura acima, era capaz de determinar as velocidades precisas dos corpos, as quais eram proporcionais à altura de onde eles eram abandonados, ou à altura que atingiam após os choques. A grande vantagem do dispositivo era a sua possibilidade de determinar, com exatidão, “o retardamento que surge da resistência do ar”. Ao abandonar as esferas isoladamente no pêndulo e observando a diferença entre os seus pontos de partidas e de chegada no lado oposto era possível determinar a quantidade dessa força de resistência ao longo do movimento. De posse dessa força determinada, e conhecendo de modo preciso as massas e as velocidades das esferas antes e após os impactos, Wren pôde determinar com grande precisão as regras dos impactos entre corpos.

Huygens e Wallis realizaram os seus experimentos com corpos duros (ou perfeitamente duros), enquanto que Wren trabalhou com corpos perfeitamente elásticos. Huygens evidenciou os erros que Descartes cometeu e mostrou que a lei da conservação da quantidade de movimento não estava correta, na formulação do filósofo francês. Com alguns ajustes, o matemático holandês mostrou que, levando-se em conta o centro de gravidade do sistema, a lei da conservação do movimento era válida. A abordagem de Huygens, no entanto, afastava ainda mais os elementos que remetiam às *causas* do movimento na sua formulação. Uma vez que os choques entre os corpos de um sistema em nada alteravam a velocidade e determinação do centro de gravidade desse sistema, qualquer consideração a respeito de forças de impacto e, portanto, sobre causas do movimento, tornou-se totalmente supérflua. Tanto para Descartes quanto para Huygens, portanto, a antiga noção de *força* tornou-se secundária diante do protagonismo da lei da conservação da quantidade de movimento.

Wallis e Wren insistiram, todavia, numa análise que não abdicasse da noção de *força*. Wallis explicou o recuo dos corpos durante o choque com outros em repouso com a admissão de uma *vim resistendi*, ou seja, uma “força de resistência” atribuída a esses corpos. Com o auxílio dessa força ele foi capaz de oferecer um modelo teórico que se adequava aos experimentos. Wren, por sua vez, chegou a conceber as forças como Δmv , ainda que de uma forma um tanto confusa. Ele não conseguiu se desvincular totalmente da ideia de “força do movimento” de Descartes. O arquiteto inglês ainda percebeu que a resistência e o impulso durante os choques eram iguais, o que levava à lei da conservação da quantidade de movimento de Descartes, mas explicou essa observação com base numa analogia com as máquinas simples, como no caso de uma balança em equilíbrio.

Desprezando as várias minúcias de cada um dos estudos realizados pelos três geômetras convocados pela *Royal Society*, de uma forma geral a principal conclusão das suas investigações foi a confirmação da lei da conservação da quantidade de movimento total dos corpos. Wallis e Wren chegaram a tentar uma formulação das regras dos impactos em termos de *forças*, mas também encontraram dificuldades em determinar um parâmetro que pudesse explicar o comportamento dos corpos nas variadas situações de colisão. A observação de Newton, portanto, de que as regras dos impactos de Wallis, Wren e Huygens foram obtidas por meio das três leis do movimento não pode ser considerada dotada de muita precisão histórica. Não há dúvidas de que todos eles, incluindo Descartes, assumiram alguma versão da primeira lei do movimento como ponto de partida. Mas quanto à segunda e à terceira lei já não se pode dizer o mesmo. Wren chegou a uma forma confusa da segunda lei, mas ainda assim sem considerar os casos de forças compostas, ou “força resultante”, que consta nos comentários de Newton ao enunciado dessa lei. Juntamente com Wallis, Wren também percebeu um “equilíbrio” de forças contrárias entre os corpos durante o impacto, mas não demonstraram uma compreensão muito clara do significado desse equilíbrio, ou do porquê do seu surgimento.

Embora esteja claro que eles não chegaram aos seus resultados pelas três leis do movimento – apenas pela primeira – cabe nos perguntarmos se as três leis poderiam ser obtidas dessas investigações empíricas, ou, ao menos, confirmadas por elas. Para responder essa questão será conveniente introduzir as contribuições de Newton na sua interpretação dinâmica dos experimentos dos corpos em colisão.

5.2.3 Contribuições de Newton na análise dos impactos

Não temos muitos detalhes acerca de como, exatamente, Newton construiu a sua teoria *dinâmica* sobre os impactos entre os corpos. Seus primeiros estudos sobre o assunto – que temos notícia – estão nos manuscritos intitulados *Waste Book* e *De Gravitatione*, que, na verdade, eram cadernos de anotações mantidos pelo jovem matemático em Cambridge.²⁷⁰ Esses cadernos misturavam muitos assuntos que, não raras vezes, eram desenvolvidos de maneira incompleta e até confusa. Algumas das notas apresentam informações importantes sobre os esforços de Newton para formular uma análise dinâmica das colisões, mas ainda assim estão longe de oferecerem um quadro completo. Contudo, diante da importância de tentar discernir as contribuições originais de Newton na investigação sobre os impactos, vale a pena ao menos tentar reconstruir um possível trajeto trilhado por ele até chegar à sua frutífera análise dinâmica das colisões. Nessa seção será apresentada essa possível reconstrução, baseada nas poucas informações dos seus manuscritos sobre o assunto, e baseado na tradição de estudos sobre os impactos da qual ele emergiu, que vai desde Descartes até Wallis e Wren²⁷¹.

Da mesma forma que os seus antecessores, Newton começou os seus estudos sobre as colisões assumindo como ponto de partida a primeira lei do movimento e a inatividade essencial da matéria. O estado natural dos corpos é o repouso ou o movimento uniforme, e, por si mesmos, eles não podem alterar o seu próprio estado. Para tanto, torna-se necessário uma causa externa agindo sobre o corpo, no caso, o impacto com outro corpo²⁷². Com base nesses princípios, Newton começou o seu percurso rumo à construção de uma mecânica racional que refletisse o comportamento dos corpos em colisão, ou, como tenho sustentado, rumo à construção de uma geometria mecânica que espelhasse o comportamento dos corpos na natureza. Mas para introduzir o comportamento dos corpos como axiomas da sua geometria mecânica, ele precisava, evidentemente, encontrar uma maneira de *quantificar* a força da causa externa que provocava a modificação no estado dos corpos, e também a própria modificação produzida pela causa. Novamente, como a maior parte dos seus antecessores, Newton usou como parâmetro de força da causa externa a “força do movimento” dos corpos, algo que tenho representado, mesmo de modo anacrônico, como *mv*. Mas, assim como Wallis,

²⁷⁰ Newton, 2004.

²⁷¹ Para sintetizar ao máximo esta seção, evitei fazer citações diretas dos manuscritos. O leitor que tiver interesse em saber mais detalhes dos manuscritos pode consultar Herivel (1965), Westfall (1971), ou ainda, a coleção de manuscritos online disponível em *The Newton Project*.

²⁷² Veja os axiomas 1 e 2 do *Waste Book*.

Newton também deve ter percebido que sempre havia uma *força de resistência* agindo durante o impacto. Se um dos corpos estivesse em repouso e o outro em movimento, após o impacto, o corpo em movimento frequentemente sofria um recuo. Essa constatação provavelmente fez Newton perceber que, além da força do movimento inicial do corpo em movimento, deveria-se considerar ainda duas outras forças: uma *força de resistência*, que modificava no sentido contrário quantidade de movimento do corpo em aproximação, e uma *força impulsiva*, que fazia o corpo em repouso adquirir uma força de movimento, às vezes maior do que aquela inicialmente presente no corpo em movimento²⁷³. Se chamarmos a força de movimento de F_m , a força de resistência de F_r , e a força impulsiva de F_i , a situação de um corpo A inicialmente em movimento se chocando com um corpo B , inicialmente em repouso, poderia ser representada pela figura abaixo.²⁷⁴

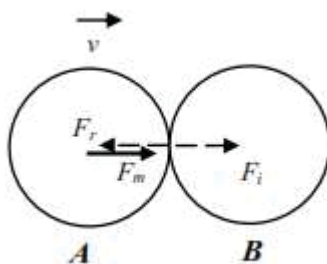


Figura 5: diagrama simplificado de forças atuando durante o impacto entre dois corpos, A e B.²⁷⁵

Não há qualquer complexidade envolvida na determinação das *forças de resistências* e das *forças impulsivas* em termos de mv em várias configurações de corpos e velocidades possíveis. Basta proceder os experimentos e determinar as variações das *forças de movimento* dos dois corpos, antes e depois dos impactos. Ou seja, basta determinar Δmv de ambos os corpos durante os impactos, algo que Wren e Wallis já haviam feito, cada um à sua maneira. Ao fazer isso, Newton provavelmente percebeu o que os outros dois matemáticos já haviam percebido: as *forças de resistências* e as *forças impulsivas* são iguais para todas as configurações de massas e velocidades ($F_i = F_r$).

²⁷³ Esses termos não são encontrados nos manuscritos de Newton. Aqui estou fazendo uma reconstrução em certa medida livre da maneira como possivelmente ele deve ter chegado às suas conclusões, tendo como base os trabalhos que ele já conhecia sobre o assunto e pistas que ele deixou nesses escritos.

²⁷⁴ Evidentemente Newton não usava setas para representar forças como fazemos hoje. Mas aqui usarei esse expediente para tornar mais claro o meu raciocínio por meio de figuras.

²⁷⁵ Esse é um diagrama intuitivo. Pouca relação tem com os diagramas de forças atuais; da mesma forma, não é uma representação do próprio Newton, que até onde eu sei não usava setas para representar forças, como fazemos hoje. Ainda assim é um diagrama intuitivo e tenta reconstruir um raciocínio possível de ser elaborado por Newton, a partir dos seus pressupostos.

Mas qual seria o significado desse fenômeno? Como explicar a *força impulsiva* (F_i) que é *impressa* no corpo B no momento preciso do impacto? E ainda mais intrigante: como explicar a impressão de uma *força de resistência* (F_r) no corpo A , proveniente do corpo B , considerando que a matéria em repouso é essencialmente inerte e inativa? De fato, essas questões eram importantes, mas para os propósitos de construção de uma mecânica racional dos impactos, havia uma única pergunta que era realmente imprescindível de ser respondida, a fim de se estabelecer a relação matemática entre a causa e o efeito das colisões. A pergunta acerca da proporção matemática exata entre a *força de movimento* inicial do corpo em movimento (F_m) – que corresponde à força do *corpo causal* – e a *força impulsiva* (F_i) que surge no momento do impacto do corpo causal com o corpo em repouso, e que gera a modificação final do movimento desse último. Em outras palavras, o que Newton precisava era a relação entre a força da causa (F_m), proveniente do corpo A , e o efeito no corpo B ($\Delta m_B v_B$).

Aparentemente, assim como os seus antecessores Wallis e Wren, Newton não foi capaz de responder essa última questão. O efeito do impacto do corpo A sobre o corpo B não dependia somente massa e velocidade de A , mas também da massa de B . Quanto maior a massa de B , maior *força de resistência* desse corpo, o que já era esperado, mas também maior se tornava a *força impulsiva* impressa por A em B – o que não era esperado. Além disso, ambas as forças não aumentavam indefinidamente com o aumento das massas. Elas tendiam para um determinado limite, que era que o dobro da *força de movimento* do corpo A . Assim, a *força de resistência* do corpo B também dependia da massa e velocidade do corpo A . Esse intrincado problema da análise dinâmica dos impactos não parecia ter uma resposta simples, mas agora, diferente dos seus antecessores, Newton foi capaz de contorná-lo. À rigor, não seria sequer necessário considerar a *força de movimento* inicial do corpo A e a sua relação precisa com F_i e F_r para construir uma mecânica racional dos impactos em que se levasse em consideração a causa e os efeitos desses fenômenos. Independente dos processos que ocorrem no momento exato do impacto entre A e B , e que leva, às vezes, por exemplo, ao aumento da *força de movimento* original de A , o fato é que a colisão de A em B faz com que seja *imprimida* nesse último uma *força impulsiva* que é, no final das contas, a força que efetivamente produz o movimento de B . E o mais importante: é possível quantificar essa força em termos da mudança de movimento (Δmv) do corpo B , ignorando completamente o corpo A e a sua *força de movimento* original.

Esse último movimento de Newton foi de fato inovador. Em vez de considerar a “força do corpo A ” a causa da mudança do corpo B , como fizeram os seus antecessores, ele

considerou apenas “a força do corpo A impressa em B ” a causa da mudança em B , independente de qualquer característica do corpo A , fosse da sua massa, velocidade, solidez ou fluidez, ou, até mesmo, visibilidade ou invisibilidade. Em outras palavras, não precisamos, em qualquer aspecto, da quantidade da força do corpo A para construirmos uma mecânica racional; tudo o que precisamos saber é a mudança de movimento do corpo B , que indica a proporção da força que nele foi *imprimida*, por meio do que quer que seja. Tudo o que precisamos na mecânica racional dos impactos são as “forças imprimidas”. Nenhum outro tipo de forças que os filósofos consideram é necessária. Esse foi o grande movimento inovador de Newton para proceder a uma satisfatória análise dinâmica dos impactos. Poderíamos, agora, considerar como a causa mais imediata das mudanças de movimento dos corpos somente a *força gerada no momento do impacto*, ou apenas a *ação do impacto*, e não o próprio *corpo* que gerou o impacto. A consideração sobre o *corpo* que gerou a força durante o impacto poderia ser objeto de uma investigação posterior ou até mesmo deixada de lado. A novidade que Newton introduziu na sua análise dos impactos foi ter desconectado a *força* do *corpo* que a produz. O fracasso dos seus antecessores em proceder a uma análise dinâmica dos impactos repousava precisamente na falha em promover essa separação metodológica. A representação das forças entre A e B durante um impacto, que apresentamos mais acima, com essa pequena modificação de perspectiva, poderia agora ser representada de forma mais econômica pela figura abaixo:

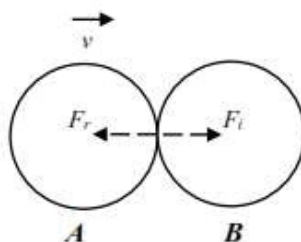


Figura 6: diagrama de forças durante o impacto entre dois corpos, A e B , considerando apenas as forças *impressas*.

Onde $F_i \propto \Delta m_B v_B$, é a força *impulsiva* de A imprimida em B ; e $F_r \propto \Delta m_A v_A$, é a *força de resistência* de B imprimida em A . Basta conhecer essas *forças imprimidas* ou *impressas*, e as respectivas mudanças nas quantidades de movimento dos corpos, para uma análise dinâmica dos impactos. Com efeito, basta conhecer a mudança de movimento de *um dos corpos* para uma análise dinâmica dos impactos, uma vez que a outra força é sempre igual. Mas qual seria

a justificativa para a existência de uma *força de resistência* em um corpo inerte e para a igualdade entre essa força e a *força impulsiva*?

Como já abordamos anteriormente, Newton percebeu que as forças resistência dependiam da força de movimento original do corpo *A*, mas dependiam também da massa do corpo *B*, e aumentavam até um limite equivalente ao dobro da força de movimento do corpo *A*. Além disso, essa força entrava em atividade somente por ocasião da interação entre os corpos, e na ausência da interação ela permanecia inativa. Como Wallis, Wren e Hooke, Newton também investigou as propriedades elásticas dos corpos para avaliar se essas propriedades poderiam, eventualmente, explicar esse comportamento inusitado que surge durante os impactos.²⁷⁶ Uma vez que não existe corpo perfeitamente duro na natureza, a elasticidade dos corpos poderia explicar tanto o surgimento das forças de resistência quanto a igualdade entre a força de resistência e a força impulsiva. Basta imaginar dois corpos colidindo com uma mola entre eles. Se houvesse alguma elasticidade mesmo imperceptível nos corpos duros, essa elasticidade poderia explicar os fenômenos dos impactos.

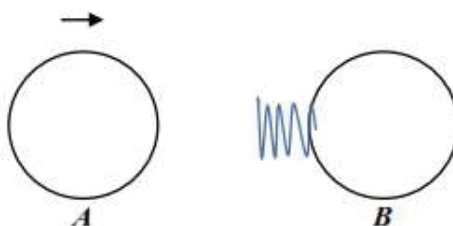


Figura 7 – Dois corpos elásticos colidindo podem ser comparados a dois corpos colidindo com uma mola entre eles. Fonte: o autor

As investigações sobre a elasticidade dos corpos, no entanto, não foram capazes de conduzir a uma explicação para os comportamentos observados nos choques. É possível mostrar que no caso de dois corpos elásticos colidindo, de fato haveria duas forças iguais e opostas, no entanto elas produziriam um resultado diferente da experiência. Em síntese, a força impulsiva e de resistência seriam a metade do que realmente se observa pelos experimentos. Para que o resultado se conformasse exatamente aos experimentos, desde o primeiro contato não elástico dos corpos já precisaria haver uma força de resistência atuando, como mostra a figura abaixo.²⁷⁷

²⁷⁶ Herivel, 1965.

²⁷⁷ Eu também tentei realizar uma reconstrução de uma investigação como essa, da maneira como Newton poderia ter feito. Não é difícil chegar a essa conclusão mencionada.

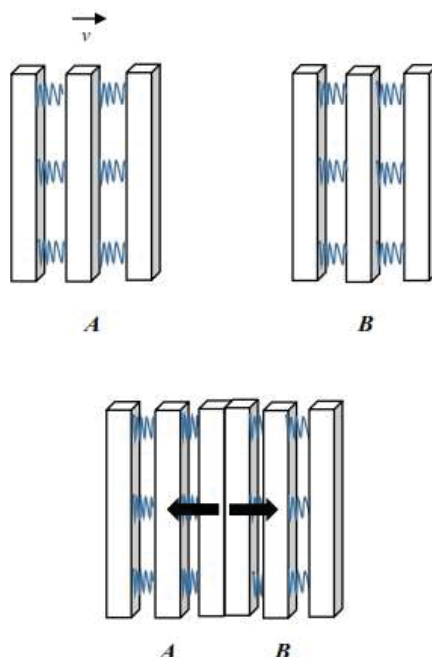


Figura 8 – Mesmo em corpos elásticos, para que a força de resistência ocorresse tal como observada nos experimentos deveria haver uma resistência atuando já no primeiro contato não elástico entre as partículas das superfícies dos corpos.

Na figura acima há uma representação das menores partículas de um corpo elástico durante o impacto com outro. É possível mostrar que, para haver uma conformação da explicação com os resultados observados pelos experimentos, seria necessário admitir que já no contato não elástico entre as primeiras partículas há uma *força de resistência* atuando. Em suma, a força de resistência e a igualdade desta com a força impulsiva não deriva da elasticidade dos corpos.

Diante da impossibilidade de explicar a força de resistência dos corpos e a igualdade entre essa força e a força impulsiva por meio da elasticidade dos corpos, e diante da constatação de que mesmo nas menores partes dos corpos durante um impacto essas forças já começam a atuar, não restou a Newton outra alternativa senão admitir que a matéria tem um “poder de resistir” à mudança. Com efeito, na *definição 3* dos *Principia*, Newton afirma que os corpos possuem uma “força inata”, proporcional à sua massa, que não passa de um “poder de resistir” da matéria: “A força ínsita [*vis insita*], ou a força inata da matéria, é um poder de resistir, pelo qual todo corpo, na medida em que se encontra, permanece no seu presente estado, seja de repouso, ou de movimento uniforme em linha reta”.

Esse “poder”, contudo, manifesta-se somente quando o corpo é excitado por algum impulso, e oferece uma força de resistência ao impulso sempre na mesma medida deste último. “Um corpo somente exerce essa força”, continua Newton, “quando outra força é

impressa sobre ele, levando-o a mudar o seu estado”. E seria por meio dessa “força”, ou desse poder da matéria que também se explicaria a igualdade da força impulsiva e da força de resistência. Se há um poder de resistência à mudança na matéria, também o corpo em movimento que se choca com outro em repouso exercerá uma resistência em mudar o seu estado de movimento, no caso, uma resistência em diminuir a sua velocidade. Assim, a própria *força impulsiva* é também a manifestação da resistência da matéria em alterar o seu estado de movimento, o que leva Newton a uma conclusão bastante significativa também expressa na *definição 3*:

(...) o exercício dessa força deve ser considerado tanto como resistência quanto impulso; é uma resistência na medida em que o corpo, para manter o seu presente estado, opõem-se à força impressa; é um impulso na medida em que o corpo, ao não ceder facilmente à força impressa de outro, provoca uma mudança de estado no outro. Resistência geralmente é atribuída a corpos em repouso, e impulso a corpos em movimento; mas movimento e repouso, como popularmente concebidos, são apenas relativamente distinguidos; de modo semelhante, os corpos que são popularmente considerados em repouso nem sempre estão verdadeiramente em repouso.²⁷⁸

Impulso e resistência são termos relativos. Não há uma força realmente impulsiva e nem uma força realmente resistiva, considerando-se a relatividade do movimento e repouso. A mesma interação entre dois corpos, um em repouso e outro em movimento, pode ser vista maneira inversa de outro ponto de referência. Disso se segue que ambas as forças implicadas na interação entre dois corpos são *forças de resistências*, inseparáveis, e que derivam em última análise do “poder de resistir” da matéria. E disso também se segue que a matéria, que fora considerada por Descartes, Huygens e outros como inativa, em virtude da sua natureza inerte, deve assim ser admitida apenas quando considerada isoladamente. Quando numa interação, ela se torna, de outra sorte, *ativa*. Segundo Westfall essa constatação dá origem a “um dos maiores paradoxos da ciência moderna”, a saber, o princípio da “atividade da inatividade”, expresso na *definição 3* dos *Principia*.²⁷⁹ Esse é o sentido literal da expressão *vis inertia*, ou “força da inatividade” da referida definição. “A respeito disso, essa força ínsita, por um nome mais significativo, pode ser chamada de inércia [*vis inertia*] ou força da inatividade”.

Mas à parte esse paradoxo, Newton se vê impelido por essas observações a admitir o que sabemos que ele vai chamar de terceira lei do movimento. Toda atividade produz uma resistência igual e contrária. Todo impulso gera uma força de resistência contrária. Ou, como Newton preferiu omitir a menção explícita à resistência da matéria do enunciado da lei, “para

²⁷⁸ MC, p.2.

²⁷⁹ Westfall, 1971.

toda ação sempre há uma reação igual e oposta”. As ações entre dois corpos são sempre mútuas, inseparáveis, iguais e em sentidos opostos.²⁸⁰ Voltando à representação dos corpos *A* e *B*, teríamos agora sua versão mais acabada:

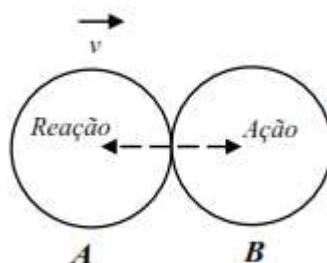


Figura 9 – Interpretação mais acabada de Newton para o fenômeno da colisão entre dois corpos. Durante a colisão surgirão forças iguais e opostas – a ação e reação.

A partir da exposição feita até aqui já é possível perceber a contribuição original de Newton ao estudo das colisões. Pela sua frutífera abordagem metodológica de considerar somente as *forças impressas*, e das suas reflexões sobre a *força de resistência* dos corpos, ele foi capaz de chegar à terceira lei do movimento. A segunda lei, no entanto, não emergiu desses estudos na sua forma completa. Desses estudos, nada pode ser deduzido a respeito dos choques oblíquos, que aparecem no comentário de Newton à sua segunda lei. De fato, as considerações sobre ação de forças oblíquas, ao contrário do que Newton afirma no escólio, não podem ser derivadas dos estudos dos impactos de Huygens, Wren e Wallis. Nem mesmo com esses acréscimos e reformulações do próprio Newton até aqui. Para chegar ao enunciado completo da segunda lei ele teve de relacionar os métodos de composições de forças das máquinas simples com a análise de Huygens da conservação de movimento do centro de gravidade de um sistema de corpos que se chocam. Combinando esses dois resultados, Newton pôde chegar à regra do paralelogramo, que, por sua vez, o levou ao enunciado completo da segunda lei para “forças resultantes”.

As regras sobre os impactos entre corpos de Huygens, Wallis e Wren, portanto, definitivamente não foram obtidas por meio das três leis do movimento. Tampouco podem ser derivadas facilmente, ou perfeitamente, dessas investigações. No entanto, com as contribuições e os complementos do próprio Newton a esses estudos – e também com a sua proposta de abordagem dinâmica – é sim possível obter a segunda e a terceira lei do movimento. Em outros termos, os estudos de Newton não divergem daqueles de Huygens,

²⁸⁰ Como se percebe, Newton se refere à força impressa agora somente como uma “ação”. A ação de um corpo sobre outro é dissociada do próprio corpo que a produz.

Wren e Wallis. Newton apenas complementou aquelas investigações com outras por ele sugeridas, e usou o seu gênio para interpretar os dados matemáticos e empíricos que em boa parte deles já possuía para os encontrar parâmetros matemáticos que seriam adequados para a análise dinâmica que originalmente se buscavam. Tanto que não tenho notícias de qualquer um deles ter questionado as conclusões de Newton. Aparentemente, elas foram de fato aceitas como a solução do problema. Assim, não vejo porque não conceder que essas leis podem ser consideradas satisfatoriamente confirmadas pelas experiências dos impactos realizadas por Wallis, Wren e Huygens, conforme a intenção principal do texto do escólio, contanto que compreenda que está implícito que o próprio Newton também deu contribuições fundamentais a esse processo, ou talvez mais do que isso, contribuições que na verdade encerraram o problema.²⁸¹

Mas fica em aberto, evidentemente, a questão da primeira lei. É claro que sabemos que ela foi assumida como ponto de partida no trabalho de todos envolvidos nos estudos das colisões, citados até aqui. Mas poderia ela também ser considerada como “confirmada” pelos experimentos? A assim chamada “lei da inércia” possui algum sólido fundamento empírico? O programa da geometria mecânica de Newton depende igualmente da validade dessa lei. Como essa questão é mais complexa, e foge da discussão de Newton no escólio, recomendo ao leitor que quiser mais detalhes que leia o apêndice *A, Fundamentos empíricos da primeira lei do movimento*²⁸². Em síntese, esse apêndice mostra que, mesmo partindo da inércia circular de Galileu, as formulações da segunda e terceira lei empreendidas por Newton, em associação com os seus estudos sobre o movimento circular e as atrações, conduzem a evidências empíricas da primeira lei. Então, a resposta que eu ofereço a questão acima é *sim*, a primeira lei do movimento também tem um sólido fundamento empírico, e Newton tinha consciência disso. Na seção seguinte nos será útil avaliar a discussão do escólio sobre a validade da terceira lei nas atrações.

5.2.4 A terceira lei nas atrações

A terceira lei do movimento é a mais essencial das três leis. Embora às vezes se atribua uma maior importância à primeira lei e às vezes à segunda lei, para Newton é a

²⁸¹ No APÊNDICE D ofereço um importante complemento à reconstrução histórica das contribuições de Newton à lei dos impactos, com uma reflexão mais madura sobre a analogia entre o equilíbrio das forças nas colisões e o equilíbrio das forças numa balança estática – a análise dos poderes mecânicos dos antigos.

²⁸² Para uma melhor compreensão do APÊNDICE A recomendo que se leia antes a próxima seção.

terceira que merece mais atenção. É nela que ele concentra o restante do seu escólio. Mas porque ela seria a mais essencial? Como vimos na seção anterior, o princípio fundamental que Newton supostamente encontrou na sua investigação sobre os choques é que há uma *resistência* da matéria em modificar o seu estado, e essa *resistência* surge somente no momento da interação entre dois corpos na forma de um par de forças iguais e contrárias que foram chamadas de ação e reação. Desse princípio fundamental da ação e reação dos corpos durante o impacto é que surge tanto a lei da conservação da quantidade de movimento quanto a segunda lei, que não passa da consideração isolada de um dos polos dessa interação. É por isso que se há uma lei que merece mais discussão do que as outras, essa lei é a *terceira*. Newton, então, passa a uma série de considerações experimentais que reforçam a validade da lei da ação e reação. A primeira delas está relacionada a uma reconstrução do dispositivo pendular de Wren, seguido de novos testes.

Newton usou um pêndulo de aproximadamente três metros e fez uma análise rigorosa dos erros experimentais. O comprimento maior do pêndulo reduz os erros experimentais proveniente das variações das marcações das velocidades dos corpos e da resistência do ar. Em seus experimentos, Newton tenta contornar as suposições idealizadas da perfeita dureza dos corpos e da perfeita elasticidade, assumida pelos seus antecessores. Ele faz experimentos com vários tipos de materiais e determina a *força elástica* desses materiais. Em seguida, desconta a força elástica dos corpos assim como fora feito anteriormente para a resistência do ar.

Para prevenir uma objeção que talvez possa ser levantada contra essa regra – pois a prova desse experimento supõe que os corpos seja ou absolutamente duros ou perfeitamente elásticos (e semelhantes corpos não são encontrados na Natureza) – devo adicionar que os experimentos que temos descrito, de modo algum dependendo dessa qualidade de dureza, tem êxito tanto com corpos duros quanto com os corpos maleáveis. Pois se as regras forem testadas em corpos que não são perfeitamente elásticos, basta diminuirmos a reflexão na proporção requerida pela quantidade da força elástica do corpo.²⁸³

Em seguida Newton fornece os dados que obteve usando bolas de algodão fortemente comprimidas, aço, cortiça e vidro. Esse experimento adicional, mais rigoroso, é fornecido como uma evidencia adicional para a vigência da terceira lei. Ele conclui: “E assim a terceira lei, na medida em que se refere a percussões e reflexões, está provada por uma teoria que concorda exatamente com a experiência”.²⁸⁴

²⁸³ MC, p.24.

²⁸⁴ Ibid, p.25. Original em latim: “Atque hoc pacto lex tertia quoad ictus & reflexiones per theoriam comprobata est, qua: cum experientia plane congruit”.

A segunda consideração que Newton lança mão para defender a confirmação experimental da lei da ação e reação está relacionada com a ciência dos poderes mecânicos, ou das máquinas simples. Basicamente, ele afirma que a terceira lei é confirmada abundantemente pelos exemplos das ciências dos poderes mecânicos. E na sequência ele fornece detalhes da observância desse princípio em balanças, polias, parafusos, cunhas, marretas, rodas (engrenagens ou rodas com eixo) e “em todas as máquinas”. Por fim, conclui:

Mas tratar de mecânica não é o presente interesse. O objetivo era apenas mostrar por meio desses exemplos, a grande extensão da certeza da terceira lei do movimento. Pois se estimarmos a ação do agente pelo produto da sua força e velocidade, e do mesmo modo a reação do impedimento pelo produto da velocidade das suas várias partes, e as forças de resistência que surgem da fricção, coesão, peso e aceleração dessas partes, a ação e reação em operação em todos os tipos de máquinas será sempre igual uma a outra. E na medida que a ação é propagada pelo intermédio de instrumentos até ser finalmente imprimida sobre o corpo resistente, a sua última direção será sempre contrária à direção da reação.²⁸⁵

A terceira consideração que Newton faz a respeito da confirmação experimental da ação e reação está relacionada à sua validade também para *atrações*.²⁸⁶ Newton faz menção a um experimento com um ímã e um pedaço de ferro flutuando em água, supostamente sobre uma cortiça ou outra coisa qualquer. No experimento observa-se que a atração é igual nos dois corpos e após se encontrarem permanecem em equilíbrio. Não é difícil notar nesse experimento sugerido por Newton que as forças de cada corpo podem ser seguramente determinadas pela proporção das distâncias percorridas por cada um, e também pela permanência dos corpos em equilíbrio após o contato. No entanto, Newton ainda oferece uma explicação adicional. Se a pressão de um dos corpos sobre o outro fosse eventualmente maior, o sistema dos dois corpos permaneceria com “um movimento continuamente acelerado; o que é absurdo e contrário à primeira lei”.²⁸⁷

É conveniente perceber aqui que Newton não usa uma argumentação por absurdo à moda medieval para confirmar a terceira lei para as atrações, nem precisa usar a primeira lei para este propósito. O leitor deve observar que esse é um argumento meramente suplementar ao experimento do ímã. A experiência revela que a força atrativa do ímã também obedece à conservação da quantidade de movimento dos dois corpos e, portanto, também à lei da ação e reação. E se por acaso ocorresse de modo diferente teríamos, ainda, a violação da primeira lei

²⁸⁵ Ibid, p.27-28.

²⁸⁶ Até aqui tenho usado termos como “confirmado”, “provado”, entre outros, sem muita preocupação em esclarecer o seu sentido. Faço isso preliminarmente porque é a terminologia usada por Newton. No volume II, especialmente no cap. 18, ofereço uma discussão mais detalhada do confirmacionismo de Newton.

²⁸⁷ Ibid, p.25.

e um evento inconcebível. Mas esse argumento suplementar serve para tornar mais claro o sentido do experimento imaginário que Newton introduz em seguida. Supondo que haja uma atração também dos planetas sobre outros corpos, e supondo que a própria coesão dos planetas seja produzida por uma atração semelhante das suas partes, nesse caso, a atração do planeta sobre outros corpos, e também a atração mútua das partes do planeta deveria obedecer a terceira lei do movimento, pois se assim não fosse o planeta iria adquirir o movimento acelerado inconcebível anteriormente referido. Assim, caso houvesse realmente uma atração planetária essa atração deveria ser como a atração do ímã.

Não é difícil perceber que essa última consideração de Newton sobre a atração nos planetas não tem igualmente a finalidade de confirmar a terceira lei do movimento para atrações. Apenas o experimento do ímã pode assumir esse papel. Essas observações sobre os planetas são, talvez, algumas informações que aqui poderia figurar apenas como especulações realizadas a partir do experimento com o ímã, mas que, evidentemente, no discurso de Newton, assumem um tom mais assertivo em virtude da visão retrospectiva do autor naquela altura do seu trabalho. Em outras palavras, não é o experimento do ímã ou os argumentos por absurdo que convencem Newton da igualdade da ação e reação numa suposta atração dos planetas. É todo o restante das investigações dos *Principia*. Por essa razão, talvez fosse mais conveniente inserir essas considerações no escólio apenas no nível especulativo, e esperar o desenvolvimento completo do tratado para voltar a elas. Desse modo não se correria o risco de desviar o foco do objetivo dessa etapa do escólio, que é mostrar que a terceira lei também vale para atrações magnéticas, e que, por essa razão, desconfia-se que também tenha validade para qualquer outro tipo de atração.

Uma última questão. Porque Descartes, Huygens e outros, não consideraram a validade da lei da conservação da quantidade de movimento para as atrações e Newton foi capaz de fazê-lo? Como já vimos anteriormente, o objetivo daqueles pensadores era descobrir as forças de *impacto* entre os corpos, ou, uma lei que relacionasse os corpos antes e depois desse impacto. Naturalmente, impacto requer *contato*. A relação procurada por eles, por conseguinte, dado este pressuposto, seria entre o contato ou impacto da matéria supostamente invisível mobilizada pelo ímã e o ferro, e não do próprio ímã e do ferro. No caso de Newton, a situação tornou-se diferente devido a sua abordagem metodológica a respeito das forças. Em virtude da sua abordagem particular, ele poderia inicialmente ignorar o corpo gerador da força e considerar somente a *força impressa* no corpo sujeito à ação. Assim, ele poderia determinar isoladamente a força, digamos, num corpo A , e separadamente determinar a força atuando num corpo B . Mas se houver um caso em que força no corpo A , proporcional a $\Delta m_A v_A$, em

variadas configurações, seja sempre igual a força num corpo B , proporcional a $\Delta m_B v_B$, da terceira lei do movimento se segue que ambos os corpos, com grande probabilidade, estão interagindo entre si, mesmo que não saibamos como, efetivamente, seria isso possível. E mesmo que não se pudesse conceber por qual meio os corpos interagem, ainda assim poderíamos trabalhar como se os corpos realmente interagissem, sem que percebamos qualquer contato ou meio de interação. Aparentemente, esse procedimento metodológico de Newton o permitiu trabalhar com uma abordagem dinâmica nas atrações sem que ele precisasse de uma hipótese explicativa para o meio de interação. Sem dúvida essa foi uma das grandes vantagens do procedimento de Newton, e que tornou possível a ele chegar à gravitação universal enquanto outros permaneceram estagnados imaginando hipóteses que pudessem justificar o meio de interação.²⁸⁸

5.3 A FORÇA CENTRÍPETA

5.3.1 Def. 5: a definição geral de força centrípeta

Antes de passarmos ao próximo capítulo será conveniente introduzir uma breve nota sobre mais uma das definições dos *Principia*. É a importante definição de “força centrípeta”. Na definição 4, Newton esclarece o seu conceito de “força impressa” e ensina que essas forças provêm de diferentes origens, como, por exemplo, “de percussão, de pressão e de força centrípeta”. Na definição 5, ele desenvolve o seu conceito original de “força centrípeta”. Trata-se de uma força impressa num corpo em movimento que é direcionada para um único ponto imóvel. É uma força contínua, portanto, que muda de direção à medida que o corpo a ela submetido prossegue em movimento, e frequentemente produz uma curva fechada. Um dos exemplos que Newton menciona no comentário à definição é de uma funda, ou uma pedra girando amarrada por um fio, que tem uma “tendência” a se afastar do centro, mas que é impedida pela ação da força do fio no sentido contrário, mantendo-a percorrendo a sua órbita, e sem a qual a pedra simplesmente seria projetada tangencialmente à trajetória do seu movimento. “Essa força”, diz Newton, “que continuamente se opõe a essa tendência, e por meio da qual o fio continuamente desvia a pedra em direção à mão e a retém na sua órbita (...) eu chamo de *vis centripeta*”.

²⁸⁸ O APÊNDICE D oferece um complemento à essa seção.

A força centrípeta, no entanto, pela sua definição, não é sempre uma força direcionada para o *centro* de uma curva fechada. No caso de um círculo, como no exemplo citado acima, ela coincide, de fato, com o centro. Mas, rigorosamente, não é necessário que a curva sequer seja fechada. A única imposição é que ela seja direcionada para um único ponto fixo. Como Newton esclarece em outro lugar, ele atribuiu esse nome em homenagem à *vis centrifuga* de Huygens, introduzida nos estudos sobre o movimento circular que o matemático holandês empreendeu alguns anos antes da elaboração dos *Principia*, e que contribuíram significativamente para a ideia e desenvolvimento dessa força análoga. Na seção intitulada *De Vis Centrifuga* do seu aclamado *Horologium Oscilatorium*, Huygens havia mostrado que um corpo em movimento circular tinha uma tendência em se afastar do centro proporcional a v^2/r onde v correspondia à velocidade do corpo em movimento circular e r ao raio da trajetória. Sintetizando esse resultado com seus estudos dinâmicos, Newton concluiu que a força que deveria ser aplicada pelo fio sobre a pedra, para mantê-la girando em sua órbita, deveria possuir precisamente a mesma proporcionalidade da força centrífuga de Huygens. Em outros termos, a força centrípeta necessária para manter um corpo numa trajetória circular deveria ser dada por:

$$F_c \propto \frac{v^2}{r} \quad [9]$$

A igualdade entre a *força centrífuga* e a *força centrípeta* ainda foi ilustrada por Newton no escólio à proposição 4 do Livro I. Nesse escólio é apresentado um experimento de pensamento onde uma esfera movendo-se com determinada velocidade sem qualquer atrito se chocaria com as paredes de um recipiente em forma circular, como na figura abaixo.

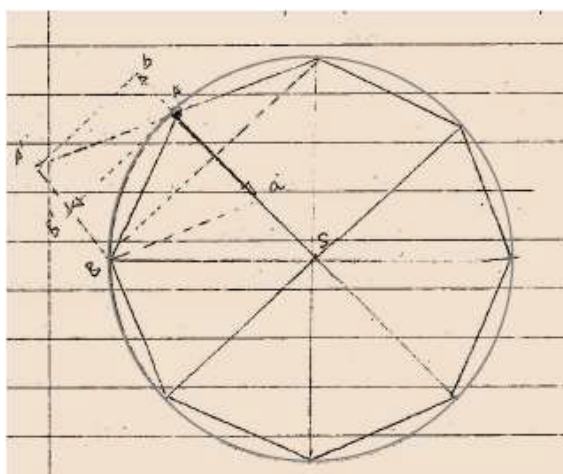


Figura 10 – Minha ilustração manual da descrição oferecida por Newton no escólio da proposição 4 do Livro I.

Newton argumenta que seria possível mostrar que, quando o número de lados do polígono inscrito no círculo se torna muito grande, a *força centrífuga* num movimento circular correspondente poderia ser encontrada, e que, além disso, a *força centrípeta* teria o mesmo valor.

Newton dá ainda dois outros exemplos de situações onde forças centrípetas poderiam ser geradas na natureza no seu comentário à definição 5. O primeiro deles é numa situação de atração entre um ímã e um pedaço de ferro. Se um pedaço muito pequeno de ferro em movimento uniforme fosse submetido a atração de um ímã de tamanho desprezível e fixado num ponto imóvel, o ímã exerceria sobre o pedaço de ferro uma força centrípeta. E se fosse possível acelerar o pedaço de ferro até que a sua velocidade alcançasse a proporcionalidade $v \propto \sqrt{Fr}$ (onde F é a força de atração do ímã e r é a distância do ferro até o ímã), seria possível, em tese, que o pedaço de ferro permanecesse numa órbita circular em torno do ímã²⁸⁹. O segundo exemplo é de um projétil sob a ação da força da gravidade. Supondo que na Terra haja uma força de atração constante em direção ao seu centro, se um projétil a uma distância determinada do centro da Terra fosse lançado num movimento tangencial a um círculo concêntrico ao planeta, com suficiente velocidade, esse projétil descreveria uma órbita circular. Num projeto alternativo dos *Principia* inicialmente composto por Newton numa linguagem mais popular e posteriormente abandonado²⁹⁰, ele fornece essa mesma explicação com uma ilustração que vale a pena inserir:

²⁸⁹ Newton não fez essa última consideração sobre a velocidade do ímã. Formulo esse exemplo com base na sua observação de que a força do ímã seria um exemplo de força centrípeta. Evidentemente hoje sabemos que a força magnética não é radialmente uniforme, portanto não seria possível um corpo descrever uma trajetória circular em torno de um ímã, com sugeri acima. No corolário 5 da proposição 5 do Livro III Newton demonstra consciência dessas particularidades da força magnética e suas diferenças da força da gravidade. De todo modo, para um pequeno deslocamento um pedaço de ferro poderia percorrer uma pequena trajetória curva por influência da força magnética de um ímã, satisfazendo assim o critério de definição de uma força centrípeta.

²⁹⁰ Essa versão popular dos *Principia* foi publicada pela primeira vez postumamente em 1728, e inserido na tradução inglesa dos *Principia* em 1934, por Florian Cajori. É chamado *De Mundi Systemate*.

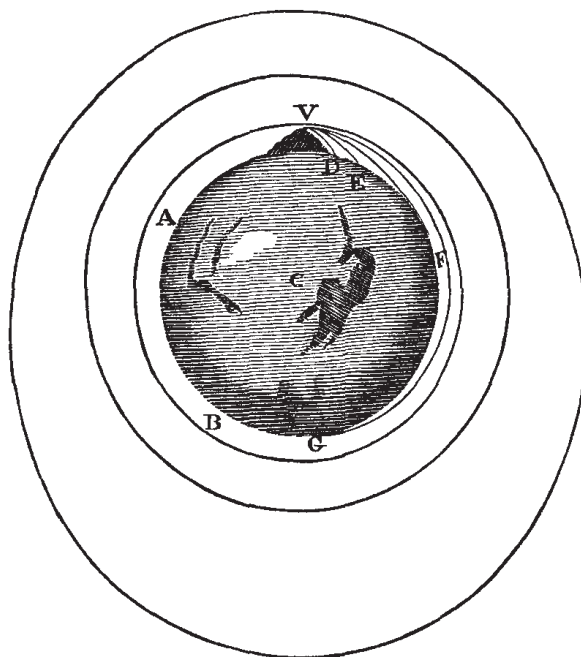


Figura 11: Ilustração de Newton no *De Mundi Systemate*. O projétil lançado de cima da montanha percorre uma distância cada vez maior até permanecer em órbita. Fonte: *De Mundi Systemate*, p.551.

Se do alto de uma grande montanha um projétil fosse lançado com velocidades cada vez maiores sob a ação de uma força centrípeta direcionada para o centro da Terra, em algum momento o corpo não mais atingiria a superfície e permaneceria em movimento numa órbita aproximadamente circular (ou elíptica, como veremos mais adiante). Em seguida, Newton termina o comentário à definição 5 afirmando que cabe aos matemáticos calcularem a quantidade da velocidade necessária para manter um corpo em órbita.

Embora estivesse apenas esclarecendo a definição de força centrípeta nesses exemplos, Newton aproveitou a ocasião para estabelecer alguns resultados que eram nada consensuais na sua época. Um deles certamente era aquele que afirmava que um movimento uniforme em linha reta com determinada velocidade, adicionado de uma força centrípeta, eram condições necessárias e suficientes para manter um corpo em movimento circular uniforme. Evidentemente, esse resultado levava a conclusão de que o movimento circular jamais fora um “movimento natural”, mas era composto por dois outros regidos por leis determinadas. Um deles uniforme, em linha reta, e o outro acelerado, direcionado continuamente para o centro da trajetória. Nem Galileu, nem Descartes, nem Huygens haviam chegado em semelhante conclusão²⁹¹. Descartes e Huygens não associaram a ação de uma força como explicação do movimento circular, ou seja, não atribuíram à uma força o papel de condição necessária para que um corpo descrevesse um movimento circular. A noção de *conatus* de

²⁹¹ Veja o apêndice A.

Descartes e a *força centrífuga* de Huygens não explicavam como e porque um corpo permanecia em movimento circular; apenas era uma determinação da tendência de um corpo em movimento circular em se afastar do centro. Assim, a ideia de *força centrípeta* de Newton foi decisiva para a consolidação de uma teoria consistente sobre as condições para um corpo descrever um movimento circular. Certamente essa ideia contribuiu significativamente para que o princípio da “inércia retilínea” pudesse ser estabelecido com mais segurança. E como veremos na próxima seção, foi também graças ao conceito de força centrípeta que a geometria mecânica de Newton pôde representar as curvas mais complexas que seriam necessárias para a análise da mecânica celeste.

5.3.2 Def. 6-8: quantidade absoluta, acelerativa e motriz da força centrípeta

Ao final da definição 5 Newton distingue três formas de abordar matematicamente as forças centrípetas. Essa distinção terá uma importância destacada nos *Principia*, por essa razão será necessário introduzi-las nesse ponto, embora seja provável que elas só poderão ser melhor compreendidas a partir do acompanhamento do seu uso concreto nos desenvolvimentos do tratado. A última frase da definição 5 afirma: “A quantidade da força centrípeta é de três tipos: absoluta, acelerativa, e motriz”. Em seguida são apresentadas as definições 6, 7 e 8, que esclarecem cada um desses “três tipos” de quantidades relacionadas a força centrípeta. Apesar de Newton não proceder a apresentação nos termos que encaminharei a seguir, a análise cuidadosa dessas definições permite perceber que o que enseja essa proposta é uma nítida distinção que ele já adotara nos seus estudos sobre as colisões. Uma distinção entre uma quantidade relacionada com a *causa* de um movimento, e uma quantidade relacionada com ao *efeito motriz* produzido por essa causa.

Nos seus experimentos com corpos em colisão, nem Wallis, nem Wren ou Newton foram capazes de encontrar um meio de determinar as leis e quantidades matemáticas que relacionavam as *causas* e os *efeitos* nessas colisões. Mais precisamente, eles não foram capazes de determinar a quantidade matemática que estaria relacionada ao corpo causal, ou ao *corpo impactante*, para que pudessem determinar a sua relação com a quantidade relacionada ao *efeito* do corpo impactado. Por outro lado, eles foram capazes de quantificar de maneira bastante razoável os *efeitos* do corpo impactado. Para construir a sua mecânica racional, Newton resolveu o problema da determinação das leis e quantidades matemáticas relacionadas às causas e efeitos de corpos em colisão, simplesmente abandonado esse projeto.

Em outras palavras, ele percebeu que não havia necessidade de determinar as proporções matemáticas precisas entre a causa e o efeito, ou mesmo determinar a quantidade absoluta da força no corpo causal que seria de alguma maneira transformada numa mudança de movimento do corpo impactado. De maneira muito simples, bastaria admitir que a quantidade da *causa* do movimento é proporcional ao a quantidade do *efeito motriz* produzido. Basicamente, é isso que a segunda lei do movimento afirma: a “força” (que seria uma quantidade vinculada à causa do movimento) – embora não saibamos como se determina a sua quantidade e nem como é transmitida na sua relação com o efeito – é proporcional à “força motriz impressa”, que nada mais é que o *efeito motriz*, ou o efeito em termos de movimento produzido no corpo que sofre uma ação de outro. Dessa perspectiva, o corpo gerador do efeito (a causa física) pode ser simplesmente ignorado num primeiro momento de análise matemática. O que se analisa é o *efeito* em termos de mudança de movimento no corpo que é afetado pela causa. E se assume que a força dessa *causa*, qualquer que seja, é proporcional à mudança na quantidade de movimento observada.

Pois bem, a distinção básica que Newton oferece aqui acerca da força centrípeta é a mesma. Ele distingue, em primeiro lugar, a “quantidade absoluta” da força, que está relacionada com a *causa*, das quantidades “acelerativa” e “motriz”, que estão relacionadas aos *efeitos* da primeira quantidade sendo *gerados* nos corpos afetados. O enunciado da definição 6 afirma: “a quantidade absoluta da força centrípeta é a medida dessa força que é maior ou menor na proporção da *eficácia da causa* sendo propagada a partir do centro para os meios circundantes”²⁹².

Aqui, naturalmente, Newton não tem em mente as colisões entre corpos, pois está discutindo o conceito de força centrípeta. Por essa razão ele usa como referência o exemplo da força magnética. O ímã é causa da força magnética atuando em outros corpos. É perfeitamente possível referir-se à quantidade da força *do ímã*, e a quantidade do *efeito motriz* que ele gera num pequeno pedaço de ferro. Em ambos os casos estamos falando sobre a mesma força. Mas Newton chama a primeira de “força absoluta” do ímã, e no segundo de “força motriz” (impressa). No último caso, essa quantidade pode ser utilizada para se determinar a quantidade da força do ímã em termos de movimento que ele produz no pedaço de ferro, ignorando-se as variáveis dessa força que dependem das características do ímã (seu tamanho, potência, área, etc); em outras palavras, ignorando-se a *força absoluta* propriamente do ímã. Essa será a situação mais comum. No entanto, haverá o momento nos *Principia* em

²⁹² CW, p.406. Grifos meus.

que Newton se voltará para a análise da “força absoluta” da gravidade, não ficando restrito à sua proporção matemática em termos do efeito motriz que produz. Isso ocorrerá particularmente na proposição 7 do Livro III.

Mas qual seria, agora, a diferença entre a quantidade “motriz” e “acelerativa” da força centrípeta? Primeiro, como já vimos, ambas se referem aos *efeitos gerados* em termos de movimento num corpo. A definição 7 afirma: “a quantidade *acelerativa* da força centrípeta é a medida dessa força que é proporcional à *velocidade que é gerada*, em um determinado tempo”.²⁹³ Já a definição 8 afirma: “a quantidade *motriz* da força centrípeta é a medida dessa força que é proporcional ao *movimento que é gerado* em um determinado tempo”.²⁹⁴

A “quantidade acelerativa” se refere ao efeito gerado em termos de “velocidade” ou, melhor dizendo, em termos da *mudança de velocidade* ou *aceleração* de um corpo. A “quantidade motriz” se refere ao efeito gerado em termos de “movimento”, ou melhor, em termos da *mudança na quantidade de movimento* de um corpo. Por isso Newton afirma mais adiante “a força acelerativa está para força motriz assim como a velocidade está para o movimento”, ou seja, assim como *mudança de velocidade* está para a *mudança na quantidade de movimento*. Em símbolos:

$$\frac{F_{acel}}{F_{mot}} = \frac{\Delta v}{m\Delta v}$$

Logo,

$$F_{acel} = \frac{F_{mot}}{m} \quad 295 \quad [10]$$

A força acelerativa é a força motriz por unidade de massa.

Alguém poderia dizer que a força acelerativa não passa, portanto, do próprio conceito de aceleração. Mas cabe observar que não é apenas isso. Newton esclarece que o que ele tem em vista aqui é a dependência da força somente em relação a distância a partir de um centro. Ele usa novamente o exemplo do ímã: dado um ímã de determinada potência, a sua potência “é maior em distâncias menores, e menor em distâncias maiores”. E acrescenta que a “força acelerativa” se refere a “uma certa eficácia difundida a partir do centro para cada um dos locais circundantes” que atua de modo a “mover os corpos que estão nesses lugares”,

²⁹³ Ibid, p.407. Grifos meus.

²⁹⁴ Ibid. Grifos meus.

²⁹⁵ Essa afirmação de Newton leva diretamente a formulação usual da segunda lei para forças contínuas. $F_{mot} = m \cdot F_{acel}$ ou $F = m \cdot a$

independente da causa dessa “eficácia” ser “algum corpo central (tal como o ímã no centro de uma força magnética ou a Terra no centro da força que produz a gravidade) ou ser outra causa que não é aparente”.²⁹⁶ Isso significa que a “força acelerativa” pode ser melhor entendida pelo conceito que hoje chamamos de “campo”.²⁹⁷ Embora na prática a “força acelerativa” seja a própria aceleração de um corpo, são as relações e os objetivos envolvidos que justificam chamá-la de uma “força” (assim como mais tarde foi chamada de “campo”). Primeiro, a aceleração aqui considerada não tem interesse em si mesma, mas sim como uma quantidade matemática proporcional à força que a gera, que por sua vez provém de um determinado centro. É a força do centro que realmente interessa na investigação e não a aceleração. Especificamente, é a lei de variação da proporção da força em relação a distância desse centro que é o foco do interesse. Segundo, a proporção da aceleração do corpo em cada ponto do espaço que circunda o centro é apenas um meio para analisar a variação da proporção dessa força com a distância desse centro. E para investigar a lei de variação dessa força em relação à distância, as características do corpo no qual a aceleração é gerada não devem ser consideradas, ou de outra maneira, devem ser consideradas *invariáveis* em qualquer ponto. Dito de outro modo, a quantidade de matéria dos corpos deve ser desconsiderada.

É pelo motivo esclarecido no parágrafo anterior que a “força acelerativa” não é simplesmente uma expressão equivalente à *aceleração*. A força acelerativa é a força considerada apenas na sua dependência da distância a partir de um centro, ignorando-se a sua dependência das características do próprio corpo sobre o qual atua, a saber, da sua massa. Na prática, essa força pode ser entendida como a mesma *força motriz*, porém aplicada num corpo de massa invariável, ou num corpo de massa unitária, ou ainda num corpo de massa muito pequena e invariável, como numa partícula. Esse último caso é precisamente o que Newton considera quando distingue a força motriz da força acelerativa afirmando que nessa última apenas a força exercida em uma “partícula individual” é considerada enquanto que na primeira se considera a soma das forças acelerativas de todas as partículas individuais. Ele declara: “porque a soma das ações das forças acelerativas nas partículas individuais de um corpo é a força motriz do corpo todo”.²⁹⁸

Portanto, a distinção entre quantidade absoluta, acelerativa e motriz da força centrípeta faz parte de um método de análise matemática que Newton instituiu para investigar

²⁹⁶ Ibid.

²⁹⁷ Atualmente, o conceito de “campo gravitacional” é entendido como a força por unidade de massa. Ao meu ver é precisamente essa noção que Newton está criando, embora evidentemente não a nomeie dessa forma. Nesse sentido, Newton teria sido o primeiro a conceituar o conceito de “campo”, que se tornou fundamental na física dos séculos seguintes.

²⁹⁸ Ibid.

especificamente as forças centrípetas que variam em relação à distância a partir do centro de força. É nitidamente o caso da força magnética e da força da gravidade, conforme o próprio Newton esclarece nos exemplos (embora o caso da gravidade ainda seria mostrado ao longo do tratado). No caso específico da força magnética, há reconhecidamente uma dependência dessa força em relação às características do ímã; e há, também, reconhecidamente uma dependência da força em relação a distância do ímã. Para investigar a dependência da força magnética em relação à sua fonte (o ímã), mantém-se um pequeno pedaço de ferro que sofrerá os efeitos da força do ímã a uma distância constante e a sua massa fixa; em seguida, variam-se as características do ímã (tamanho, massa, área, material, etc). Nesse caso se estaria investigando a “quantidade absoluta” da força do ímã. Para se investigar a dependência da força magnética em relação à distância do ímã, mantém-se fixo o ímã e a massa do pedaço de ferro que sofrerá os efeitos da força e se varia a distância livremente. Nesse caso se estaria investigando a “quantidade acelerativa” da força, pois se observará apenas os efeitos da aceleração do pedaço de ferro em relação à distância do ímã.

A quantidade motriz da força é utilizada na determinação da própria “potência” do ímã pelos seus efeitos motrizes; nesse caso, deve-se variar a massa dos corpos que sofrem os efeitos do ímã para investigar a proporção dessa força. Além disso, a força motriz também pode servir para investigar uma eventual dependência da força magnética em relação à quantidade de matéria dos corpos atraídos. Isso poderia ocorrer num caso em que se tem dois corpos magnéticos se atraindo mutuamente sem que se saiba que um deles tem poder magnético. Manter-se-ia fixo o ímã e a distância do corpo e se variaria somente a massa do corpo submetido ao ímã. Nesse caso, seria observado que a força também varia com as características do corpo, por exemplo, com a sua massa. Isso sugeriria que o corpo também atrai ao ímã e, portanto, possui igualmente propriedades magnéticas. Seria a conjugação dessas três quantidades matemáticas (acelerativa, motriz e absoluta), investigadas e determinadas cada uma por vez, que forneceria uma caracterização completa da força magnética entre os corpos considerados em todas as suas variáveis (ou ao menos principais variáveis).

Apresento, aqui, a distinção dessas três quantidades de força centrípeta principalmente para esclarecer que na maior parte dos estudos matemáticos do Livro I (da seção 1 a seção 11), Newton está investigando a “quantidade acelerativa” da força e, portanto, nem as características da origem (ou causa) da força está sendo considerada, nem as características dos corpos atraídos, ou seja, as suas massas. Até a seção 11, sempre que Newton se refere a “força centrípeta”, mesmo sem maiores especificações, ele está se referindo a sua “quantidade

acelerativa”.²⁹⁹ A construção de uma geometria mecânica que se fundamente na ideia de força (como Barrow havia sugerido por exemplo) utilizará, naturalmente, o que Newton aqui chama de “quantidade acelerativa” da força, uma vez que os corpos envolvidos na geração das figuras possuem um tamanho tão pequeno que são podem ser considerados na demonstração. Em outros termos, os corpos considerados na construção da geometria mecânica seriam “partículas”, ou corpos de mesma quantidade de matéria que à luz das dimensões das figuras que geram possuem um tamanho desprezível. Nas três primeiras seções do Livro I, como já foi adiantado, uma geometria mecânica de forças estará sendo construída e, portanto, os corpos envolvidos nas construções poderão ser considerados como “partículas”, e as quantidades acelerativas e motrizes das forças, as mesmas. Todavia a partir da seção 11 do Livro I e, principalmente, no Livro III, Newton estará considerando a física e não matemática, então será necessário se especificar quando se está analisando a força acelerativa ou a força motriz, uma vez que todos os corpos possuem uma determinada quantidade de matéria e, em geral, distintas.³⁰⁰ A partir daquele ponto, sempre que se disser “força acelerativa”, deve-se entender a força motriz por unidade de massa. Portanto, quanto se considera o movimento somente de uma partícula, como é o caso da construção de uma geometria mecânica, a força acelerativa é igual a força motriz; quando se considera de um corpo composto de partículas (a maior parte dos casos da natureza), a força acelerativa é a força motriz por unidade de massa.

$$F_{\text{acel}} = F_{\text{mot}} \quad (\text{partícula})$$

$$F_{\text{acel}} = \frac{F_{\text{mot}}}{m} \quad (\text{corpo massivo})$$

A quantidade absoluta da força, por outro lado, vai aparecer em pouquíssimas ocasiões nos *Principia*. Primeiro, porque no caso da força responsável pelos movimentos planetários não se sabia qual era a origem. Do mesmo modo, não se sabia qual era a origem da força da gravidade. A determinação da causa, ou da origem, dessas forças era precisamente um dos objetivos centrais do tratado. Em segundo lugar, a quantidade absoluta da força aparece em poucas ocasiões nos *Principia* porque o próprio método proposto por Newton é partir dos efeitos para chegar às causas. Portanto, o percurso que ele seguirá será considerar inicialmente a quantidade da força centrípeta relacionada aos efeitos motrizes e acelerativos nos corpos

²⁹⁹ Na seção 11 e no Livro III as quantidades motrizes e absolutas serão requisitadas.

³⁰⁰ Como se mostrará mais adiante, embora a seção 11 esteja no Livro I, Newton já está considerando corpos com massa.

sobre os quais atua, para dessa consideração inferir a origem da força; e, a partir de determinação da sua origem incluir a análise da sua quantidade absoluta. Esse aspecto metodológico surge no último comentário de Newton à definição 8:

É nesse mesmo sentido [de quantidade aceletativa e motriz da força centrípeta] que chamo as atrações e impulsos de acelerativos e motrizes. Além disso, uso expressões como atração, impulso, ou qualquer propensão para o centro, indiferentemente e indiscriminadamente, considerando as forças não do seu ponto de vista físico, mas do ponto de vista matemático. Portanto, precavenha-se o leitor de pensar que eu esteja definindo em qualquer lugar a espécie ou modo de ação ou a causa física ou razão; ou que esteja atribuindo força num sentido verdadeiro e físico a centros (que são pontos matemáticos), se eventualmente ocorrer de se falar que centros atraem ou que centros tem forças.³⁰¹

Nessa passagem, aparentemente Newton procura deixar claro que ao empregar termos que possuem um sentido notadamente *físico*, como “impulso” ou “atração”, e ademais um sentido físico que faz alusão a *causas* do movimento, ele não está, com efeito, tratando verdadeiramente das causas. A explicação de Newton na sequência pode sugerir que a sua justificativa está assentada no fato de que ele não está lidando com o aspecto físico das causas, mas somente com o seu aspecto matemático. Entretanto, parece-me que não é esse o ponto exato da sua justificativa. À luz do que foi desenvolvido nessa seção, ele estaria enfatizando que ao se analisar os fenômenos matematicamente, torna-se possível considerar a proporção da força associada a uma causa apenas pela quantidade dos seus *efeitos motrizes e acelerativos* nos corpos sobre os quais essa força atua, mesmo que não se tenha uma única pista sobre a origem dessa força. Essa interpretação está implícita no contexto do próprio parágrafo, em que Newton está se referindo especificamente às quantidades *motrizes* e *aceletativas* da força. E por esse motivo ele segue dizendo que usa as expressões “impulso”, “atração”, “propensão para o centro”, de maneira indiscriminada, intercambiável; com efeito, pouco importa como serão chamadas essas quantidades (acelerativa e motriz) ao longo do texto; o que está claro é que em todos os casos o que se estará sendo considerado é a quantidade da força a partir dos seus *efeitos*. Quando se diz, portanto, que um corpo está sendo atraído para um “centro”, na verdade o que se quer dizer é que a força que atua no corpo – qualquer que seja a sua causa – gera um *efeito* motriz (ou acelerativo) em direção a um determinado ponto, e essa força é proporcional a esse efeito motriz (ou acelerativo).

³⁰¹ Ibid, p.408.

Esclarecido o conceito central de força centrípeta e todas as suas variantes, podemos agora passar construção propriamente dita da geometria mecânica, usando justamente essa noção de força centrípeta (acelerativa).

6 A CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA MECÂNICA DE FORÇAS

Na seção 5.2 apresentei as considerações de Newton no escólio às leis do movimento em favor da validade dessas leis. No APÊNDICE A ofereci um complemento sobre a validade da primeira lei do movimento, ou da “inércia retilínea”, como eu a chamei naquele texto. Em linhas gerais, pode-se afirmar que Newton construiu as suas três leis do movimento a partir (1) dos resultados obtidos das investigações empíricas de Galileu na queda dos corpos e movimento dos projéteis; (2) das investigações empíricas acerca das *colisões* e *atrações* entre corpos, onde foi estabelecida a conservação da quantidade de movimento total dos corpos para ambas as situações; e (3) das investigações sobre o movimento circular, que contribuíram para a confirmação do princípio da inércia retilínea³⁰². A partir de agora, as três leis do movimento serão tomadas não mais como princípios empíricos que representam o comportamento dos corpos na natureza, mas como axiomas matemáticos por meio dos quais se construirá uma geometria mecânica de forças em analogia com a natureza. Mas cabe ressaltar que nesse capítulo não seguirei estritamente o que foi realizado nos *Principia*. Quando Newton intitula a seção sobre suas leis do movimento de “Axiomas, ou Leis do Movimento”, a conjunção “ou”, no título, sugere a natureza dupla desses princípios, que, embora sejam leis que decorrem de investigações empíricas dos fenômenos, na sequência do tratado serão utilizados como axiomas matemáticos de um sistema de mecânica racional. Newton, contudo, não dá detalhes acerca disso. Esse passo deveria ser considerado uma trivialidade na época. Hoje, mais de três séculos depois, torna-se mais conveniente explicitá-lo. Portanto, apresentarei a seguir um modo mais enfático de realizar essa transição das leis do movimento para os axiomas de uma geometria mecânica utilizando alguns exemplos mais simples para facilitar compreensão. Sempre que possível usarei os exemplos do próprio Newton.

6.1 AXIOMAS DA GEOMETRIA MECÂNICA DE NEWTON

Abaixo apresento as três leis do movimento expressas, agora, como *axiomas* a partir dos quais se mostrará ser possível construir uma geometria mecânica dinâmica. Juntamente

³⁰² Para mais detalhes veja o APÊNDICE A.

com elas se introduzirá algumas definições complementares que, insisto, não seguem o que foi apresentado nos *Principia*³⁰³.

Definições:

1. Uma *força impressa* é resultado da interação (colisão ou atração) entre dois corpos. A *força impressa* pode ser instantânea ou contínua.
2. Uma força contínua constante é uma força instantânea proporcional ao tempo ($F \propto t$).³⁰⁴
3. Uma *força centrípeta* é uma força contínua direcionada para um único ponto fixo, ou aproximadamente fixo.
4. A *quantidade de movimento* de um corpo é caracterizada pelo produto da sua massa e velocidade (mv) e pela direção do movimento. Uma mudança na quantidade de movimento pode ocorrer em virtude da mudança de velocidade, massa ou direção do movimento.

Axiomas:

1. Na ausência de forças impressas os corpos permanecem em repouso ou movimento uniforme em linha reta.
2. A mudança na quantidade de movimento de um corpo é proporcional à força impressa nele; e é realizada na direção da linha reta na qual essa força foi impressa.
 - a. Corolário 1: a mudança na quantidade de movimento é proporcional à força resultante e na mesma direção desta.
 - b. Corolário 2: quando todas as forças se equilibram os corpos permanecem em repouso ou movimento uniforme.
3. Para toda força impressa em um corpo sempre há uma força impressa igual e em sentido oposto no outro corpo da interação³⁰⁵.

³⁰³ Avisarei o leitor sempre que usar um exemplo dos *Principia* nessa seção. Caso contrário, fará parte da reestruturação didática que estou lançando mão.

³⁰⁴ Se a força instantânea for proporcional ao tempo ($F_i \propto t$), então teremos trivialmente $F_i = k\Delta t$ e $k = F_i/\Delta t$, onde a k representa constante de proporcionalidade pela qual a força contínua constante opera. Evidentemente, isso é o mesmo que afirmar que uma força contínua e constante atuando num corpo é dada por $F_{cont} = F_i/\Delta t = \Delta mv/\Delta t = ma$, a relação que hoje é conhecida como a segunda lei de Newton para forças contínuas.

³⁰⁵ As duas definições e os três axiomas aqui apresentados foram levemente modificados em relação ao que Newton apresentou. A definição 1 não foi aprendida por Newton, e é obviamente anacrônica ao introduzir esse conceito específico de “interação”. Todavia, o nosso propósito nessa seção é mais didático. Ainda assim, acredito que essa definição pode ser perfeitamente obtida dos estudos de Newton sobre os choques e atrações. Descartes explicitou uma ideia semelhante a essa definição na discussão das suas leis da natureza, mas evidentemente a considerou apenas para o caso de impacto entre os corpos. Uma vez que Newton ampliou as suas

A partir das quatro definições e dos três axiomas apresentados acima o leitor preceberá que é possível construir figuras geométricas pelo movimento. Como foi esclarecido na *Parte I*, uma figura geométrica é uma figura construída de modo exato por um mecanismo de geração que obedece a leis exatas. No presente caso, o mecanismo de geração das figuras são as leis exatas que regem o movimento de um corpo, ou seja, os axiomas e definições assumidos logo acima. Com base nesses axiomas é fácil mostrar que podemos construir uma reta em qualquer direção, uma semi-parábola e outras curvas de vários graus. Uma reta, por exemplo, pode ser gerada por um corpo em movimento sem qualquer ação de forças (ou $F_R = 0$), ou por um corpo em repouso no qual seja impresso uma força impulsiva que o coloque em movimento; ou ainda por um corpo que sofra a ação de uma força contínua, contanto que esta força não seja oblíqua ao movimento. Em suma, existem muitas maneiras de construir uma reta a partir desses axiomas.



Figura 12: Um corpo em movimento sem qualquer ação de forças, ou com uma força resultante nula, gera uma linha reta. Fonte: o autor.

No caso da semi-parábola é possível construí-la a partir de um corpo movendo-se em linha reta com velocidade constante sujeito a uma força contínua e constante perpendicular ao movimento do corpo.

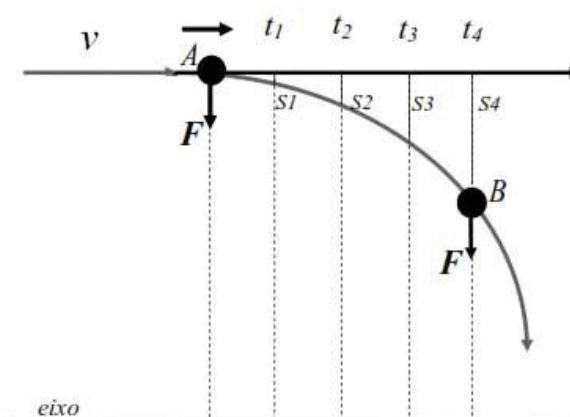


Figura 13: Um corpo em movimento que sofre a ação de uma força contínua e constante perpendicular ao movimento do corpo gera uma linha curva semi-parabólica. Fonte: o autor.

leis dinâmicas dos choques também para atrações, segue-se, naturalmente, um conceito de interação expandido. Na seção 10.5.2 será fornecido mais detalhes sobre esses dois tipos de interação nos *Principia*.

Pela definição 2, se há uma força contínua e constante atuando no corpo, então $F \propto \Delta t$. Dessa definição se segue que $\Delta mv \propto \Delta t$, ou simplesmente $\Delta v \propto \Delta t$. Para um intervalo de tempo muito pequeno ($\Delta t \rightarrow 0$)³⁰⁶ a velocidade tende a se tornar constante ($\Delta v \rightarrow v = \Delta S / \Delta t$), logo

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} \propto \Delta t$$

Donde,

$\Delta S \propto \Delta t^2$, ou simplesmente $S \propto t^2$, que é equivalente à condição de uma parábola.³⁰⁷

Utilizando um raciocínio semelhante ao utilizado para a semiparábola seria possível obter igualmente curvas de outros graus alterando a força contínua e constante para uniformemente variável. Uma curva de terceiro grau pode ser obtida com uma força contínua proporcional ao quadrado do tempo ($F \propto t^2$). Uma curva de quarto grau pode ser obtida com uma força contínua proporcional ao cubo do tempo ($F \propto t^3$). Uma curva de quinto grau pode ser obtida por uma força contínua proporcional à quarta potência do tempo ($F \propto t^4$), e assim por diante para curvas de graus mais elevados.

Como o auxílio de uma força centrípeta, como já vimos na seção 5.3, é possível construir um círculo perfeitamente. Para isso é necessário se imprimir, num corpo inicialmente em movimento uniforme em linha reta, uma força centrípeta proporcional a

$$F_c \propto \frac{v^2}{r}$$

Onde v^2/r é a razão entre velocidade do corpo e o raio do percurso circular em que ele se move.³⁰⁸

³⁰⁶ Em vez de dizer “quando o tempo for muito pequeno” ou “quando o tempo for infinitesimal”, ou ainda quando “ $\Delta t \rightarrow 0$ ”, usando o seu método das razões primeiras e últimas Newton provavelmente diria: “quando o ponto B se aproxima do ponto A até coincidir com ele”. Infelizmente a extensão desse trabalho não permitiu apresentar o método das razões primeiras e últimas de Newton, e por isso adotarei o método equivalente mais conhecido atualmente, que é dos infinitesimais. Contudo, convém deixar a advertência de que Newton criou o seu método das razões primeiras e últimas precisamente para evitar o método dos infinitesimais, que ele entendia possuir fundamentos geométricos pouco seguros. Com exceção de poucos lugares específicos usarei o método dos infinitesimais, que Newton também dominava e considerava ser apenas um “atalho” conveniente para economizar espaço e tempo.

³⁰⁷ Uma das condições geométricas que podem definir uma parábola é $\frac{S_1}{t_1^2} = \frac{S_2}{t_2^2} = \frac{S_3}{t_3^2} \dots$ que é equivalente S proporcional a t^2 .

³⁰⁸ Newton resolve em detalhes o caso da força centrípeta de um corpo movendo-se em um círculo na proposição 4 do Livro I dos *Principia*. Essa resolução é apresentada na seção 7.3.

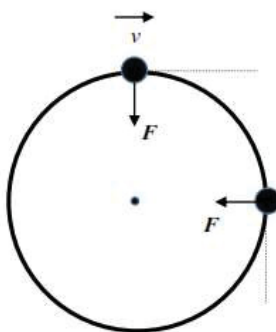


Figura 14: um corpo em movimento sob a ação de uma força centrípeta constante irá produzir uma trajetória circular. Fonte: o autor.

Além do círculo, é possível mostrar que se pode construir todas as seções cônicas com o auxílio de uma força centrípeta obedecendo a uma lei determinada. Mas, por ora, fiquemos com esses exemplos mais simples apenas para evidenciar com é perfeitamente possível construir uma geometria mecânica a partir dos axiomas anteriormente enunciados. A partir de agora, pretendo inverter o procedimento até aqui exposto e mostrar como é possível, a partir de certas condições geométricas inicialmente dadas, utilizar os axiomas a geometria mecânica para descobrir a força que está atuando num determinado corpo em movimento.

6.2 APLICAÇÃO DA GEOMETRIA MECÂNICA DE FORÇAS

Estabelecidos os axiomas da geometria mecânica de Newton é agora possível utilizar esses princípios para resolver alguns problemas simples de determinação de forças que atuam num corpo sendo oferecidas algumas condições geométricas iniciais. Por conveniência os problemas serão numerados, mas essa numeração nada tem a ver com os problemas apresentados nos *Principia*, que, sempre que forem aproveitados, serão acompanhados da respectiva referência. Esses problemas tem uma finalidade didática de transição, para então abordarmos os problemas mais complexos dos *Principia* sem perder o foco das questões de maior interesse nesse trabalho.

Problema 1: Determinar a força líquida impressa (força resultante) atuando num corpo movendo-se com velocidade constante em linha reta. Pelos axiomas 1 e 2, a força impressa líquida atuando sobre o corpo é nula. Ou nenhuma força atua sobre ele, ou a composição de todas essas forças é nula.

Problema 2: Determinar a força líquida impressa atuando num corpo que descreve uma linha reta e diminui a sua velocidade em ' Δv '. Pelo axioma 2, atua sobre o corpo uma força impulsiva, no sentido contrário ao seu movimento, proporcional a ' Δmv '.

Problema 3: Determinar a força atuando num corpo que descreve uma linha reta com movimento uniformemente acelerado, tal que a distância percorrida pelo corpo varia com o cubo do tempo ($S \propto t^3$). Pela definição 2 e axioma 2, há uma força contínua e variável atuando no corpo, cuja lei de variação é dada por $F \propto t^2$.

Problema 4: Determinar a força contínua atuando num corpo movendo-se num percurso parabólico segundo a figura abaixo:



Figura 15: ilustração do problema 4.

Pela definição 2 e axioma 2, há uma força contínua e constante atuando no corpo, direcionada para cima. E uma vez que no caso da parábola $S \propto t^2$, e que, quando $\Delta t \rightarrow 0$, $\Delta v \rightarrow v = \Delta S / \Delta t$, e portanto $\Delta v \propto \Delta S$; então, para esse mesmo intervalo de tempo muito pequeno temos $F \propto S$, e assim $S \propto Ft^2$, ou $F \propto S/t^2$. Em outras palavras, num movimento como o apresentado na figura acima temos uma força constante, para cima, e proporcional a S/t^2 .

Problema 5: Determinar a lei da força contínua, não constante, vertical, atuando num corpo movendo-se numa semicircunferência de raio AC, conforme a figura abaixo:

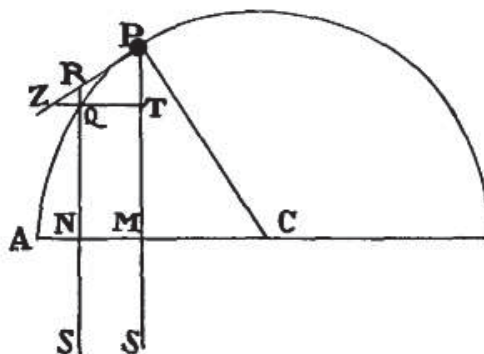


Figura 16: Figura da proposição 8 do Livro I dos *Principia*. Adaptado pelo autor.

quadrado do período da sua órbita seja proporcional ao cubo do seu raio. Esse problema consiste precisamente no questionamento sobre a lei da força necessária para manter os movimentos planetários, tal como eles foram descritos por Kepler. É o famoso problema conhecido como “problema de Hooke”. No próximo capítulo entraremos nas proposições do Livro I que servem para apresentar a solução a este difícil problema levantado por Robert Hooke³¹¹.

³¹¹ Como avisei na introdução dessa *Parte 2*, o leitor não especializado pode encontrar dificuldades para acompanhar os desenvolvimentos matemáticos do próximo capítulo. Se for o caso, recomendo que leia apenas a seção 7.1 e vá direto para a conclusão na seção 7.7.

7 A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE HOOKE

7.1 O PROBLEMA DE HOOKE

O problema de Hooke consistia em descobrir a lei de força necessária para manter os planetas numa órbita elíptica, assumindo que essa força fosse direcionada para um corpo central (o Sol). Há algumas dúvidas quanto à precisão da formulação desse problema do ponto de vista histórico, mas não vamos entrar nessa questão aqui. Vamos apenas admitir que o problema proposto por Hooke a Newton tenha sido aproximadamente este que expus aqui.³¹² Não é difícil perceber que Hooke está sugerindo um método bastante familiar a Newton. Trata-se do método da composição dos movimentos, utilizado outrora por Galileu e Barrow. Mas Hooke sugere a aplicação desse método de uma maneira inovadora.

O curador de experimentos da *Royal Society* estava investigando a gravidade pelo menos desde a década de 1660, e havia imaginado várias hipóteses explicativas para o fenômeno. Ele sabia que a gravidade se comportava como uma “força atrativa”, embora acreditasse que deveria haver um mecanismo de ação por meio do qual operava. As duas hipóteses sobre as quais Hooke mais se debruçou foi aquela que explicava a gravidade por meio de uma atração magnética e outra, ainda mais elementar, que o fazia por meio de uma teoria vibratória. Essa última hipótese era a sua mais original, que explicava tanto atração gravitacional quanto a magnética em termos mecânicos. Após aproximadamente uma década de investigações e experimentos, Hooke terminou abandonando definitivamente a hipótese de que atração dos planetas poderia ter alguma natureza magnética. Mesmo assim, continuou procurando explicar o mecanismo que produzia a atração gravitacional por meio de vibrações que se propagavam no éter.

Mas independente do seu progresso na explicação do mecanismo de ação por meio do qual a atração da gravidade ocorria, não há dúvidas de que Hooke desenvolveu uma hipótese da “gravitação universal” por volta da década de 1670. Em 1669, Hooke se envolveu numa pesquisa para descobrir o ângulo de paralaxe da estrela *y Draconis*, uma pesquisa que foi reportada em 1670, mas publicada somente 1674, e mais tarde se tornou a primeira das suas *Cutlerian Lectures* (1679). Bem no fim do seu tratado, Hooke avisa o leitor que no futuro próximo iria apresentar a explicação de um sistema do mundo diferente de qualquer outro conhecido, e sem recurso a qualquer tipo de força misteriosa, poderes psíquicos, etc. Esse

³¹² A outra possibilidade seria determinar a órbita fechada descrita por um corpo sob a ação uma força do tipo inverso quadrado. Sobre essa polêmica, leia o comentário de Cohen ,1999, p.12.

novo sistema, diz ele, dependeria de três suposições: (1) que todos os corpos celestes exercem um “poder gravitacional” em direção aos seus centros; (2) que todos os corpos, uma vez movidos, permanecem em movimento em linha reta; (3) que os graus de atração de um corpo sobre o outro diminuem conforme o outro corpo é afastado do primeiro.³¹³

Como destaca Centore, por volta dos anos de 1670, Hooke já havia reconhecido o caráter universal da gravidade “e que quaisquer dois corpos no universo gravitam um em direção ao outro”.³¹⁴ Hooke chegou mesmo a estender essa atração para toda a matéria. Explicou que para os corpos pequenos essa força era desprezível e não poderia ser percebida, e também que era por meio dessa força que dois corpos eram atraídos até tornarem-se “unidos”.³¹⁵ Ainda ressaltando o que afirma Centore, “que os planetas eram atraídos pelo Sol era uma visão amplamente aceita na época”, e para alguns até elementar, “mas a ideia que todos os corpos do universo atraem todos os outros em algum grau era revolucionária”.³¹⁶

Mas o que faltava a Hooke para apresentar o seu novo sistema do mundo era uma maneira de evidenciar as suas hipóteses. No seu tratado de 1674 ele admitiu que a sua terceira suposição precisava de confirmação experimental: “o que esses vários graus são eu ainda não verifiquei experimentalmente”.³¹⁷ O “grau de atração” do Sol para os planetas parece ter sido um problema que Hooke perseguiu de 1670 a 1679. Naturalmente, a matemática seria o caminho mais indicado. Há algum tempo ele já estudava a queda dos corpos e conhecia bem os progressos de Galileu nesse campo. Também conhecia as regras de Kepler e o trabalho de Borelli sobre o movimento dos astros. Não se sabe ao certo, mas em algum momento entre 1678 e 1679, Hooke levantou a hipótese de que essa atração obedeceria a uma lei que variava com o inverso do quadrado da distância. Não seria tão difícil imaginar como.

Primeiro, ele já havia percebido que uma força atrativa contínua e constante direcionada para o centro de um planeta (como a gravidade) produziria um movimento uniformemente acelerado com $S \propto t^2$ em direção a esse centro, como Galileu demonstrara. Segundo, ele deve ter percebido que a composição de um movimento inercial retilíneo de um corpo afastado a uma determinada distância do centro do planeta, com um movimento uniformemente acelerado continuamente em direção ao seu centro seria capaz de manter um corpo em uma órbita circular por um tempo indeterminado.³¹⁸ Terceiro, ele deve ter sido capaz de combinar esse caso específico do movimento circular com a regra dos períodos de

³¹³ Veja Centore, 1970, p.102.

³¹⁴ Ibid., p.112.

³¹⁵ Ibid., p.103.

³¹⁶ Ibid., p.103.

³¹⁷ Ibid., p.106.

³¹⁸ Ele caminha nessa direção na sua correspondência com Newton, em 1679.

Kepler para o movimento planetário, chegando a conclusão que essa força – ou esse movimento continuamente acelerado em direção ao centro – deveria ser inversamente proporcional ao quadrado da distância do corpo ao centro do planeta. Somente esses resultados já teriam o potencial de gerar uma grande movimentação entre os pensadores da época, pela originalidade e importância para variados campos do conhecimento. Mas Hooke não parou aí.

À época que Hooke investigava esses fenômenos já era consensual que as órbitas dos planetas primários não eram rigorosamente circulares. A hipótese mais aceita era a de Kepler, que essas órbitas eram elípticas, com o Sol em um dos focos. A complexidade dessa nova situação planetária, contudo, extrapolava em muito as suas habilidades matemáticas elementares do curador da Sociedade Real. Entretanto, como se sabia que os planetas primários também obedeciam à regra dos períodos de Kepler, não deve ter sido difícil a ele formular uma hipótese que afirmava que também nas órbitas elípticas a força deveria variar conforme o inverso do quadrado da distância. E com alguns dados astronômicos disponíveis, além de alguns testes precários em vários pontos da elipse, Hooke deve ter se convencido de que a sua hipótese era não apenas perfeitamente possível, mas também provável.

Mas, ainda assim, Hooke precisava de uma fundamentação matemática mais sólida para sustentar o seu novo sistema do mundo. Nesse processo, manteve contado com vários matemáticos e astrônomos de renome da sua época, como Halley e Wren, porém sem os resultados que procurava. O problema era mais difícil do que ele imaginara. Foi quando possivelmente o lembraram de um matemático recluso de Cambridge, como quem no passado ele já tivera um desafeto. Se existia alguém que poderia resolver esse difícil problema era esse ex-discípulo de Isaac Barrow, um dos poucos mestres que dominavam a arte da *geometria mecânica* (que estava pressuposta na hipótese da composição de movimentos de Hooke). Então, em 1679, Hooke iniciou uma correspondência com Newton. Trocam informações sobre vários assuntos, até, por fim, ele conseguir chegar ao seu ponto. Indagou o professor de Cambridge a respeito do seu problema, e apresentou a sua hipótese da composição de movimentos, sendo que um desses era um movimento de “queda”, continuamente direcionado para o centro do planeta. Newton respondeu que nunca havia ouvido falar dessa “hipótese”.³¹⁹ Em seguida, Hooke o informou sobre o seu “palpite” da variação conforme o inverso do quadrado da distância. Precisamente nesse ponto, Newton não mais respondeu às cartas de Hooke. A correspondência foi interrompida.

³¹⁹ Veja Koyre, 1965, p.221-260.

Cerca de quatro anos depois, Halley visita Newton em Cambridge e o pergunta sobre o mesmo problema de Hooke. Nessa visita, entretanto, fica sabendo que Newton silenciosamente resolvera o problema há alguns anos, por ocasião da correspondência com o Hooke. Com alguma insistência, Halley o convence a publicar seus resultados, e poucos meses depois o tratado *De Motu* é apresentado à *Royal Society*. O nome de Hooke sequer é mencionado. Hooke o acusa de plágio. Mas enquanto este último, indignado, pleiteia junto à academia o suposto plágio, Newton trabalha incansavelmente na composição de um tratado completo. Menos de dois anos depois, todo o *Principia* já estava concluído, e um novo sistema do mundo, sem precedentes à altura, é apresentado. Não imaginava Hooke que ao simplesmente transmitir o problema da força numa órbita elíptica para Newton, estaria fornecendo o *insight* que iria desencadear um processo de criação que não terminaria até que toda a teoria da gravitação universal estivesse construída e demonstrada.

A respeito da suposta deslealdade de Newton, a disputa entre os dois membros da *Royal Society* seguiu adiante, cada qual apresentou a sua defesa, e prevaleceram os valores da filosofia experimental dominante na instituição. Como afirmou Newton a Halley em 1686, Hooke tem tantos méritos pela gravitação universal quanto Kepler tem pelas “elipses”. Ambos apenas apresentaram um “palpite” que não foram capazes de provar.³²⁰ Com efeito, os árbitros da disputa devem ter entendido que a genialidade de Newton não repousava na ideia original que ele propusera (que poderia – ou não – ter sido formulada independentemente de Hooke), mas na sua inegável habilidade em demonstrar as suas conclusões. De fato, Newton foi capaz de demonstrar as suas conclusões muito além do que Hooke talvez jamais sonhara em poder fazê-lo. Como afirmou o astrônomo Alexis Clairaut acerca da queixa de Hooke em relação a Newton, uma geração após o ocorrido, o episódio entre os dois serve “para mostrar a distância que há entre uma verdade que é vislumbrada e uma verdade que é demonstrada”.³²¹

A seguir, apresentarei em detalhes a demonstração de Newton para o famoso problema proposto por Robert Hooke.

³²⁰ Carta de Newton a Halley, 20 de Junho de 1686. *Correspondence*, vol.2.

³²¹ Veja a citação em Cohen, 1999, p.21.

7.2 PROP. 1 E 2: LEI DAS ÁREAS E FORÇA CENTRÍPETA

7.2.1 Características gerais da força centrípeta

Conforme vimos na seção anterior, a hipótese de Hooke para o movimento planetário se fundamentava na admissão de um corpo (um planeta) se movendo com movimento uniforme em linha reta ser submetido a ação de uma força de atração contínua direcionada ao centro de outro corpo (o Sol), assumido como fixo. O objetivo de Newton seria determinar as características dessa força. Naturalmente, o matemático inglês usou a sua geometria mecânica construída especialmente para resolver esse problema. A partir da terminologia criada por Newton, o problema poderia ser reformulado da seguinte maneira: *determinar as características da suposta força centrípeta que atua num corpo descrevendo uma elipse, admitindo que a força é contínua, variável e direcionada para um dos focos da elipse, assumido como fixo*. Pelos seus axiomas, Newton sabe que rigorosamente não existe centro fixo, mas ele vai considerar de maneira preliminar esse caso mais simples. De todo modo, o centro fixo era uma das condições iniciais do problema levantado por Hooke, então não seria necessário considerar uma situação diferente nesse primeiro momento.

Newton apresentou a solução do problema de Hooke dividido em várias etapas nos *Princípios*, a partir dos teoremas e corolários que foram se estabelecendo com base nos seus axiomas, até chegar à solução final na proposição 11. Vários teoremas e corolários, entretanto, não são absolutamente necessários para a resolução específica do problema. Claramente eles tiveram um papel propedêutico nos estudos realizados por Newton até a solução definitiva, sendo, por essa razão, de grande interesse para resgatar o seu processo de pensamento. Porém, para evitar estender demais essa parte do presente trabalho, eles não serão considerados aqui. As proposições do Livro I estritamente necessárias para a apresentação da solução do problema de Hooke são as proposições 1, 2, 6 e 11. Acrescentei a esse conjunto, ainda, a proposição 4. Informo ao leitor que oferecerei a solução geométrica completa desse problema, e tanto quanto possível tentarei ser fiel aos métodos e procedimentos matemáticos do próprio Newton. Alerto que por vezes os procedimentos aqui apresentados poderão parecer obscuros à luz dos métodos atuais. Não obstante, o valor histórico de seguir a resolução do próprio Newton, para os nossos propósitos, compensará as dificuldades que emergirão desses percalços. Alerto, ademais, que a partir de agora voltarei a considerar os teoremas, leis, definições e demais proposições, conforme a numeração original de Newton nos *Princípios*.

Newton começa investigando as características do movimento de um corpo que está

sujeito a ação de uma força centrípeta contínua direcionada a um ponto imóvel. Ele demonstra que todo corpo movendo-se sob a ação de uma força centrípeta irá, necessariamente, mover-se com velocidade areal constante, ou, em outras palavras, irá descrever áreas iguais em tempos iguais. É isso que afirma a proposição 1 do Livro 1.

Problema 1. Teorema 1.

As áreas que os corpos que revolvem em órbitas descrevem por meio de raios traçados até um centro imóvel de força estão no mesmo plano imóvel, e são proporcionais aos tempos nos quais elas são descritas.³²²

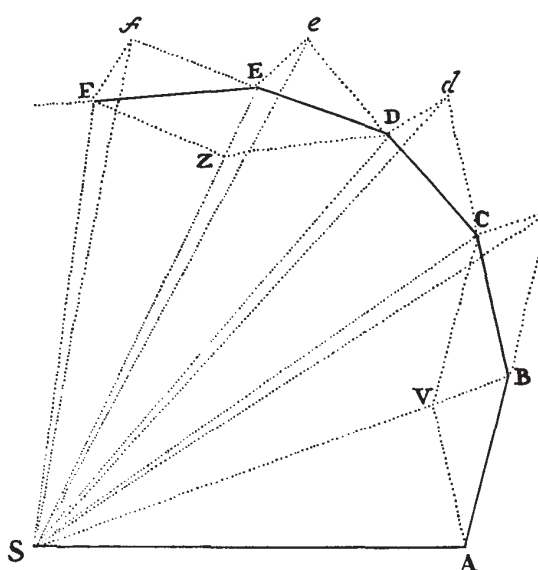


Figura 18 – Representação geométrica de Newton da proposição 1 do Livro I.

Fonte: MC, p.40.

A demonstração de Newton segue a partir dos axiomas da sua geometria mecânica (leis do movimento). Vale lembrar que se um corpo sofre a ação de uma força centrípeta com centro em S , então essa força será sempre direcionada para esse ponto. Além disso, se a força é *contínua* poderá ser considerada como uma força impulsiva proporcional ao tempo, ou seja, que se repete em iguais intervalos de tempo (uma vez que quando é tomada no limite para um intervalo de tempo muito pequeno, pode ser considerada contínua). Se um corpo parte de A com movimento uniforme, em linha reta, chegará em B , pela lei 1 em um determinado intervalo de tempo t . Se, ao chegar em B , sofrer a ação de uma força impulsiva BV , em direção a S , pela regra do paralelogramo (cor.1 das leis) terá a direção do seu movimento alterada de Bc para BC . Chegará em C no mesmo intervalo de tempo que percorreu AB e que percorreria Bc , caso não fosse submetida a essa força. É fácil perceber que em iguais

³²² MC, p.40.

intervalos de tempo o corpo sofreria novas forças em C, D, E, F, e assim por diante, resultando na configuração da figura apresentada à proposição 1.

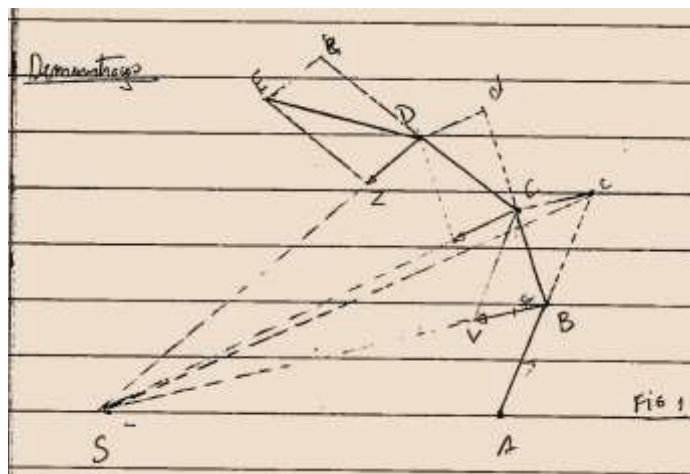


Figura 19 – Minha ilustração manual do procedimento de Newton na proposição 1 do Livro I.
Fonte: o autor

Para apresentar a demonstração do teorema vamos dividi-lo em duas partes. A primeira é a observância de algumas propriedades geométricas dos triângulos. A segunda é a transição das forças impulsivas para forças contínuas. Acerca da primeira parte devemos observar que os triângulos SAB e SBC tem a mesma área, pela “propriedade da mediana”. O segmento SB intercepta o ponto médio do segmento Ac , oposto ao triângulo SAC , dividindo-o em dois triângulos que tem áreas iguais.

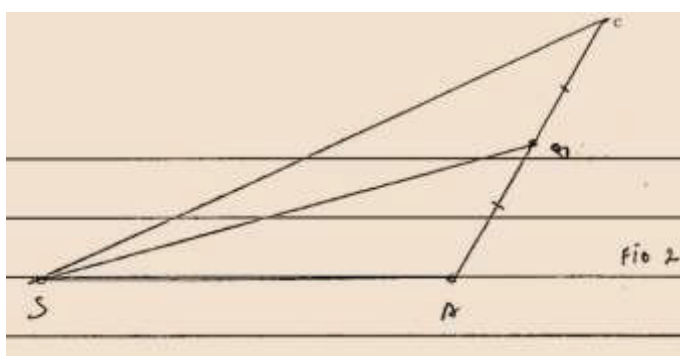


Figura 20 – Destaque dos primeiros dois triângulos da figura anterior. Pela “propriedade da mediana” a área dos dois triângulos recortados por SB são iguais. Fonte: o autor

Já os triângulos SBC e SBC também têm áreas iguais, pela proposição 38 de Euclides.³²³

³²³ *Elementos*, Livro I, prop. 38.

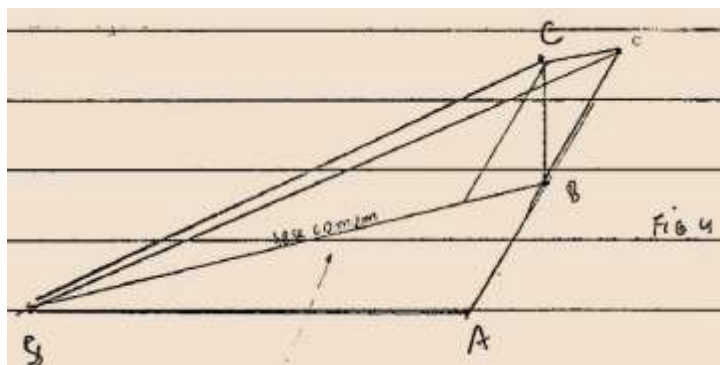


Figura 21 – Os triângulos SBC e SBC têm a mesma base e a mesma altura, portanto possuem áreas iguais.

Fonte: o autor

A proposição referida de Euclides ensina que triângulos que possuem a mesma base e altura tem sempre áreas iguais.

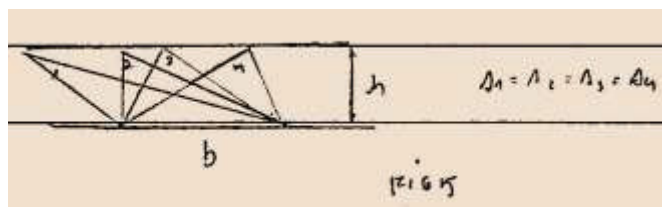


Figura 22 – Ilustração minha da proposição 38 de Euclides.

Fonte: o autor

Pelas mesmas propriedades é possível mostrar que todos os demais triângulos da figura da proposição 1 têm áreas iguais. Assim, das observações anteriores é possível concluir que, embora o corpo não percorra distâncias iguais em tempo iguais (ou seja, a sua velocidade muda em razão da aplicação da força), ele “varre” *áreas iguais* em tempos iguais.

$$\frac{A_1}{\Delta t_1} = \frac{A_2}{\Delta t_2}$$

Onde A_1 e A_2 são as duas primeiras áreas e Δt_1 e Δt_2 são os intervalos de tempo iguais em que o corpo percorre as duas primeiras áreas. É fácil perceber que

$$\frac{A_1 + A_2}{2\Delta t} = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3\Delta t} = \frac{A_t}{\Delta t_t}$$

Onde A_t e Δt_t correspondem à área total e o tempo total no percurso.

Todavia, até aqui foi considerado apenas “pulsos” de forças impulsivas em iguais intervalos de tempo e não uma força contínua. É nesse momento que entra a segunda parte da demonstração de Newton. Como já foi mencionado, para considerar uma força contínua será preciso tomar um intervalo de tempo muito pequeno entre os pulsos, de modo que os segmentos de reta da trajetória se tornem cada vez menores até, por fim, se transformarem numa curva. Ou ainda, nas palavras de Newton, se o número de triângulos aumentar e a largura diminuir infinitamente, “o seu último perímetro ADF será uma curva; e, portanto, a força centrípeta, pela qual o corpo é continuamente desviado da tangente dessa curva, agirá continuamente; e qualquer área descrita SADS, SAFS, que é proporcional aos tempos de descrição, também será nesse caso proporcional a esses tempos. Q.E.D”.³²⁴

Na transição das forças impulsivas para uma força contínua, as conclusões obtidas para os cinco triângulos formados pelos pontos de ação daquelas primeiras forças, continuará valendo para os infinitos triângulos da última. A área da figura *SADS* percorrida pelo corpo no tempo correspondente está para qualquer outra área percorrida no tempo igualmente correspondente.

$$\frac{A_{SADS}}{t_{SADS}} = \frac{A_{SAFS}}{t_{SAFS}}$$

Ou seja,

$$A \propto t \quad [11]$$

Conforme queríamos demonstrar.

Na sequência, Newton apresenta seis corolários à essa proposição, dos quais comentarei apenas quatro. O corolário 1 informa que a velocidade do corpo num dado ponto da trajetória é inversamente proporcional à distância do centro *S* até o prolongamento da tangente a esse ponto da trajetória.

³²⁴ MC, p.41.

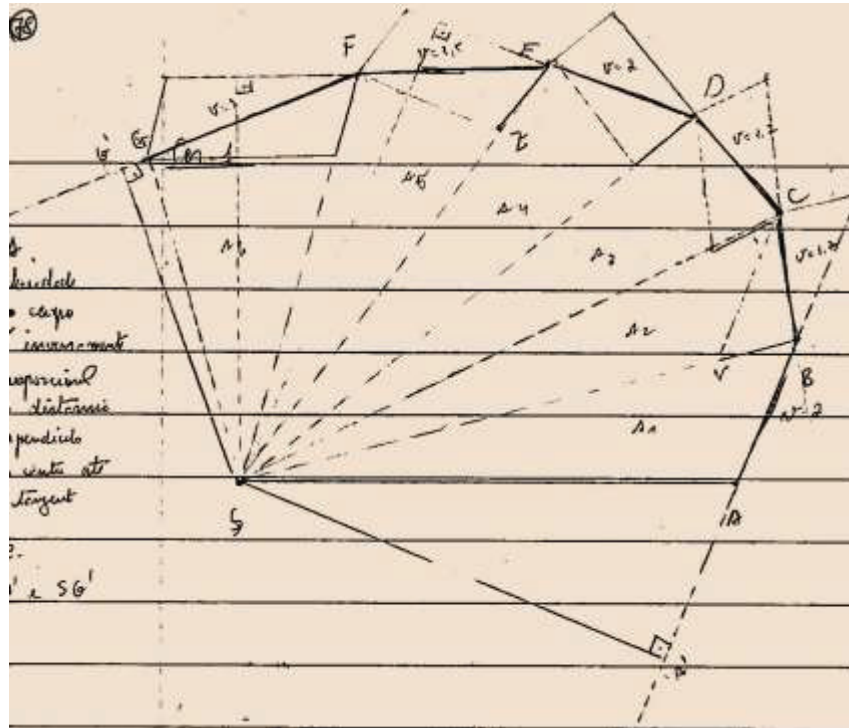


Figura 23 – Ilustração do corolário 1 da proposição 1 do Livro I. SA' e SG' são as distâncias perpendiculares até o prolongamento das tangentes nos pontos A e G. Fonte: o autor

Na figura acima, por exemplo, a velocidade do corpo no percurso AB será dado por:

$$v_{AB} \propto \frac{1}{SA'}$$

E no percurso FG:

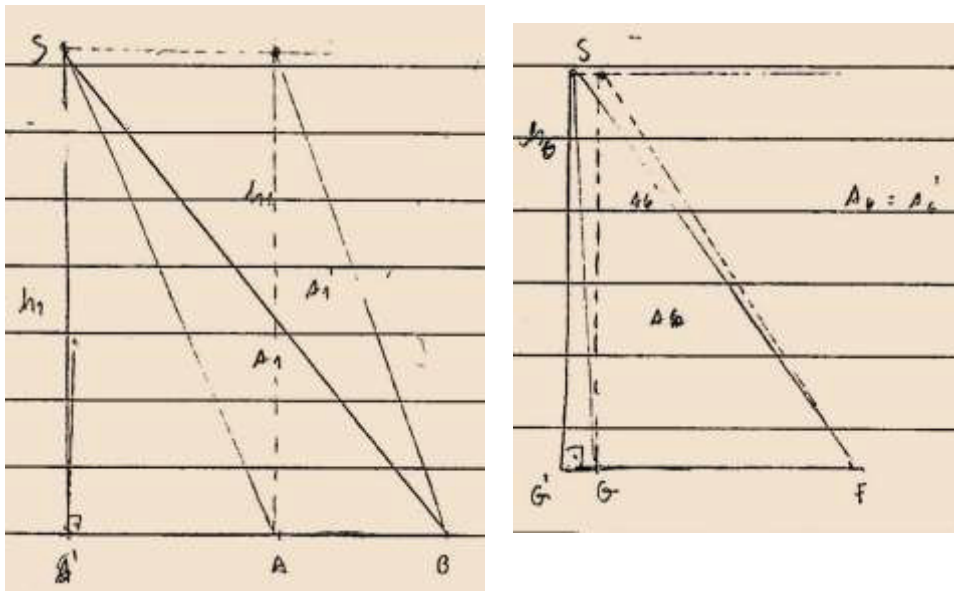
$$v_{FG} \propto \frac{1}{SG'}$$

De maneira abreviada, consideraremos que a velocidade em um ponto qualquer da trajetória é inversamente proporcional à distância perpendicular até a tangente à aquele ponto:

$$v \propto \frac{1}{S_p} \quad [12]$$

Onde S_p é a distância perpendicular do centro S até a reta tangente a um ponto qualquer da trajetória.

Para constatar essa propriedade considere os triângulos formados com o centro S e a reta $A'AB$, e S e a reta $G'GF$ extraídos da figura anterior.



Como $A'_1 = A'_6$, então

$$\frac{b_1 h_1}{2} = \frac{b_6 h_6}{2}$$

Onde b_1 e b_6 representam as bases AB e GF dos triângulos na figura. Donde se obtém,

$$\frac{b_1}{b_6} = \frac{h_6}{h_1}$$

As bases dos triângulos, que representam as velocidades do corpo, são inversamente proporcionais as alturas SA' e SG' , que são os prolongamentos da tangente referidos no corolário.

Os corolários 3 e 4 estão relacionados à força centrípeta. As diagonais BV , EZ , etc, são proporcionais à força centrípeta que atua no corpo e, portanto, essa força é também

proporcional ao “seno verso” (*sagitta*)³²⁵ do arco descrito, que corresponde exatamente a metade daquelas diagonais, conforme a figura abaixo:

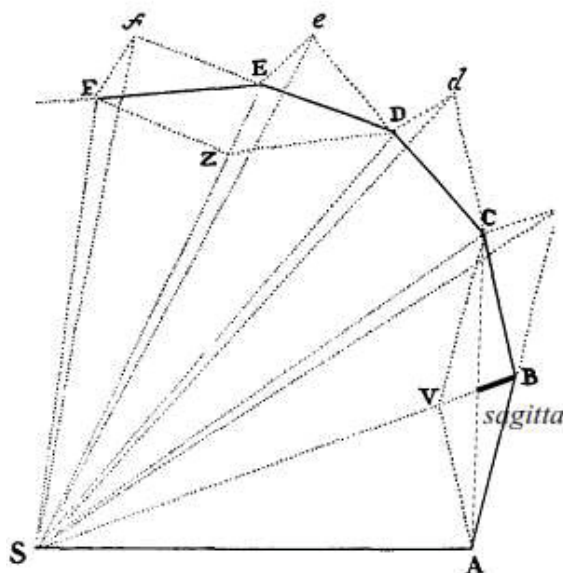


Figura 24 – Representação da *sagitta*, que é a distância delimitada pelo arco AC. A força centrípeta é proporcional à *sagitta*. Fonte: MC, p.40. Adaptado pelo autor.

Chamando a força centrípeta em B de F_B , a força centrípeta em E de F_E , e a *sagitta* de Sg , teremos:

$$\frac{F_B}{F_E} = \frac{BV}{EZ}$$

e

$$F_C \propto Sg \quad [13]$$

Onde F_C é a força centrípeta em qualquer ponto da trajetória. A vantagem em se considerar o *sagitta* em vez da diagonal BV , EZ , etc, é que essa diagonal se torna inviável de ser discernida quando temos uma curva, no entanto a *sagitta* do arco AC pode ser obtida mesmo no caso de uma curva.

O corolário 6 se limita a afirmar que todas as observações anteriores não se alteram caso o plano que contém o centro de força e o corpo estiver em movimento uniforme em linha reta. Essa é uma conclusão que ele obtém a partir do corolário 4 das leis do movimento (que

³²⁵ A *sagitta* é igual ao *seno verso* somente no caso particular do círculo. Há uma imprecisão na tradução do Cajori aqui. Veja Cohen, 1999, p.305.

foi omitido no capítulo 5). Mas, basicamente, esse corolário se propõe a afirmar o que na seção 4 do apêndice B foi chamado de “princípio da inércia ampliado de Huygens”. O centro de gravidade de um sistema de corpos não altera o seu estado de movimento ou repouso quaisquer que sejam as interações envolvidas (atrações ou impactos). Consequentemente, se o centro de força não estiver fixo, mas em movimento uniforme em linha reta, o centro de gravidade do sistema conservará o seu movimento independentemente da interação com o corpo, e assim todos os resultados referidos anteriormente não sofrerão alterações.

Estão estabelecidas, portanto, as características gerais do movimento de um corpo que se move sob a ação de uma força centrípeta. Ficou evidente que a velocidade do corpo não é constante, todavia há outras regularidades no movimento dignas de serem notadas. A principal delas é que o corpo descreve áreas iguais em tempos iguais, ou, em outros termos, tem velocidade areal constante. Dessa regularidade emergem outras propriedades que foram desenvolvidas nos corolários. Naturalmente, um movimento que descreve áreas iguais em tempos iguais é semelhante ao movimento planetário tal como descrito por Kepler. A hoje chamada *segunda lei de Kepler* afirma que os planetas descrevem, em relação um dos focos da elipse, áreas iguais em tempos iguais. A ação de uma força centrípeta produz uma propriedade muito parecida com aquelas observadas nos movimentos planetários, e certamente essa hipótese deveria ser levada a sério. Contudo, a pergunta que parecia inquietar Newton a essa altura é se uma força centrípeta era a única possibilidade de força que poderia produzir um movimento com velocidade areal constante. Caso não fosse, não haveria garantia de que uma força centrípeta poderia ser realmente a causa dos movimentos planetários. Esse é o problema por trás da proposição 2 do Livro I, que abordaremos a seguir.

7.2.2 O significado dinâmico da lei das áreas

A proposição 1 consistia em investigar as *características do movimento* de um corpo sob a ação de uma força centrípeta. A proposição 2 consiste em investigar as *características da força* de um corpo se movendo com velocidade areal constante. Newton sabia que esse era o caso mais afeito ao movimento planetário. Das observações astronômicas, sabemos que os planetas se movem com velocidade areal constante, mas não sabemos as características da força. Sequer sabemos se realmente a força é *centrípeta*. Para ter certeza de que os planetas realmente estão sob a ação de uma força centrípeta o problema da proposição 2 precisava ser enfrentado. Em resumo, essa proposição é mais breve que a primeira, e nela Newton concluiu

que, de fato, um corpo movendo-se numa trajetória curvilínea com velocidade areal constante em relação a um centro determinado está sob a ação de uma força centrípeta. Vejamos a formulação de Newton:

Proposição 2. Teorema 2.

Todo corpo que se move em qualquer curva descrita num plano, e por meio de raios traçados até um ponto imóvel ou movendo-se uniformemente com movimento retilíneo, descreve em torno desse ponto áreas proporcionais aos tempos, é impelido por uma força centrípeta direcionada para esse mesmo ponto.³²⁶

Para a demonstração da proposição se deve observar primeiramente que, pela *Lei 1*, um corpo sempre se move em linha reta. Se a trajetória é curva, então ele está sob a ação de uma força. Pela *Lei 2* se conclui que esta força deve ser oblíqua ao movimento. A respeito da direção específica dessa força, deve-se observar que o corpo descreve áreas proporcionais aos tempos. Isso significa que é possível construir um grande número de triângulos com vértice em *S* que possuem áreas iguais.

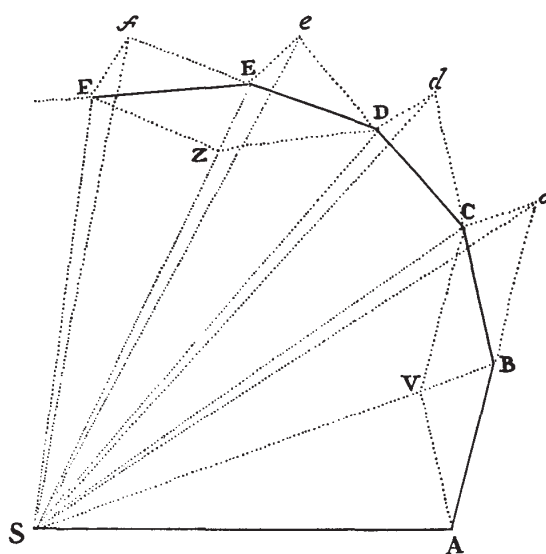


Figura 25 – A representação geométrica da proposição 2 é igual à proposição 1.

Fonte: *ibid*, p.43.

Pela *Lei 1* é possível saber a posição *c* que o corpo estaria caso não estivesse submetido a ação da força. Aplicando a regra do paralelogramo é possível determinar a direção da força *BV* atuando no corpo no instante de tempo que o corpo se encontra em *B*. Pela proposição 40 dos *Elementos* de Euclides é possível concluir que *Cc* é paralelo a *BS*, e assim *BV* está sobre a reta *BS*, portanto, na mesma direção do ponto *S*.

³²⁶ MC, p.42.

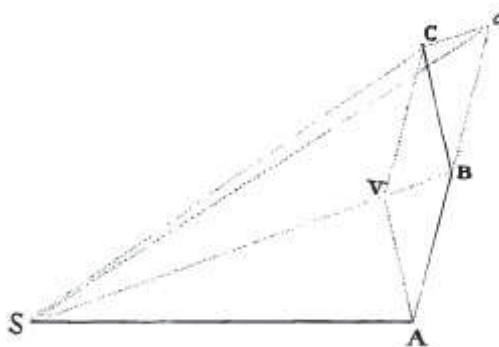


Figura 26 – Pela proposição 40 de Euclides BV está na direção do ponto S.
Fonte: ibid. Adaptado pelo autor.

O mesmo raciocínio pode ser aplicado para todos os demais triângulos da figura. Por conseguinte, a força oblíqua atuando num corpo que se move com velocidade areal constante em relação ao ponto imóvel S é, necessariamente, uma força centrípeta continuamente direcionada para S .

Newton apresenta ainda dois corolários e um escólio a essa proposição. Os corolários não têm uma importância que se requeira comentar sobre eles no momento, mas o escólio faz uma observação que merece destaque. Ele lembra que é verdade que o corpo se movendo com velocidade areal constante pode estar sob ação de mais de uma força. Tendo isso em vista, o que a proposição acima nos informa é que o resultado da composição de todas as forças atuando no corpo (ou seja, a *força resultante*), no mesmo plano, está direcionada continuamente para o centro S . E caso haja alguma força que atua em outro plano, pelos corolários das leis do movimento, essa força desviará o plano do movimento, porém não alterará os resultados anteriores. Em outros termos, analisando o movimento em um único plano, se o corpo se move com velocidade areal constante, então ele necessariamente estará sob a ação de uma força resultante direcionada para o ponto S ; e se houver qualquer componente de força fora do plano ela apenas produzirá um movimento do plano, sem alterar o que foi previamente estabelecido.

Das duas proposições iniciais dos *Principia*, apresentadas acima, é possível retirar uma conclusão que será importante na sequência do trabalho e merece ser colocada em destaque. Uma força centrípeta em direção a um centro imóvel, aplicada num corpo em movimento, implica em um movimento com velocidade areal constante (proposição 1). Um movimento curvilíneo com velocidade areal constante em relação a um centro imóvel implica na ação de uma força centrípeta em direção a esse centro (proposição 2). Essa bi-implicação pode ser resumida conforme abaixo:

$$F_C \leftrightarrow \text{Lei das áreas} \quad [14]$$

Onde F_C é a força centrípeta em direção a um centro imóvel. Essa expressão resume as conclusões das duas primeiras proposições do Livro I.

7.3 PROP. 4: FORÇA CENTRÍPETA NUMA TRAJETÓRIA CIRCULAR

Estabelecido o resultado de que um corpo se movendo numa trajetória curvilínea qualquer como velocidade areal constante está necessariamente sujeito a ação de uma força centrípeta, e vice-versa, Newton pode agora investigar precisamente qual é a lei da força centrípeta atuando num corpo movendo-se numa trajetória elíptica. Mas, evidentemente, esse não é um problema simples de se resolver. Por essa razão, antes de enfrentar o problema da elipse convém estudar alguns casos mais simples, e avançar para os mais complexos gradativamente. Basicamente foi isso o que Newton fez nas proposições que seguem. Uma vez que a extensão desse trabalho não permitiria discutir todos os casos em detalhes, será apresentado somente o caso da órbita circular como transição para o problema principal. Na proposição 4 Newton investiga as características da força centrípeta atuando num corpo em órbita circular. Embora já saibamos o resultado, agora veremos a solução geométrica oficial de Newton nos *Principia*. O Enunciado da proposição afirma:

Proposição 4. Teorema 4.

As forças centrípetas dos corpos que descrevem diferentes círculos com movimento uniforme tendem para os centros desses círculos, e estão uma para outra como o quadrado dos arcos descritos no mesmo tempo divididos pelos raios dos respectivos círculos.³²⁷

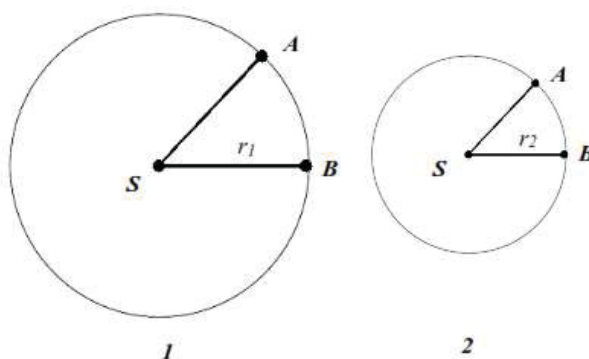


Figura 27 – Ilustração minha da proposição 4 do Livro I.
Fonte: o autor.

³²⁷ CW, p.449.

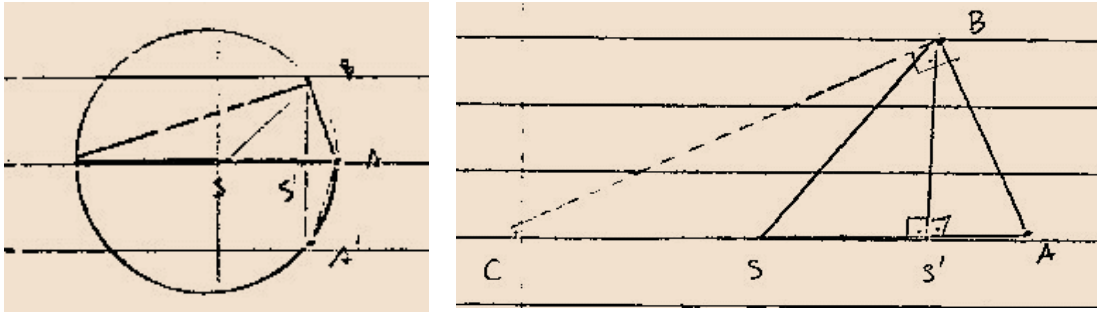


Figura 29 – Sagitta em associação com um triângulo retângulo inscrito numa circunferência.
Fonte: o autor

Dos triângulos semelhantes acima podemos retirar as seguintes relações:

$$\frac{AB}{CA} = \frac{S'A}{AB}$$

$$AB^2 = CA \times S'A$$

Onde CA é o diâmetro do círculo e $S'A$ é a *sagitta*. Então,

$$AB^2 = 2r \times Sg$$

Mas quando A se aproxima de B , ou, de outra forma, quando o arco $\widehat{AB}$ é muito pequeno e tende a zero, a corda AB coincide com o arco $\widehat{AB}$. Logo, teremos:

$$\widehat{AB}^2 = 2r \times Sg$$

$$Sg = \frac{1}{2} \frac{\widehat{AB}^2}{r}$$

$$Sg \propto \frac{\widehat{AB}^2}{r}.$$

Como a força centrípeta é proporcional à *sagitta*, então:

$$F_c \propto \frac{\widehat{AB}^2}{r} \quad [17]$$

Conforme queríamos demonstrar.

7.3.2 Possibilidades de leis de força para o movimento circular

O estudo desse problema do caso circular é interessante por várias razões. A primeira é porque desse estudo Newton extraiu uma maneira prática de determinar geometricamente a *sagitta* a partir de um arco dado e uma reta tangente a um dos pontos que define o arco (corolário 9). A segunda, é porque Newton demonstra o resultado de Huygens para o movimento circular em termos da força centrípeta (corolário 1). A terceira é porque Newton chega na lei do inverso do quadrado da distância para o caso de um corpo movendo-se numa órbita circular, resultado que Hooke supostamente já obtivera. E a quarta é porque ele amplia significativamente o escopo das supostas conclusões de Hooke sobre o caso do movimento circular, esclarecendo que o movimento circular admite inúmeras leis de força possíveis.

Comecemos com o corolário 1. Quando o arco $\widehat{AB}$ se aproxima de zero, a velocidade do corpo tende a ficar constante. Logo, $\widehat{AB} = vt$, e a força centrípeta em [17] ficará:

$$F_C \propto \frac{v^2 t^2}{r}$$

Assim, para o mesmo intervalo de tempo nos círculos 1 e 2, teremos:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{v_1^2 t^2 / r_1}{v_2^2 t^2 / r_2}$$

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{v_1^2 / r_1}{v_2^2 / r_2}$$

ou

$$F_C \propto \frac{v^2}{r} \quad [18]$$

Que é o resultado de Huygens para o movimento circular em termos da força *centrípeta*.

No corolário 2 é demonstrado que se na proporção [17] $\widehat{AB} = vt$, e a velocidade de um corpo em movimento circular uniforme pode ser dada por $v = 2\pi r/T$, onde T é o período de revolução do corpo, então a força centrípeta também pode ser expressa como:

$$F_c \propto \frac{r}{T^2} \quad [19]$$

Nos corolários 3 a 6 Newton testa algumas possibilidades de relações entre os períodos de revolução (T), raios das órbitas (r) e velocidade de corpos (v), para a situação em que vários corpos que descrevem órbitas circulares diferentes com o mesmo centro de força. No corolário 3, ele demonstra que caso os tempos periódicos sejam iguais ($T_1 = T_2 = T_3$, etc) os corpos estarão necessariamente sujeitos a uma força centrípeta proporcional ao raio ($F_c \propto r$). No corolário 4 ele demonstra que caso os tempos periódicos sejam proporcionais à raiz quadrada do raio ($T \propto r^{1/2}$), teremos uma força centrípeta constante agindo nos corpos ($F_1 = F_2 = F_3$, etc). No corolário 5 ele demonstra que caso os tempos periódicos sejam proporcionais ao raio ($T \propto r$), a força centrípeta será inversamente proporcional ao raio ($F_c \propto 1/r$). No corolário 6 ele demonstra que caso os tempos periódicos sejam proporcionais ao raio elevado à razão sesquialtera ($T \propto r^{3/2}$), a força centrípeta será proporcional ao inverso do quadrado da distância ($F_c \propto 1/r^2$). Como já sabemos esse último caso supõe um movimento que obedece a regra dos períodos de Kepler para os movimentos planetários³²⁹. Vale a pena oferecer os detalhes desse corolário.

Suponha que os diferentes corpos em órbita circular em torno de um centro de força comum obedeçam a imposição de que os seus tempos periódicos sejam proporcionais ao raio elevado à razão sesquialtera:

$$T \propto r^{3/2}$$

No caso círculos 1 e 2 da fig. 28, essa relação poderia ser escrita como:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{r_1^3}{r_2^3} \quad [20]$$

³²⁹ Hoje em dia conhecida como “terceira lei de Kepler”.

Como a velocidade dos corpos durante uma volta completa na órbita circular pode ser dada por

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad [21]$$

Então, combinando [20] e [21]:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{r_2^{1/2}}{r_1^{1/2}} \quad [22]$$

Ora, uma vez que da proporção [18] sabemos que a força centrípeta é proporcional ao quadrado da velocidade dividido pelo raio, combinando [22] e [18], teremos:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

ou

$$F_c \propto \frac{1}{r^2} \quad [23]$$

Esse resultado informa que, se o movimento de um corpo numa órbita circular odebece a lei dos períodos de Kepler, então a força centrípeta atuando no corpo é inversamente proporcional ao quadrado da distância do corpo até o centro do círculo. O resultado que supostamente Hooke já conseguira obter.

O corolário 7 prossegue na análise das possíveis leis de força para um corpo em movimento circular com centro de força coincidindo com o centro do círculo. Nesse corolário Newton conclui que, em geral, se vários corpos descrevendo uma trajetória circular com centro comum obedecerem a $T \propto r^n$, então eles estão submetidos a uma lei de força centrípeta dada por :

$$F_c \propto \frac{1}{r^{2n-1}} \quad [24]$$

Esse resultado esclarece que num caso um corpo se mova numa trajetória circular com centro de força coincidindo com o centro do círculo, inúmeras leis de força são possíveis. Em outras palavras, há um grande número de leis de força possíveis que podem igualmente manter um corpo numa trajetória circular. No entanto, a informação da relação de proporcionalidade entre os tempos periódicos e o raio das órbitas é suficiente para a determinação da lei de força que opera em cada caso.

O corolário 8 é da máxima importância nos *Principia*. Ele generaliza os resultados dos corolários 3 a 7 para outras órbitas não-circulares com centro de força em comum. No entanto é evidente que Newton não tem como prová-lo aqui, que é uma proposição específica para o movimento circular. Com efeito, ele apresenta esse corolário enigmaticamente nesse ponto, sem dar qualquer justificativa. Essa justificativa apenas aparece na seção 3 do Livro I. Por essa razão, esse corolário não será discutido agora. Voltarei a ele num momento mais oportuno, na seção 7.7.

7.3.3 Sagitta e Subtensa

O último corolário da proposição 4 (corolário 9) tem uma importância destacada para os próximos desenvolvimentos rumo à solução do problema de Hooke. Ele permite compreender uma propriedade bastante útil para a determinação da *sagitta* de um corpo se movendo em uma órbita curva qualquer, apenas a partir do conhecimento prévio do centro de força, da curva, e da posição do corpo na curva, que define uma reta tangente à trajetória.

Na figura 29 havíamos visto que do triângulo inscrito na circunferência poderíamos retirar a relação $\widehat{AB}^2 = CA \times S'A$, quando o arco $\widehat{AB}$ é muito pequeno. Mas, uma vez que CA é o diâmetro do círculo, e $S'A$, a *sagitta*, é possível perceber que esta última compreende precisamente o movimento independente do corpo em direção ao centro do círculo, ou, o movimento acelerado em direção ao centro que o corpo descreveria caso não possuísse um movimento inicial em linha reta.

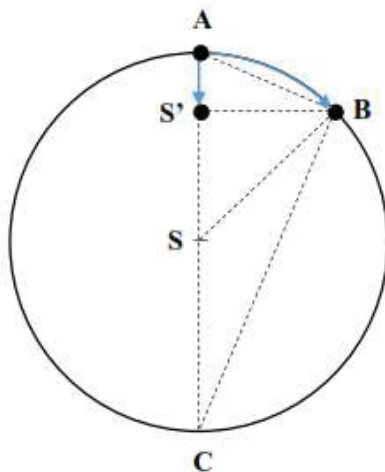


Figura 30 – Ilustração minha do corolário 9 da prop. 4 do Livro I.
Fonte: o autor

Dessa constatação é possível concluir que o quadrado do arco $\widehat{AB}$ (muito pequeno) é sempre igual ao produto do diâmetro do círculo pela distância que o corpo descreveria, no mesmo tempo, caso estivesse “caindo” em direção ao centro sob ação da mesma força. Nas palavras de Newton, “o arco que um corpo revolvendo uniformemente num círculo com uma dada força centrípeta descreve em qualquer tempo é a média proporcional entre o diâmetro do círculo e a distância por meio da qual o corpo cairia sob a ação da mesma força no mesmo tempo”. Esse corolário pode convenientemente ser representado como abaixo:

$$\widehat{AB}^2 = \text{diâmetro} \times S_{\text{queda}} \quad [25]$$

Esse resultado terá uma grande importância no famoso experimento imaginário da “queda da lua”, no Livro III, que será abordado na parte 3 dessa tese. Mas, no momento, o que importa considerar é que esse S_{queda} , que é igual a *sagitta* ($S'A$), é também igual à subtensa da tangente num dos pontos do arco considerado. Para unificar a nossa notação com aquela que Newton usou nas próximas proposições, chamemos, agora, os pontos que definem o arco de P e Q . A subtensa pode ser visualizada na figura abaixo:

determinação prática da *sagitta*, e consequentemente da força centrípeta, será fundamental para enfrentar os problemas mais complexos que Newton abordará, e em especial na formulação de uma forma geral de determinar a força centrípeta para qualquer trajetória considerada, o que ele desenvolveu na proposição 6.

7.4 PROP. 6: FORÇA CENTRÍPETA NUMA TRAJETÓRIA QUALQUER

Na proposição 6 Newton se propôs a investigar as características da força centrípeta numa trajetória qualquer. Nas proposições 1 e 2 ele concluiu que um movimento curvilíneo com velocidade areal constante implica necessariamente na ação de uma força centrípeta. Concluiu também que a força centrípeta é proporcional à *sagitta* de um arco qualquer. Na proposição 4 Newton estudou um caso particular, investigando as características da força centrípeta de um corpo movendo-se numa trajetória circular. Deduziu a propriedade que a subtensa da tangente do ponto de um arco considerado é igual a *sagitta* desse arco. Além disso, esclareceu que, para um intervalo de tempo muito pequeno, a subtensa é proporcional ao quadrado do arco, e que a *sagitta* (ou a subtensa) pode ser entendida como a distância percorrida pelo corpo em direção ao centro de força, no mesmo tempo em que percorreria o referido arco, sob a ação da mesma força. Na proposição 6, Newton declara que a força centrípeta, num intervalo de tempo muito pequeno, será sempre proporcional à *sagitta* e inversamente proporcional ao quadrado dos tempos. Vejamos o enunciado nas palavras de Newton:

Proposição 6. Teorema 5.

Se um corpo revolve em qualquer órbita em torno de um centro imóvel num espaço não resistente, e descreve qualquer arco nascente num intervalo minimamente pequeno de tempo, e se a *sagitta* do arco é entendida como o segmento traçado de modo a bissectar a corda e, quando produzido, passar pelo centro de forças, a força centrípeta no meio do arco estará para *sagitta* diretamente e para o tempo inversamente ao quadrado.³³⁰

O enunciado de Newton pode ser representado como abaixo:

$$F_c \propto \frac{Sg}{t^2} \quad [26]$$

Onde *Sg* é a *sagitta* e *t* é o tempo.

³³⁰ CW, p.453-454.

A demonstração do teorema se segue do que já foi apresentado anteriormente. Pelo corolário 4 da proposição 1 sabemos que a força centrípeta é proporcional a *sagitta*. Mas a força centrípeta, para um intervalo de tempo muito pequeno, pode ser considerada constante, e portanto, proporcional a S/t^2 , conforme vimos no problema 4 da seção 6.2. Assim, a força centrípeta, num intervalo de tempo muito pequeno, poderá ser representada por:

$$F_c \propto \frac{SSg}{t^2} \quad [27]$$

ou simplesmente

$$F_c \propto \frac{Sg}{t^2} \quad [28]$$

Conforme queríamos demonstrar.

Uma outra maneira de demonstrar o teorema é pelo corolário 9 da proposição 4 (que também é equivalente ao “lema 11”). Se a subtensa (Sb) é proporcional ao quadrado do arco QP , quando este é muito pequeno, e se, nessa mesma situação, $\widehat{QP}$ pode ser representado por vt , então, $Sb \propto v^2 t^2$, onde v é constante. Logo,

$$Sb \propto t^2$$

e

$$Sg \propto t^2.$$

Como sabemos da proporção [13] que a *sagitta* (Sg) também é proporcional à força centrípeta, então:

$$Sg \propto F t^2$$

E obtemos

$$F_c \propto \frac{Sg}{t^2} \quad [29]$$

Conforme queríamos demonstrar.

Com base nesse resultado se pode retirar uma formulação geral para determinar a força centrípeta numa trajetória qualquer a partir de alguns segmentos conhecidos na figura. Ele

apresenta essa solução geral no corolário 1 à essa proposição. Aqui nós vamos apresentá-lo em forma de “problema”, para que se torne mais didático o procedimento de Newton: *dada a posição P de um corpo numa trajetória curvilínea qualquer sob a ação de uma força centrípeta direcionada para um ponto S qualquer fixo, determinar a lei da força de centrípeta para esse centro em função dos segmentos conhecidos.*

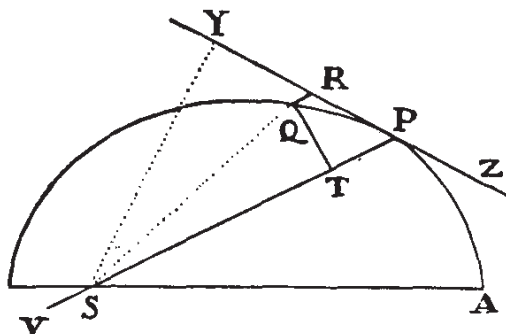


Figura 33 – Representação geométrica de Newton na prop.6 do Livro I.
Fonte: MC, p.48.

Primeiramente se traça a reta SP do centro até o corpo na trajetória. Em seguida, a reta $YRPZ$ tangente ao ponto P . Define-se um ponto auxiliar Q , próximo a P , gerando um arco $\widehat{PQ}$. A *subtensa* pode ser encontrada traçando-se QR paralelo a SP . A *sagitta*, consequentemente, da proporção [29], já foi encontrada, e é determinada pelo segmento QR . Resta encontrar o *tempo* em termos dos segmentos da figura. Da proposição 1 sabemos que um corpo sob ação de uma força centrípeta necessariamente descreve áreas proporcionais aos tempos. Logo, o tempo pode ser representado pela área do triângulo curvilíneo APQ . Quando P se aproxima de Q , ou melhor, quando o arco $\widehat{PQ}$ é muito pequeno, a corda $\overline{PQ}$ coincide com o arco $\widehat{PQ}$ e a área do triângulo pode ser determinada com o auxílio da altura QT traçada na figura. A área do triângulo será:

$$\text{área} = \frac{SP \times QT}{2}$$

ou

$$\text{área} \propto SP \times QT$$

A área será proporcional ao retângulo $SP \times QT$, que, por sua vez também é proporcional ao tempo (t). Substituindo a *sagitta* por QR e o tempo por $SP \times QT$ na relação [29], obteremos:

$$F_c \propto \frac{QR}{SP^2 \times QT^2} \quad [30]$$

ou, como Newton prefere, a força centrípeta é inversamente proporcional ao sólido

$$\frac{SP^2 \times QT^2}{QR}.$$

Em termos de segmentos que podem ser conhecidos, a lei da força centrípeta atuando num corpo se movendo numa trajetória curvilínea pode ser determinada pela relação [30] acima.

Com base nessa solução geral, não somente a força centrípeta numa trajetória elíptica pode ser determinada, mas em qualquer outra trajetória regular. Antes de resolver o problema de Hooke nos *Principia*, Newton mostrou a generalidade da sua solução, aplicando-a para determinar a força centrípeta em vários outros casos particulares que não abordaremos aqui, mas que vale a pena ao menos citar. São os problemas de 2 a 5 do Livro I. No *problema 2* ele aplicou a solução geral para a determinação da lei da força centrípeta atuando num corpo movendo-se numa trajetória circular, sendo essa força direcionada para qualquer ponto fixo dado (não necessariamente o centro do círculo). Nos problemas 3 e 4 ele aplicou a solução geral para determinar a lei da força centrípeta atuando, respectivamente, num corpo movendo-se numa trajetória definida por um semicírculo com o centro de força numa distância muito grande, e num corpo movendo-se por uma espiral equiangular³³¹. E no problema 5 ele aplicou a solução geral na determinação da lei da força centrípeta atuando num corpo movendo-se numa trajetória elíptica, mas com o centro de força coincidindo com o centro da elipse. Somente como ilustração, no ANEXO B está o meu desenho para a solução do problema 5.

O problema 6 é precisamente o problema de Hooke, que solicita a determinação da lei da força centrípeta numa trajetória elíptica direcionada para um dos focos da elipse. Antes de apresentar a solução de Newton ao problema será necessário informar o leitor não especializado acerca de algumas propriedades geométricas básicas das elipses que serão utilizadas na solução do problema.

7.5 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DAS ELIPSES

Nessa seção abro um parêntese para apresentar algumas definições e propriedades geométricas básicas das elipses que julgo necessárias para acompanhar a solução de Newton

³³¹ Os dois problemas são exemplificados na seção 6.2.

para o problema Hooke. As propriedades serão apenas enunciadas, sem qualquer demonstração. Os leitores interessados nas demonstrações poderão consultar posteriormente Besant (1895), ou outra obra específica relacionada com o tema.

Numa elipse, alguns pontos e segmentos recebem uma definição específica em virtude da importância que possuem para as propriedades dessa seção cônica. Na figura a seguir, os pontos A e A' são chamados de *vértices* (ou *apsides*) da elipse, C é o *centro*, e S e S' são os *focos* da elipse. Os segmentos AA' e BB' são, respectivamente, o eixo principal e secundário; RR' e XX' representam o *latus rectum*; AC e BC são os semi-eixos, e SR é o semilatus-rectum.

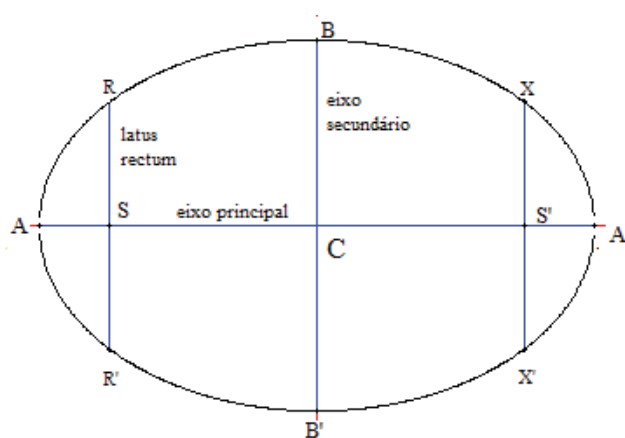


Figura 34 – Principais segmentos de uma Elipse.
Fonte: o autor

A partir dessas definições básicas é possível encaminhar a primeira das oito propriedades das elipses que serão aqui apresentadas. As propriedades serão apresentadas em forma numerada para tornar mais fácil a referência posterior.

Propriedade 1: O semilatus-rectum (SR) é a terceira proporcional entre os dois semi-eixos principais AC e BC.

$$\frac{SR}{BC} = \frac{BC}{AC}$$

ou

$$SR = \frac{BC^2}{AC}$$

Para apresentar a *propriedade 2* é preciso definir as *distâncias focais*. Dado um ponto qualquer na elipse, os segmentos que ligam esse ponto aos focos são chamados de *distâncias focais*.

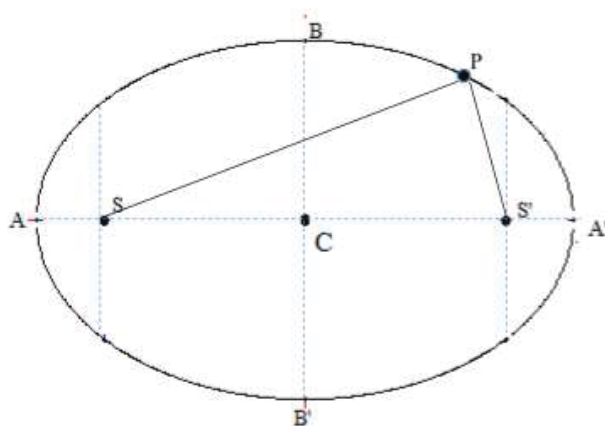


Figura 35 – Distâncias focais de uma elipse.
Fonte: o autor

Na figura, os segmentos SP e $S'P$ são chamados *distâncias focais*.

Propriedade 2: para qualquer ponto P numa elipse, a soma das distâncias focais é sempre constante e igual a diâmetro principal.

$$SP + S'P = AA' = 2AC$$

Propriedade 3: para qualquer ponto P numa elipse, a reta tangente nesse ponto forma ângulos iguais com as distâncias focais.

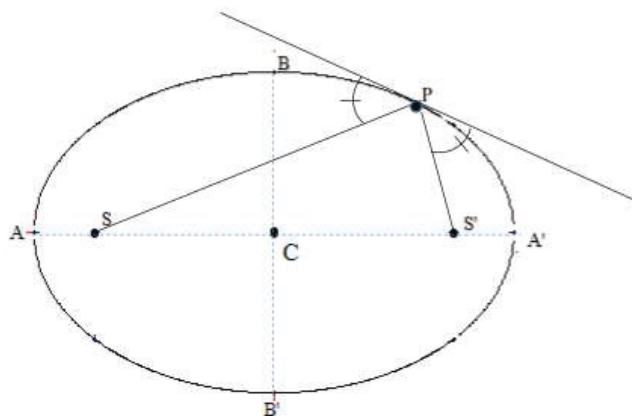


Figura 36 – Tangente e distâncias focais em um ponto da elipse.
Fonte: o autor

Propriedade 4: a reta normal à tangente num ponto P bissecta o ângulo entre as cordas focais nesse ponto, e também define o círculo auxiliar SPS' .

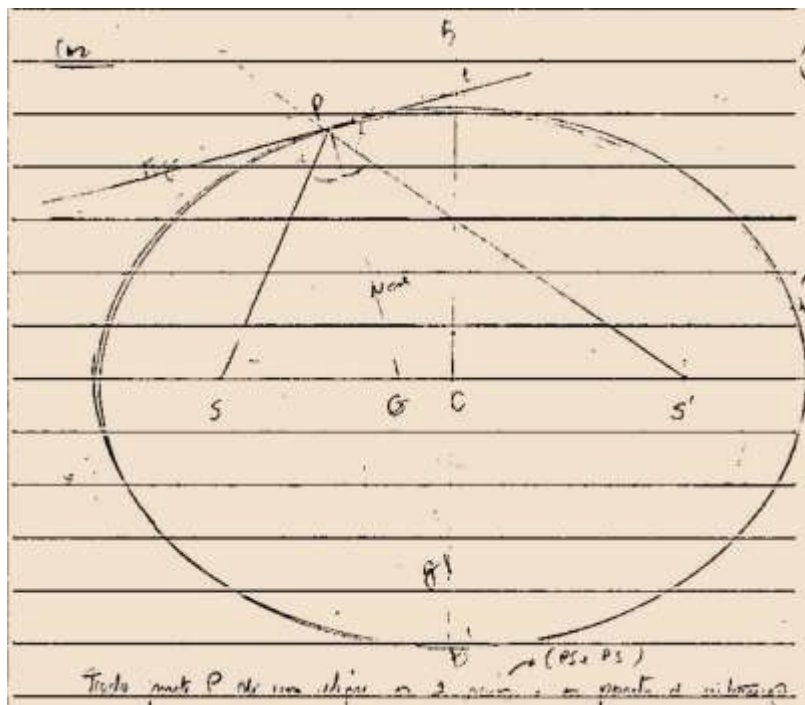


Figura 37 – Reta normal à tangente numa elipse

A propriedade 4 pode ser usada com sucesso para traçar a tangente em um ponto qualquer da elipse.

As propriedades seguintes dependem da definição de *diâmetro* de uma elipse. O *diâmetro* é definido como qualquer segmento que passa pelo centro da elipse.

Propriedade 5: as tangentes nos pontos opostos definidos por um diâmetro são paralelas.

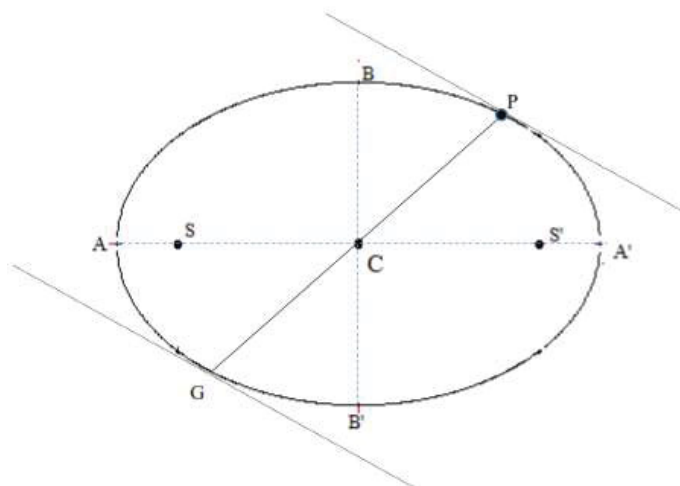


Figura 38 – Tangentes em pontos opostos numa elipse.
Fonte: o autor

Sendo PCG um diâmetro da elipse, as tangentes aos pontos P e G são paralelas.

Define-se *diâmetro conjugado* um diâmetro que é paralelo às tangentes definidas por outro diâmetro. Sendo o diâmetro DCG paralelo às tangentes definidas pelo diâmetro PCG , diz-se que o primeiro é um *diâmetro conjugado* desse último, e vice-versa.

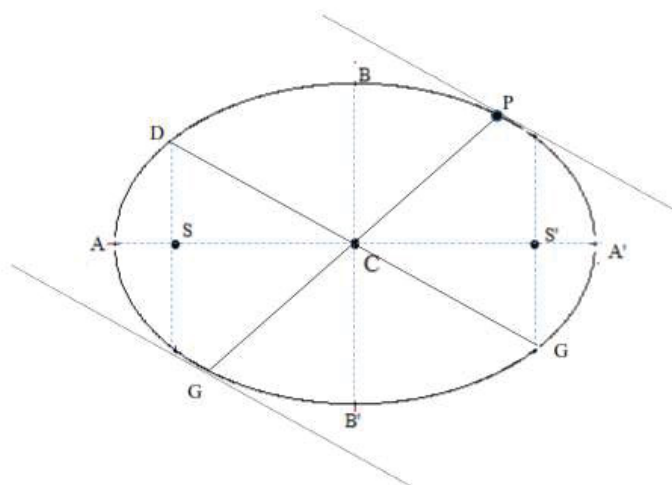


Figura 39 – Diâmetros conjugados numa elipse.
Fonte: o autor

Os diâmetros PCG e DCG são ditos *diâmetros conjugados*.

*Propriedade 6: os paralelogramos circunscritos definidos por quaisquer pares de diâmetros conjugados têm áreas iguais.*³³²

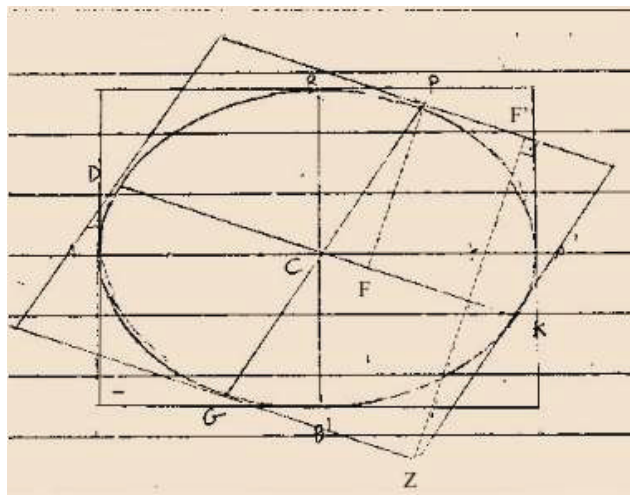


Figura 40 – Paralelogramos circunscritos numa elipse.

Fonte: o autor

Uma vez que a área do losango pode ser dada pelo produto da sua base e altura, teremos:

$$AA' \cdot BB' = DK \cdot ZF'$$

ou

$$AC \cdot BC = CD \cdot PF$$

para qualquer dos quadriláteros menores que compõem a figura.

Um último segmento que convém ser definido é a *ordenada*. Uma *ordenada* é um segmento que liga um ponto qualquer na elipse com os eixos ou diâmetros, numa direção paralela aos seus conjugados. Na figura abaixo Qv e QV são ditas ordenadas dos eixos AA' e BB' , respectivamente.

³³² Essa propriedade foi inserida nos *Principia* como Lema 12.

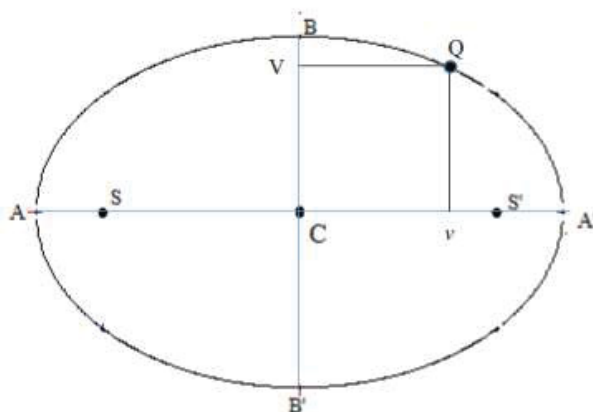


Figura 41 – Ordenada dos eixos de uma elipse.
Fonte: o autor

O segmento QV (paralelo ao eixo principal AA') é a ordenada do eixo secundário BB' . O segmento Qv (paralelo ao eixo secundário BB') é a ordenada do eixo principal AA' .

Propriedade 7: o quadrado da ordenada do eixo principal em um ponto Q qualquer de um elipse está para $Av \cdot A'v$ assim como o quadrado do semi-eixo menor está para o quadrado do semi-eixo maior.

$$\frac{Qv^2}{Av \cdot A'v} = \frac{BC^2}{AC^2}$$

E de semelhante maneira para a ordenada do eixo secundário (QV):

$$\frac{QV^2}{BV \cdot B'V} = \frac{AC^2}{BC^2}$$

É possível demonstrar que o mesmo vale para dois diâmetros conjugados quaisquer. Se os segmentos Qv e QV forem paralelos aos diâmetros conjugados DCK e PCG respectivamente, eles serão as *ordenadas* desses diâmetros conjugados.

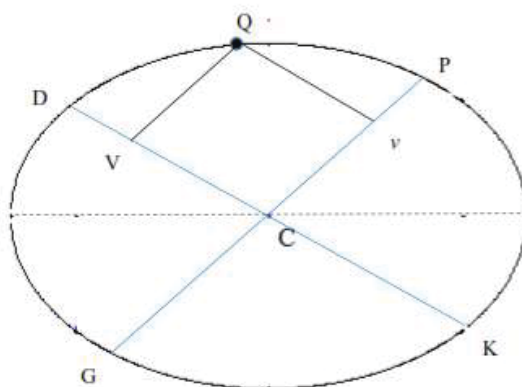


Figura 42 – Ordenadas dos diâmetros conjugados de uma elipse.
Fonte: o autor

Então, a propriedade 8 será:

Propriedade 8: o quadrado da ordenada do diâmetro PCG em um ponto Q qualquer de um elipse está para $Gv \cdot Pv$ assim como o quadrado do semidiâmetro conjugado está para o quadrado daquele semidiâmetro.

$$\frac{Qv^2}{Gv \cdot Pv} = \frac{CD^2}{PC^2}$$

E, semelhantemente,

$$\frac{QV^2}{DV \cdot KV} = \frac{PC^2}{CD^2}$$

Estas oito propriedades serão suficientes para acompanhar a solução de Newton para o problema da determinação da força centrípeta atuando num corpo movendo-se numa trajetória elíptica, ou seja, para o problema de Hooke.

7.6 PROP. 11: FORÇA CENTRÍPETA PARA TRAJETÓRIAS ELÍPTICAS

A terceira seção dos *Principia* – *O movimento dos corpos em seções cônicas excêntricas* – abre com a proposição 11 que, como já sabemos, trata do problema de Hooke. Eis o enunciado do problema pelo próprio Newton:

Proposição 11. Problema 6.

Considere que um corpo revolva numa elipse; é requerido que se encontre a lei da força centrípeta tendendo para o foco da elipse.³³³

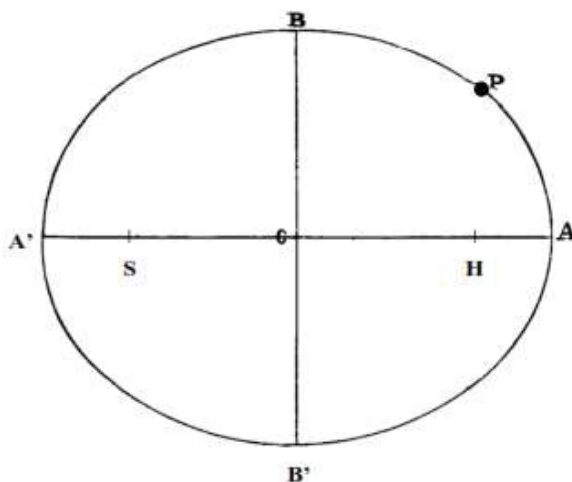


Figura 43 – Corpo P se movendo numa trajetória elíptica. S e H são os focos da elipse, enquanto C é o centro. AA' e BB' são os eixos principal e secundário. Fonte: o autor

Em primeiro lugar, é preciso fazer a construção geométrica, conforme foi ensinado nas proposições 4 e 6.

- (1) Trace o segmento SP , que liga o ponto P até o centro de força S , que, no caso, coincide com o foco da elipse.
- (2) Desenhe o ponto auxiliar Q , próximo de P , definindo o arco PQ .
- (3) Com o auxílio da propriedade 4 das elipses (seção 7.5), trace a reta tangente ao ponto P .
- (4) Conforme ensinado na proposição 4 e 6, determine a subtensa QR , igual a *sagitta* Px .
- (5) Trace QT , perpendicular a SP , que define a área varrida proporcionais aos tempos (conforme mostrado na proposição 6).

³³³ MC, p.56.

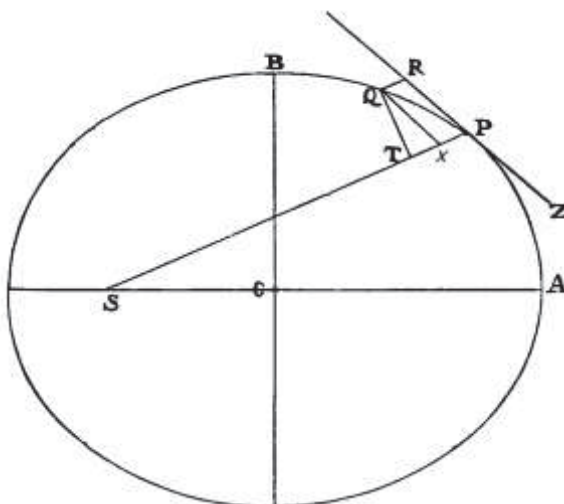


Figura 44 – Construção geométrica ensinada nas prop. 4 e 6 dos *Principia*.
Fonte: o autor

Da solução geral da proposição 6 sabemos que a força centrípeta é dada pela proporção [30]:

$$F_c \propto \frac{QR}{SP^2 \times QT^2}$$

O objetivo do problema (que está apenas implícito no enunciado) é encontrar a lei da força centrípeta “em função” de apenas um dos segmentos da figura, a saber, SP , que é o “raio” da elipse, ou melhor dizendo, a distância até o foco.³³⁴ Conforme vimos anteriormente, a suposição de Hooke era que a força centrípeta numa trajetória elíptica era inversamente proporcional ao quadrado da distância até o foco da elipse. Para encontrar a força centrípeta em função somente de SP precisaremos substituir os segmentos QR e QT por outros equivalentes que sejam conhecidos e constantes ao longo do movimento do corpo na elipse. Esses segmentos constantes e conhecidos são, basicamente, os semi-eixos AC e BC . Então, na manipulação que se segue o objetivo é determinar QT e QR em termos de AC e BC ou, diretamente, QR/QT^2 , em termos de AC e BC .

Para relacionar os segmentos definidos por P com os semi-eixos AC e BC será conveniente traçar o diâmetro PCG e o seu conjugado DCK , conforme a figura abaixo:

³³⁴ Naturalmente, na época de Newton ainda não estava formalizado o conceito matemático de “função”. No entanto, o princípio de se formular uma expressão matemática em termos de certas variáveis já utilizado.

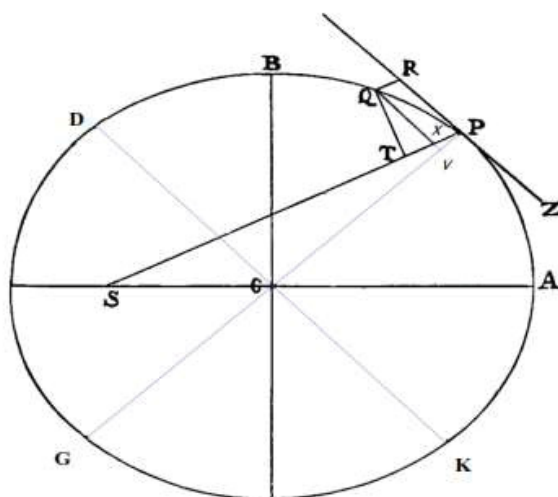
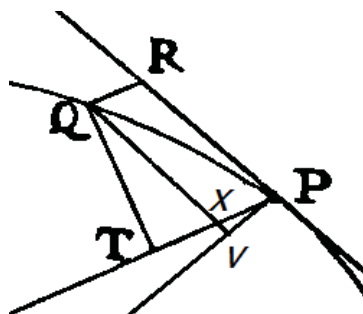


Figura 45 – DCK e PCG são os diâmetros conjugados da elipse.
Fonte: o autor

Os diâmetros conjugados definem, ainda, a ordenada Qv :



Por fim, também será conveniente traçar a outra distância focal PH .

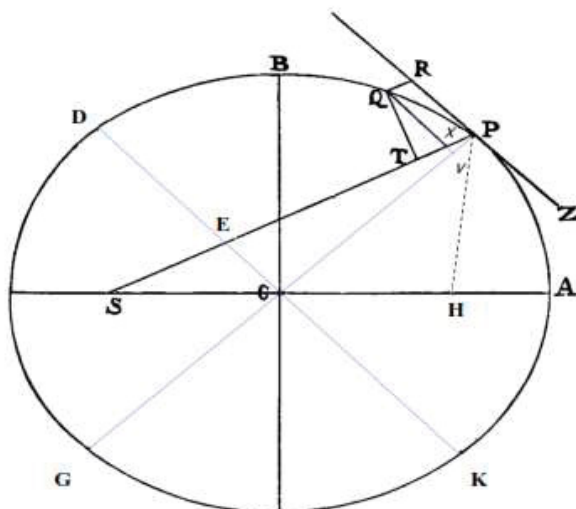


Figura 46 – PS e PH são as cordas focais da elipse.
Fonte: o autor

Agora, as manipulações geométricas. Para determinar QR é preciso observar, primero, que $QR = Px$. E como os triângulos EPC e Pvx são semelhantes, teremos:

$$\frac{Px}{Pv} = \frac{EP}{CP}$$

e

$$\frac{QR}{Pv} = \frac{EP}{CP}$$

Então,

$$QR = Pv \frac{EP}{CP} \quad [31]$$

Entretanto, é possível mostrar que $EP = AC$.

Se traçamos a reta HI , paralela ao diâmetro DCK , então será definido o segmento SE , igual a EI , porque SC também é igual a HC (pelo teorema de tales).

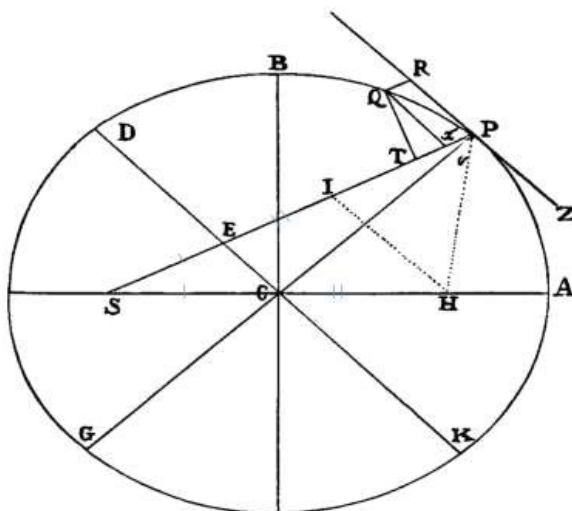


Figura 47 – Figura de Newton na prop. 11 dos *Principia*.

Fonte: *Principia*

Portanto, os pontos colineares $SEIP$ dividem a reta SP em três partes, sendo duas dessas partes iguais.

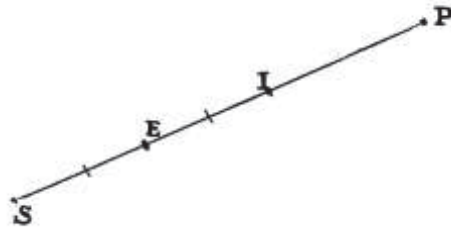


Figura 48 – Segmento SEIP retirado da figura anterior

Dado um segmento dividido em três partes, sendo duas dessas iguais, vale a relação:

$$\frac{SP + IP}{2} = EP$$

Mas $IP = HI$ (pela propriedade 3 das elipses), logo

$$\frac{SP + HI}{2} = EP$$

E pela propriedade 2 da elipses, temos que $SP + HI = 2 AC$. Então, a relação anterior ficará:

$$\frac{2AC}{2} = EP$$

e

$$AC = EP \quad [32]$$

Combinando [31] e [32], teremos:

$$QR = Pv \frac{AC}{CP} \quad [33]$$

Com a propriedade 8 das elipses é possível determinar Pv :

$$\frac{Qv^2}{Gv \cdot Pv} = \frac{CD^2}{PC^2}$$

donde

$$Pv = \frac{PC^2}{CD^2} \frac{Qv^2}{Gv} \quad [34]$$

Combinando [33] e [34], obtém-se:

$$QR = \frac{PC \cdot Qv^2 \cdot AC}{CD^2 \cdot Gv}$$

Conforme a proposição 6, estamos trabalhando com um arco PQ muito pequeno. Então, quando o arco PQ é muito pequeno, ou, de outra forma, quando “P se aproxima de Q”, ou ainda, quando $\Delta t \rightarrow 0$, teremos:

$$Qv \rightarrow 2PC$$

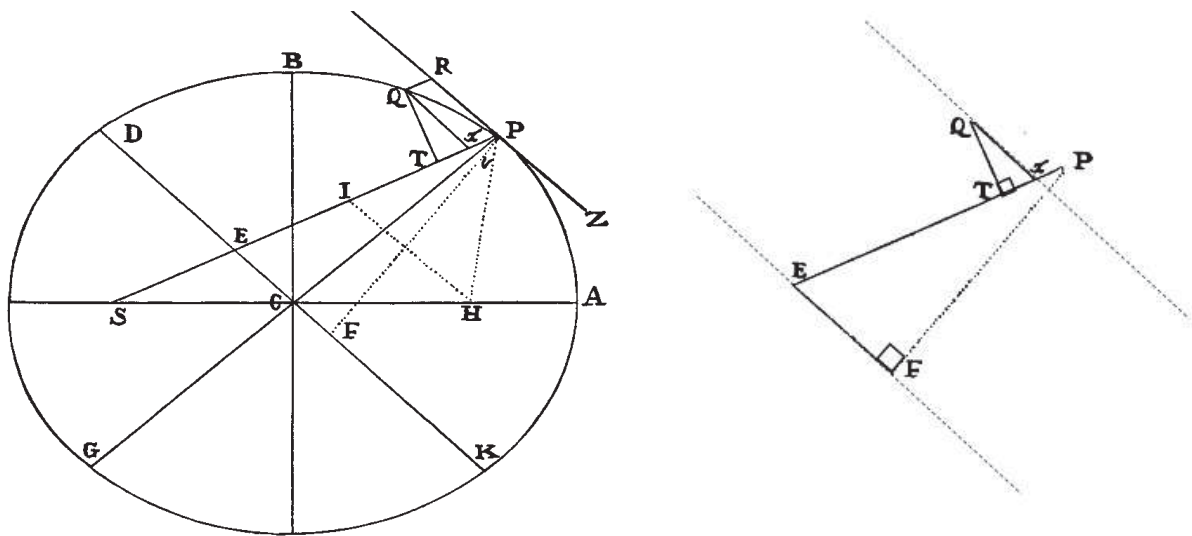
e

$$Qv \rightarrow Qx$$

Por conseguinte, a relação acima ficará:

$$QR = \frac{Qx^2 \cdot AC}{2CD^2} \quad [35]$$

Para eliminar Qx podemos traçar o segmento PF perpendicular ao diâmetro DCK para que os triângulos QxT e PEF sejam semelhantes:



Então teremos,

$$\frac{Qx}{QT} = \frac{EP}{PF} \quad [36]$$

Mas da proporção [32] já sabemos que $EP = AC$, e pela propriedade 6 das elipses

$$PF = \frac{CA \cdot CB}{CD}$$

Logo, a proporção [36] acima ficará:

$$\frac{Qx}{QT} = \frac{AC \cdot CD}{CA \cdot CB} \quad [37]$$

Conbinando as proporções [35] e [37], teremos:

$$\frac{QR}{QT^2} = \frac{AC}{2BC^2} \quad [38]$$

Um vez que a proporção [30] é

$$F_c \propto \frac{QR}{QT^2 SP^2}$$

Então, combinando [30]e [38], temos:

$$F_c \propto \frac{AC}{2BC^2} \frac{1}{SP^2} \quad [39]$$

Onde AC e BC são constantes e conhecidos. E pela propriedade 1 das elipses

$$\frac{AC}{2BC^2} = L$$

Onde L é o latus-rectum da elipse. Portanto, a proporção [39] ficará:

$$F_c \propto L \frac{1}{SP^2}$$

ou

$$F_c \propto \frac{1}{SP^2} \quad [40]$$

A lei da força centrípeta que mantém um corpo se movendo numa trajetória elíptica com centro de força em um dos focos da elipse é inversamente proporcional ao inverso do quadrado da distância a partir desse centro. Conforme queríamos encontrar³³⁵.

O problema de Hooke foi resolvido. De posse das leis do movimento, com a construção de uma geometria mecânica dinâmica, Newton foi capaz de chegar à solução procurada pelo curador da *Royal Society* durante tantos anos. No entanto, como veremos na próxima seção, Newton não parou por aí. As suas pretensões eram muito maiores do que a resolução de um problema matemático.

7.7 PARA ALÉM DO PROBLEMA DE HOOKE

Newton resolveu o problema de Hooke. Mas não sem um esforço considerável. Ao contrário do que o curador da *Royal Society* poderia eventualmente pensar, a solução desse problema não consistia numa mera aplicação da matemática. Para demonstrar corretamente a solução Newton precisou, primeiro, retomar os estudos de Wallis, Wren e Huygens sobre as colisões, segundo, reformular as conclusões desses estudos em termos dinâmicos – o que exigiu contribuições originais e decisivas da sua parte – terceiro, construir uma geometria mecânica a partir das leis dinâmicas que obtivera das suas reformulações, para, por fim, aplicar essa geometria mecânica na resolução do problema das órbitas elípticas. É natural que Newton tivesse relutado em simplesmente transmitir a solução para Hooke. Todavia, justiça seja feita, a ideia inovadora da composição dos movimentos de Hooke foi fundamental para a construção da geometria mecânica em analogia com a natureza, e consequentemente para a resolução do problema. Aparentemente, ninguém havia pensado na composição de dois movimentos em que um deles seria continuamente direcionado para um centro imóvel. O conceito de *força centrípeta* de Newton foi claramente construído a partir da sugestão de

³³⁵ No ANEXO C está o meu desenho do problema 6.

Hooke, embora ele o tenha disfarçado com um nome que sugeria uma inspiração na *força centrífuga* de Huygens.

O fato é que a partir dessas contribuições de Hooke (importantes que tenham sido, ou não), Newton foi muito além do que elas poderiam sugerir a qualquer um, à primeira vista. Primeiro, porque ele não resolveu apenas o problema da força centrípeta para órbitas elípticas nos *Principia*. Ele construiu uma solução geral para determinação da força centrípeta para qualquer tipo de órbita (proposição 6), e forneceu vários exemplos de aplicação dessa solução. Dentre os exemplos de aplicação estavam todas as seções cônicas (parábola, hipérbole, círculo e elipse), além da espiral equiangular³³⁶.

Em segundo lugar, Newton foi muito além do que as contribuições de Hooke poderiam sugerir porque o seu projeto não consistia simplesmente em resolver um problema matemático para testar a hipótese de atração interplanetária, ou dos graus dessa atração, mas construir uma geometria mecânica que poderia ser aplicada para resolver praticamente qualquer problema de determinação de forças da natureza, *inclusive* o problema de Hooke. Lembrando da apresentação de Newton no Prefácio, com os “princípios matemáticos” que se estava oferecendo seria possível partir dos movimentos e chegar nas “forças da natureza”; seria possível não apenas descobrir as forças dos movimentos planetários, mas forças “ainda desconhecidas”; seria possível “lançar luz” em um “método mais seguro de filosofar”. Desse modo, houvesse mesmo uma força universal de atração em todos os corpos do universo, tal como Hooke aparentemente imaginara, esse novo método seria capaz de determiná-la.

Em terceiro lugar, Newton foi muito além do que as contribuições de Hooke poderiam sugerir porque a sua geometria mecânica, ao ter sido criada em analogia com a natureza o permitia investigar os “verdadeiros movimentos” planetários, e não apenas resolver um problema matemático idealizado. Dentre os axiomas da geometria mecânica de Newton, por exemplo, estava a terceira lei do movimento, que o informava que toda força impressa em um corpo gerava uma força impressa igual e contrária no outro polo da interação. Assim, Newton sabia que provavelmente não existiam corpos centrais absolutamente imóveis, como no problema proposto por Hooke. A terceira lei o permitia avançar para além do problema de Hooke, e permitia considerar o pequeno movimento do corpo central, chegando, dessa forma, nos “verdadeiros movimentos” planetários. Eventualmente, esses movimentos poderiam nem mesmo ser detectáveis pelas observações astronômicas que Hooke baseara seus estudos. É por

³³⁶Naturalmente, por se tratar de uma geometria mecânica, a solução de Newton também possivelmente poderia ser aplicada com sucesso para as curvas mecânicas. Ainda nessa seção apresento algumas considerações sobre as seções cônicas.

essa razão que Newton não encerra suas investigações com a solução do problema das elipses. Essa solução se encontra apenas a *terceira* das quatorze seções que compõem o Livro I dos *Principia*. Na seção 3, por exemplo, ele ainda amplia as conclusões obtidas para a elipse de modo a incluir também as outras seções cônicas – a hipérbole e a parábola. E na seção 11 ele introduz a terceira lei do movimento na análise do movimento do corpo central. Para concluir a *Parte 2* desse trabalho será proveitoso fazer, ao menos, um breve resumo da seção 3, mostrando a continuidade do caminho que Newton percorreu para além do problema de Hooke. Essa seção também é importante porque nela se apresentam outros resultados imprescindíveis para o argumento da gravitação universal e a demonstração do sistema de mundo no Livro III. Será conveniente, portanto, apresentar resumidamente alguns desses resultados.

A seção 3 dos *Principia* se propõe a analisar “o movimento dos corpos em seções cônicas excêntricas”. Entretanto, a bem da verdade, Newton começa essa análise já na última proposição da seção 2 (a proposição 10) e, portanto, iniciarei a apresentação da seção 3 por essa proposição extemporânea. A proposição 10 aborda o problema da determinação da lei de força centrípeta atuando num corpo que descreve uma elipse com o centro de força coincidindo com o centro da elipse. Usando o resultado obtido na proposição 6, Newton demonstra que nesse caso específico o corpo deve estar submetido a uma força centrípeta diretamente proporcional à distância (D) até o centro. Ou seja,

$$F_c \propto D$$

No corolário 3 da proposição 4 ficamos sabendo que a relação acima é, também, uma das leis de força possíveis para um corpo se movendo numa trajetória circular com o centro de força coincidindo com o centro do círculo.³³⁷ Por essa razão Newton conclui – no corolário 1 à proposição presentemente em análise – que se um corpo se move sob a ação de uma força centrípeta diretamente proporcional à distância, então ele poderá descrever (1) uma trajetória circular, com centro de força coincidindo com o centro do círculo; ou (2) uma trajetória elíptica, com o centro de força coincidindo com o centro da elipse.

No corolário 2 dessa mesma proposição 10, ele demonstra que, sendo a força centrípeta proporcional à distância, no caso em que haja vários corpos descrevendo diferentes elipses com centros de força concêntricos e coincidindo com o centro das elipses, os períodos

³³⁷ Esse corolário foi apresentado aqui na seção 7.3.

de revolução (T) desses corpos serão iguais ($T_1 = T_2 = T_3$, etc). Esse resultado é importante, primeiro, porque se equipara ao resultado obtido para o círculo no referido corolário 3 da proposição 4 (neste trabalho apresentado na seção 7.3.2), e segundo, porque se relaciona com o corolário 8 da proposição 4, que foi omitido naquela seção, e sobre o qual voltarei alguns parágrafos mais adiante.³³⁸

A proposição 11 aborda o problema da determinação da força centrípeta atuando num corpo descrevendo uma elipse com o centro de força coincidindo com o foco da elipse. Este é o problema de Hooke, que foi resolvido em detalhes na seção 7.6. Newton demonstrou que nesse caso a força centrípeta deve ser proporcional ao inverso do quadrado da distância (D) até o foco.³³⁹ Em símbolos:

$$F_c \propto \frac{1}{D^2}$$

A partir da proposição 12 Newton amplia o escopo da sua análise em órbitas circulares e elípticas. Em outras palavras, Newton inicia uma análise para além do problema de Hooke. Na proposição 12, por exemplo, ele aborda o problema da determinação da força centrípeta atuando num corpo que se move numa trajetória hiperbólica, com o centro de força coincidindo com o foco da hipérbole. Na proposição 13 ele aborda o problema da determinação da força centrípeta atuando num corpo que se move ao longo de uma parábola, com o centro de força coincidindo com o foco da parábola. Nesses dois problemas Newton chega ao mesmo resultado que obteve para a elipse. A força centrípeta é proporcional ao inverso do quadrado da distância até o foco.

As três proposições de abertura da seção 3, portanto, oferecem um importante resultado. Se um corpo se move numa órbita curvilínea sob a ação de uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância, esse corpo necessariamente descreverá uma trajetória equivalente a uma das seções cônicas com o centro de força coincidindo com o foco dessas cônicas – e conversamente. Esse resultado poderia ser expresso simplificadamente como abaixo:

³³⁸ Na seção 7.3.2 disse que abordaria esse corolário num momento mais oportuno. O leitor que não acompanhou a resolução do problema de Hooke, no cap. 7, não precisa necessariamente retornar a essas seções para compreender o essencial do que será apresentado aqui.

³³⁹ A solução detalhada foi apresentada ao longo de todo o capítulo 7, mas em especial na seção 7.6.

$$F_c \propto \frac{1}{D^2} \leftrightarrow \text{seções cônicas}^{*340} \quad [41]$$

Newton esclarece a importância do resultado anterior no primeiro dos dois corolários oferecidos à essa proposição 13. No corolário, ele afirma que, uma vez que uma cônica qualquer pode ser descrita a partir da determinação do seu foco e de uma reta tangente a um ponto de contato qualquer na curva, então, se tivermos um corpo descrevendo uma trajetória curva sob a ação de uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância, e conhecermos tanto a posição do foco onde se encontra o centro de força quanto a velocidade do corpo num pequeno trecho da trajetória, nos será possível determinar a exata trajetória por ele descrita (porque com a velocidade e a força é possível determinar a curvatura desse pequeno trecho e, com a curvatura, a reta tangente). Ora, esse resultado é notável porque ele sugere que seria possível, ao menos em tese, determinar as exatas trajetórias planetárias caso conhecêssemos (1) a lei de força atuando nos planetas; (2) a velocidade dos planetas em alguns pontos da trajetória; e (3) a posição do centro de força para o qual eles são supostamente atraídos. E, destacadamente, a velocidade dos planetas e as suas posições relativas ao suposto centro de força eram dados perfeitamente ao alcance dos astrônomos da época.

As proposições 14 e 15 da seção 3 não são menos importantes que as anteriores. Nelas Newton estabelece dois teoremas que apresentam um resultado imprescindível para o argumento da gravitação no Livro III. Na proposição 14 ele declara que se vários corpos revolvem em torno de um centro de forças comum, e, se a força centrípeta é proporcional ao inverso quadrado da distância, então o *latus rectum* (L) da órbita cônica necessariamente gerada (no caso, uma elipse)³⁴¹ será proporcional ao quadrado das áreas que os corpos descrevem no mesmo tempo, em relação ao centro de forças (A^*). Em outros termos,

$$L \propto A^{*2}$$

³⁴⁰ Introduzi o “asterisco” para enfatizar que uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância implica num movimento em uma das seções cônicas com *centro de força coincidindo com o foco da seção cônica*, e que essa bi-implicação não é válida para o círculo, que admite – além dessa lei de força – ainda outras forças que não são do tipo inverso quadrado. É válida, em suma, para a elipse, hipérbole e parábola em relação ao foco.

³⁴¹ Pela relação [41]. O teorema da proposição 14 fala em corpos “revolvendo” em torno de um centro. Naturalmente, essa situação não é possível para parábolas e hipérboles, apenas para círculos e elipses.

No corolário único a essa proposição Newton considera uma consequência desse teorema. Numa elipse, o tempo necessário para uma revolução completa é o tempo periódico (T) e, nesse caso, a área A^* da proporção acima será a área da própria elipse. Podemos, então, reescrever a relação acima como:

$$A_T \propto \sqrt{L} \quad [42]$$

e

$$\sqrt{L} \propto T \quad [43]$$

Onde A_T é a área da própria elipse, ou a área total da elipse, L é o latus rectum da elipse, e T o período dos corpos descrevendo as trajetórias elípticas. Em outras palavras, o período dos corpos descrevendo diferentes trajetórias elípticas com mesmo centro de forças é proporcional à raiz do latus rectum das elipses que descrevem respectivamente.

A proposição 15 prossegue o desenvolvimento do corolário anterior até chegar na importante conclusão a que me referi mais acima. Essa conclusão afirma que, no caso de vários corpos descrevendo órbitas elípticas com um centro de forças em comum, o quadrado dos tempos periódicos da revolução desses corpos será proporcional ao cubo dos semi-eixos principais das elipses que descrevem. Essa conclusão é nada menos que o conhecido resultado empírico na época chamado de regra harmônica de Kepler para o movimento planetário, demonstrado aqui para órbitas elípticas. Em razão da importância desse resultado para os desenvolvimentos futuros, será proveitoso acompanhar os breves passos dessa demonstração.

Uma das propriedades elementares das elipses é que o seu semi-latus rectum é a terceira proporcional entre os seus dois semi-eixos, ou, que o seu latus rectum é a terceira proporcional entre o eixo principal e secundário.³⁴² Se chamarmos o eixo principal de AA' e o secundário de BB' , então essa propriedade pode ser expressa como abaixo:

$$L = \frac{(BB')^2}{AA'}$$

Logo,

$$(BB')^2 = L \cdot AA'$$

³⁴² Besant, 1895, prop.5. Veja também a proposição 1 das seções cônicas, introduzidas na seção 7.5.

Multiplicando ambos os lados da equação por $(AA')^2$, teremos:

$$AA' \cdot BB' = \sqrt{L} \cdot (AA')^{3/2} \quad [44]$$

A equação acima expressa que a área do retângulo formado pelo produto do eixo principal AA' e o eixo secundário BB' de uma elipse (que é também o retângulo que circunscreve a elipse) é igual ao produto da raiz quadrada do *latus rectum* dessa elipse e do seu eixo principal elevado a razão sesquialtera. Se chamarmos a área desse retângulo de A_r , e o semi-eixo principal da elipse de R , a equação [44] pode ser escrita como:

$$A_r = \sqrt{L} \cdot 2R^{3/2} \quad [45]$$

Uma vez que a área total da elipse (A_T) é proporcional à área do retângulo que a circunscreve (A_r) então podemos escrever a equação [45] na forma da proporção abaixo:

$$A_T \propto A_r = \sqrt{L} \cdot 2R^{3/2} \quad [46]$$

Como, pela lei das áreas, a área total A_T é proporcional aos tempos periódicos, teremos:

$$T \propto \sqrt{L} \cdot 2R^{3/2}$$

ou

$$T\sqrt{L} \propto L \cdot R^{3/2} \quad [47]$$

Combinando [43] e [47], obtemos:

$$T^2 \propto R^3 \quad [48]$$

Onde T é o período de revolução dos corpos na órbita e R é semi-eixo principal da elipse, ou a distância média até o foco, que é a terceira lei de Kepler para órbitas elípticas. Em síntese, no caso de vários corpos descrevendo trajetórias elípticas com centro de forças comum coincidindo com o foco da elipse, esses corpos estarão necessariamente sujeitos a uma força

centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância até o foco (o que já fora demonstrado pela proposição 11), mas também, necessariamente, obedecerão a lei harmônica de Kepler com R sendo o semi-eixo maior da elipse. A evidente relevância desse resultado está em que Newton associou matematicamente uma regra empírica de Kepler obtida das observações dos movimentos planetários com uma força do tipo inverso do quadrado da distância e uma órbita elíptica. Novamente, esse resultado é da mais alta importância para os desenvolvimentos futuros rumo à gravitação universal e a demonstração do sistema do mundo. Ele poderia ser expresso simplificadamente como abaixo:

$$\frac{T^2}{R^3} \leftrightarrow F_C \propto \frac{1}{R^2} \leftrightarrow \text{órbitas elípticas ou circulares}^* \quad [49]$$

O asterisco foi introduzido para ressaltar que a segunda implicação é válida somente para corpos descrevendo órbitas circulares e elípticas com centros de força em comum, e coincidindo com os focos das elipses e os centros dos círculos.³⁴³

Gostaria de fazer duas considerações sobre esse resultado. A primeira consideração é sobre a sua relação com o corolário 8 da proposição 4, cuja relevância eu destaquei de início, mas deixei para abordar precisamente nesse momento.

Na proposição 4 Newton apresenta a sua análise da força centrípeta especificamente para o movimento circular. Nessa proposição ele demonstrou, dentre outras coisas, que, quando a força centrípeta é diretamente proporcional a distância ($F_C \propto D$), os tempos periódicos de vários corpos em diferentes órbitas circulares concêntricas são iguais; e demonstrou também que quando a força centrípeta é inversamente proporcional ao quadrado da distância ($F_C \propto 1/D^2$) os tempos periódicos de vários corpos em diferentes órbitas circulares concêntricas obedecem a lei harmônica de Kepler (T^2/R^3). Ora, nessa seção vimos que exatamente o mesmo se mostrou verdadeiro para o caso das elipses (prop.10, cor.2 e prop.15), apenas com a diferença que o raio dos círculos se tornou o semi-eixo maior das elipses. Portanto, é somente aqui, na seção 3, que Newton justifica o importante resultado que ele antecipara no enigmático corolário 8 da proposição 4, quando analisava o caso das órbitas circulares, que agora vale a pena citar:

³⁴³ Todavia no caso particular do círculo a situação é um pouco diversa. Como já foi evidenciado na seção 7.3.2, uma órbita circular pode subsistir sob outras leis de força que não aquela do inverso quadrado da distância. No entanto, se as órbitas circulares obedecerem a lei harmônica necessariamente a força centrípeta será proporcional ao inverso do quadrado da distância até o centro. Portanto, a simbolização poderia ser melhor representada como segue: $F_C \propto \frac{1}{R^2} \leftrightarrow \text{órbitas circulares que obedecem a } \frac{T^2}{R^3}$.

Corolário 8

Nos casos em que os corpos descrevem partes semelhantes de quaisquer figuras que são semelhantes e possuem centros semelhantemente localizados nessas figuras, todas as mesmas proporções com respeito aos tempos, velocidades e forças anteriormente demonstradas se seguem para eles. E a aplicação é feita substituindo a descrição uniforme das áreas pelo movimento uniforme, e usando as distâncias dos corpos até os centros em vez dos raios.³⁴⁴

Apenas aqui, na proposição 15, fica claro o que Newton quer dizer “figuras semelhantes”, “centros semelhantemente localizados” e outros detalhes que, no contexto exclusivo da proposição 4, se tornavam difíceis de vislumbrar. As “figuras semelhantes” com “centros semelhantemente localizados” são órbitas com a mesma forma (destacadamente círculos e elipses), de diversos tamanhos, porém com centros de força em comum, o que faz com que elas se tornem órbitas “semelhantes”, ou seja, sujeitas à mesma regularidade envolvendo raios, períodos e velocidades dos corpos, conforme percebemos na presente proposição. E a justificativa para a formulação desse corolário também foi demonstrada pelos desenvolvimentos que culminaram na relação [48].

A segunda consideração que gostaria de fazer sobre a conclusão apresentada na relação [49] é que dela é possível extrair um corolário da equivalência entre os resultados obtidos para elipses com centros de força em comum, e círculos concêntricos com centro de força coincidindo com o centro do círculo. Com efeito, esse é o corolário único oferecido por Newton à proposição 15.

Se houverem, hipoteticamente, dois corpos em duas trajetórias distintas, uma elíptica e uma circular, ambas sujeitas a uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância – distância esta até o centro, no caso do círculo e até o foco, no caso da elipse – e tivermos, ainda, o raio da órbita circular igual ao semi-eixo principal da elipse, então, teremos que o quadrado dos tempos periódicos do corpo revolvendo na elipse será igual ao cubo dos raios do círculo formado pelo semi-eixo maior da elipse. Essa conclusão é fornecida por Newton no corolário à proposição 15: “Portanto, os tempos periódicos nas elipses são os mesmos que nos círculos cujos diâmetros são iguais ao maior eixo das elipses”. O interessante desse corolário é que ele é o preciso enunciado da lei harmônica de Kepler para os planetas movendo-se em órbitas elípticas. O que Kepler enunciou, com efeito, foi que os tempos periódicos dos planetas são proporcionais ao raio dos *círculos* formados pelo semi-eixo maior elevado a razão sesquiáltera. Portanto, o que Newton demonstra nesse corolário é que estando os corpos submetidos a uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância, uma

³⁴⁴ CW, p.451.

elipse pode perfeitamente ser substituída por um círculo cujo raio é igual ao semi-eixo principal da elipse, sem prejuízo para os resultados obtidos. Em outras palavras, uma força central do tipo inverso quadrado justifica perfeitamente as regularidades observadas por Kepler no movimento planetário.

Nas proposições da seção 3, portanto, Newton ampliou a análise dos círculos e elipses para as seções cônicas em geral, e também demonstrou as razões da equivalência nas situações matemáticas específicas relacionadas aos corpos em órbitas circulares e elípticas, tais como semelhantemente observadas nos movimentos planetários. Creio que isso é suficiente para mostrar que Newton avançou bem além dos limites delimitados pelo problema de Hooke. Mas, aparentemente, ainda assim ele não ficou satisfeito. Para resolver efetivamente o problema da causa dos movimentos planetário Newton não precisava apenas ir além do problema de Hooke. Ele precisava ir além da consideração de centros de força fixos. Ou melhor, além de um problema matemático considerado sob certas condições idealizadas. Newton fez isso apenas na seção 11 do Livro I, que será discutida em mais detalhes da na *Parte 3* desse trabalho. Entremos, agora, na apresentação e discussão do Livro III: “O Sistema do Mundo”.

Parte 3.

O Livro III dos Principia:

A gravitação universal e o sistema do mundo

“A lei da gravitação é indisputavelmente e incomparavelmente a maior descoberta científica já feita; quer do ponto de vista dos avanços que envolve, da extensão da verdade revelada, ou da natureza fundamental dessa verdade”.

William Whewell, 1837, L.7, cap.8, sec.6.

“A teoria de Newton é provavelmente o maior avanço já alcançado no esforço em direção à determinação dos nexos causais dos fenômenos da natureza”.

Albert Einstein, 1920.

Na *Parte 2* acompanhamos os desenvolvimentos de Newton na determinação dos “princípios matemático-mecânicos” e na construção daquilo que chamei de uma geometria mecânica análoga à natureza, criada com o objetivo específico de investigar as causas dos fenômenos naturais e, em especial, a causa dos movimentos planetários. A criação dessa geometria mecânica seria possível graças à concepção metafísica da *mechanicae universalis*, sugerida por Newton no Prefácio aos *Principia*. Uma vez que tanto a geometria quanto a natureza tem uma origem mecânica comum, seria possível – em tese – construir uma geometria mecânica em imitação à natureza, e usá-la com sucesso na determinação das causas dos fenômenos naturais. Do Livro I dos *Principia* foi possível depreender os passos de Newton na construção dessa geometria mecânica. Ele procedeu uma minuciosa investigação do comportamento dos corpos durante interações (colisões e atrações) na tentativa de encontrar regularidades matemáticas que pudessem ser expressas na forma de regras ou leis que relacionassem as causas e efeitos daquelas interações. Essa investigação deu origem às “leis do movimento”, que a partir da tese da origem mecânica da natureza seriam as próprias *leis da natureza* – ao menos potencialmente. Em seguida, Newton assumiu as “leis do movimento” como axiomas da sua geometria mecânica. Em outras palavras, ele tomou como axiomas da sua geometria mecânica os princípios análogos que regem os movimentos e forças na natureza. Desse modo, diante de um movimento com determinadas características na natureza ele poderia inferir a sua causa, bastando para isso comparar tal movimento com aquele análogo nessa geometria mecânica, cuja causa já seria conhecida, ou, de todo modo, poderia ser investigada geometricamente. Newton, portanto, construiu a geometria mecânica em analogia com a natureza e desenvolveu um número considerável de teoremas e problemas numa estrutura axiomática.

A partir de agora, no Livro III, Newton aplicará os seus princípios matemático-mecânicos – ou a sua geometria mecânica de forças – no problema físico concreto da determinação das causas dos movimentos planetários. Mais exatamente, ele tentará determinar essas causas para que por meio delas possa demonstrar o *sistema do mundo*, o objetivo principal desse último livro. No breve parágrafo de abertura desse livro, Newton relembra o roteiro anunciado no Prefácio:

Nos livros precedentes eu apresentei os princípios da filosofia; princípios que não são, todavia, filosóficos, mas estritamente matemáticos, isto é, aqueles nos quais o estudo da filosofia pode ser fundado. Esses princípios são as leis e condições dos movimentos e das forças que especialmente se relacionam com a filosofia (...). Ainda nos resta demonstrar o *sistema do mundo* a partir dos mesmos princípios.³⁴⁵

A necessidade da determinação das causas dos movimentos planetários surgia de um problema anterior a esse, um antigo problema que envolvia tanto a astronomia quanto a filosofia natural, e pode ser considerado como uma das principais questões científicas no auge da revolução do séc. XVII: a polêmica acerca do verdadeiro sistema do mundo – o geocêntrico ou o heliocêntrico – e a consequente determinação dos verdadeiros movimentos planetários a partir dessa definição. No Livro III dos *Principia*, Newton se propõe a ousada tarefa de aplicar o seu método na resolução desse difícil problema que gerou séculos de discussões entre os astrônomos e filósofos naturais. Este é o momento, portanto, em que Newton ilustrará na prática o seu projeto metodológico anunciado no Prefácio: partir dos fenômenos dos movimentos dos planetas para as forças pelas quais eles são mantidos em suas órbitas; e em seguida demonstrar os outros fenômenos a partir dessas forças. Este é o momento em que Newton vai aplicar os seus princípios matemáticos em associação com o método da *análise e síntese*.

O objetivo específico dessa *Parte 4* do trabalho será acompanhar os passos de Newton na aplicação do seu método até a solução do problema do sistema do mundo e a determinação dos verdadeiros movimentos planetários. Essa aplicação ocorre ao longo das 13 primeiras proposições do Livro III. Das proposições 1 até 7 ocorre a etapa da *análise*, onde se parte dos fenômenos dos movimentos planetários até se chegar à causa desses fenômenos, a saber, o princípio da gravitação universal. Das proposições 8 a 42 ocorre a etapa da *síntese*, que é a dedução do que se segue dessa causa recém descoberta. No entanto, o principal conteúdo concernente ao sistema do mundo se concentra das proposições de 8 a 13, portanto seguiremos Newton até a proposição 13 nessa investigação.

Uma vez que Newton apresenta os conteúdos do Livro III “à maneira matemática” – conforme ele mesmo informou no referido parágrafo de abertura – ou seja, seguindo o método axiomático da mesma forma que nos Livros I e II, será útil a apresentação de uma seção introdutória que complementa o tema do método axiomático iniciado no capítulo 4,

³⁴⁵ *Principia*, Livro III, introdução. Tradução minha, do latim. Original: “In libris precedentibus *Principia* philosophiae tradidi, non tamen philosophica sed mathematica tantum, ex quibus videlicet in rebus philosophicis disputari possit. Haec sunt motuum & virium leges & conditiones, qua ad philosophiam maxime spectant. Eadem tamen, ne sterilia videantur, illustravi scholiis quibusdam philosophicis, ea tractans qua generalia sunt, & in quibus philosophia maxime fundari videtur, uti corporum densitatem & resistentiam, spatia corporibus vacua, motumque lucis & sonorum. Superest ut ex iisdem principiis doceamus constitutionem systematis mundani”.

acrescentando, agora, detalhes mais específicos sobre a utilização desse método *na filosofia natural*. Além dessa seção introdutória, também será proveitosa uma seção sobre o tema do *sistema do mundo*, esclarecendo alguns aspectos técnicos desse assunto nas suas relações com a astronomia e a filosofia natural. Essas duas etapas preliminares serão apresentadas no capítulo 8. Após essas etapas, apresento os “princípios do Livro III” (capítulo 9) e, por fim, as proposições de 1 a 13 propriamente ditas (capítulos 10 e 11), que encerram a aplicação método da análise e síntese na solução do intrincado problema do sistema do mundo.

8 PRELIMINARES AO LIVRO III

8.1 O PROBLEMA DO SISTEMA DO MUNDO

Para apresentar a solução de Newton para a controvérsia sobre sistema do mundo, antes será preciso contextualizar esse problema nas tradições que emergiu, fornecendo ao leitor uma ideia mais precisa da sua dimensão histórica. Simplificadamente, o que eu aqui chamo de “o problema do sistema do mundo” é o antigo problema de apresentar um modelo do universo. A dificuldade em se explorar o desenvolvimento histórico desse problema está em que ele perpassa duas grandes tradições que se apresentavam às vezes sobrepostas, às vezes separadas (dependendo do período histórico considerado) e às vezes, ainda quando consideradas separadas, praticadas por pensadores que se inseriam em ambas as tradições. Refiro-me às tradições da *cosmologia* e da *astronomia*.

Como se sabe, a tradição aristotélica separou os campos da *astronomia* e da *cosmologia* e concedeu somente a esse último o privilégio de discorrer sobre o tema do “sistema do mundo”. Genericamente falando, na classificação aristotélica a *cosmologia* era o ramo da filosofia que tratava de toda a estrutura do universo³⁴⁶. A *astronomia*, em contrapartida, era considerada um ramo da matemática, que não estaria interessada na realidade das coisas, mas tão somente em propósitos práticos, como prever posições de planetas, estrelas, considerados não em sua natureza própria, mas como figuras e pontos geométricos. Um dos desdobramentos fundamentais dessa concepção era que somente a *cosmologia* se ocupava com as “causas” dos movimentos dos corpos celestes, uma vez que ela, e apenas ela, investigava a natureza verdadeira das coisas e dos fenômenos naturais. Evidentemente, essa divisão de Aristóteles nunca foi unanimidade ao longo da história, e principalmente em pleno séc. XVII esses dois domínios já estavam praticamente indiscerníveis.

Quando as origens dos campos da astronomia e da cosmologia são investigadas se percebe que antes de Aristóteles estes dois domínios também não possuíam uma distinção muito clara. Aparentemente, as primeiras elaborações do universo surgiram da fascinação que os fenômenos celestes exerciam sobre os antigos. Esses fenômenos consistiam em destacadas regularidades que eram facilmente observadas nos céus, como, por exemplo, a configuração fixa de grupos de estrelas que mantinham inalterada suas posições relativas à medida que se moviam para o oeste durante as noites. Contra o fundo dessas estrelas configuradas fixamente

³⁴⁶ O tratado mais influente de Aristóteles sobre a sua cosmologia é *De Caelo (O Céu)*. Para uma tradução recente do grego para o português veja Aristóteles, 2014.

havia corpos que se moviam independentemente em relação a elas: os *planetas* (“estrelas errantes”). Esses “planetas” incluíam Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter, Saturno, Sol e a Lua, e também apresentavam notáveis regularidades em seus movimentos. A catalogação das configurações de estrelas e do movimento dos planetas começou em épocas muito antigas e, como se sabe, logo encontraram algumas utilidades práticas, como a criação dos primeiros calendários. Mas aqui o que interessa dizer é que essa catalogação também deu origem à formulação dos primeiros modelos geométricos rudimentares com o objetivo de prever o movimento e a localização dessas “estrelas errantes”: a astronomia (ou o que veio ser conhecido como astronomia).³⁴⁷

É razoável admitir que foi a partir de um extenso acervo de registros astronômicos antigos – além do registro de outros fenômenos terrestres – que surgiram os primeiros modelos *cosmológicos* ou modelos de universo. Sem dúvida um dos mais influentes modelos cosmológicos da história da cultura ocidental foi aquele elaborado por Aristóteles, que manteve uma supremacia por praticamente dois mil anos. O modelo do filósofo grego ainda hoje é bastante conhecido. Trata-se de um universo esférico, finito, preenchido de matéria e perfeitamente ordenado. A Terra ocupa o lugar central. Os corpos celestes estão presos a esferas cristalinas concêntricas à Terra que arrastam esses corpos ao girarem. Cada corpo celeste está ligado a uma esfera, e a última das esferas contém as estrelas fixas do céu.

Apenas os componentes acima elencados já seriam suficientes para explicar, de maneira elementar, os fenômenos do céu. Todavia um modelo cosmológico era caracterizado não apenas por fornecer uma representação do céu, mas por fornecer um modelo da estrutura e funcionamento de toda a realidade. Desse modo, além daqueles componentes já citados, Aristóteles introduziu muitos outros. O cosmo foi dividido em mundo sublunar e supralunar. O mundo sublunar era composto de quatro elementos, terra, ar, água e fogo, dispostos em camadas concêntricas a partir da Terra, e o mundo supralunar era composto de um “quinto elemento” (quintessência), ou éter, supostamente leve e incorruptível, que preenchia o restante do cosmo. O objetivo dessas divisões e elementos era fornecer, repito, um modelo de explicação da totalidade da realidade. A divisão do mundo em sublunar e supralunar explicava a mutabilidade característica do mundo terrestre em contraste com a imutabilidade do mundo celeste, observada durante tantos séculos. O primeiro mundo era marcado pelas mundaças e transformações que se opunha à perfeição e incorruptibilidade do segundo. A disposição dos quatro elementos no mundo sublunar também explicava um grande espectro de

³⁴⁷ Nessa seção sigo a excelente síntese histórica oferecida por Harper, 2011, cap 1.

fenômenos em termos de “lugar natural”. Os corpos pesados se moveriam em direção ao centro da terra e os leves em direção contrária porque todos os corpos, quando abandonados por si só, na ausência de qualquer ação violenta, realizariam espontaneamente movimentos em direção aos locais que lhe seriam próprios: os mais pesados para baixo, em direção à terra no centro do universo; os mais leves para cima, em direção ao ar ou ao fogo, afastando-se do centro do universo. E por semelhantes raciocínios teleológicos Aristóteles explicou muitos outros fenômenos.

Do que foi resumido acima é possível perceber que a cosmologia era um dos ramos mais abrangentes da filosofia natural – e talvez o principal – uma vez que buscava construir um quadro completo da estrutura e funcionamento do universo, mobilizando variados campos nesse empreendimento, desde os dados astronômicos, a física terrestre, e metafísica. Possivelmente por essa razão Aristóteles entendeu que esse era o campo que legitimamente discorria sobre as “causas” dos fenômenos da natureza, incluindo aí as causas dos movimentos dos próprios corpos celestes, sendo a astronomia apenas uma ciência subalterna que lhe fornecia dados carentes de uma significação posterior. No entanto, ao longo de séculos de desenvolvimento da astronomia esse quadro foi gradativamente sendo alterado.

8.1.1 A astronomia

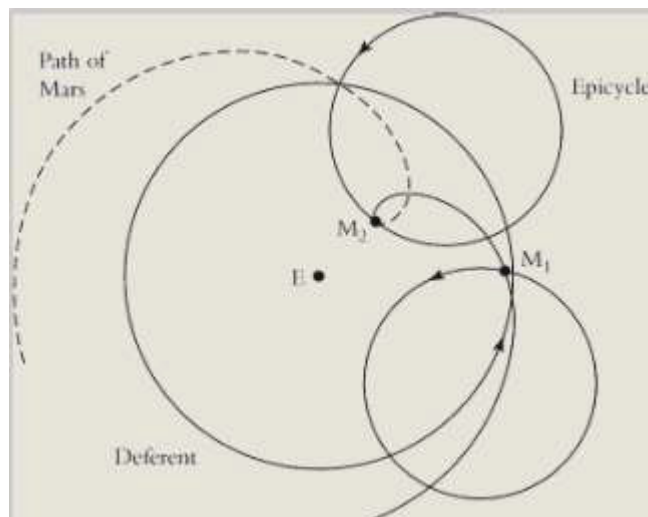
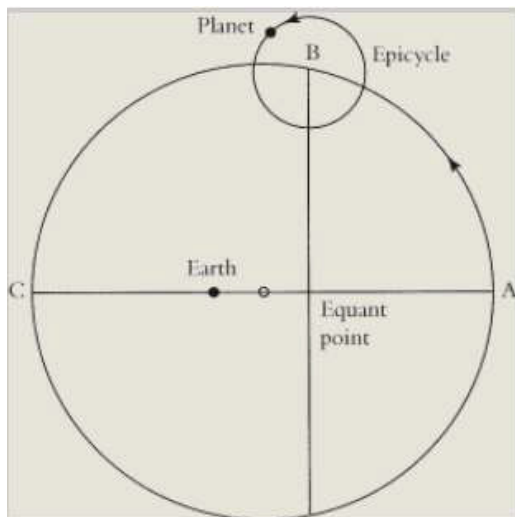
Um dos fenômenos do céu que mais desafiava o sistema do mundo tal como o descrevera Aristóteles era uma breve reversão que ocorria no movimento observado dos corpos celestes, um fenômeno que já era conhecido desde antes do filósofo grego. Em alguns momentos durante o seu percurso regular, os planetas aparentemente diminuíam a sua velocidade até parar, em seguida moviam-se por um curto período na direção contrária para por fim retornarem à sua trajetória original progressiva. Esse fenômeno ficou conhecido como “movimento retrógrado” dos planetas.



Figura 49 – Movimento retrógrado de Marte
Fonte: Harper, 2011, p.4.

O movimento retrógrado aumentava imensamente a complexidade da compreensão do movimento do astros. É provável que essa complexidade contribuiu para a astronomia se consolidar como um empreendimento investigativo praticamente independente da cosmologia. O objetivo da astronomia era construir detalhadas e precisas representações do movimento dos corpos celestes aproximando-os por figuras geométricas para, assim, ser capaz de prever os fenômenos do céu. Por se tratar, em tese, de uma abstração dos fenômenos nas quais estes últimos eram aproximados de figuras geométricas, a astronomia era considerada, geralmente, um conhecimento de caráter puramente instrumental, que não trabalhava, como já foi mencionado, com a realidade das coisas. Mas a despeito disso ela operava com um nível de detalhamento elevado em relação à posição e ao movimento dos astros.

Um dos mais afamados modelos astronômicos que se tem notícia foi apresentado na obra *Almagesto*, de Claudius Ptolomeu (150 a.C.). O astrônomo grego apresentou um modelo inspirado no sistema do mundo aristotélico no qual a Terra estática ocupava o centro do universo e todos os demais movimentos dos planetas eram circulares em torno do nosso planeta. Todavia, para descrever matematicamente as minúcias observadas dos movimentos dos planetas (como o movimento retrógrado), Ptolomeu introduziu pequenos ajustes e círculos adicionais em seu modelo. Os planetas não descreveriam círculos diretamente em torno da Terra, mas círculos menores chamados “epiciclos”, cujo centro percorreria um círculo maior em torno da Terra chamado “deferente”. Além disso, a Terra não estaria exatamente no centro do deferente, mas levemente deslocada, mantendo uma posição equidistante do centro em relação a outro ponto chamado “equante”, criado para justificar as variações de velocidade dos planetas durante o seu percurso.



O modelo astronômico de Ptolomeu permitia determinar com grande precisão a posição dos planetas no universo tanto no futuro quanto no passado. Essa localização era determinada com base num sistema particular de coordenadas por ele elaborado que admitia como referência o “plano da eclíptica” – o plano da órbita do Sol em torno da Terra. Por essa razão, as coordenadas desse sistema de referência ficaram conhecidas como “coordenadas eclípticas”, ainda em uso nos dias de hoje. A localização dos astros nesse sistema é fornecida por meio da distância angular do corpo a partir de uma origem convencional, no caso, o “equinócio vernal”, a posição do Sol no primeiro dia da primavera, quando a sua órbita cruza o equador celeste. O equinócio de outono coincide com o ângulo de 180 graus a partir da origem.

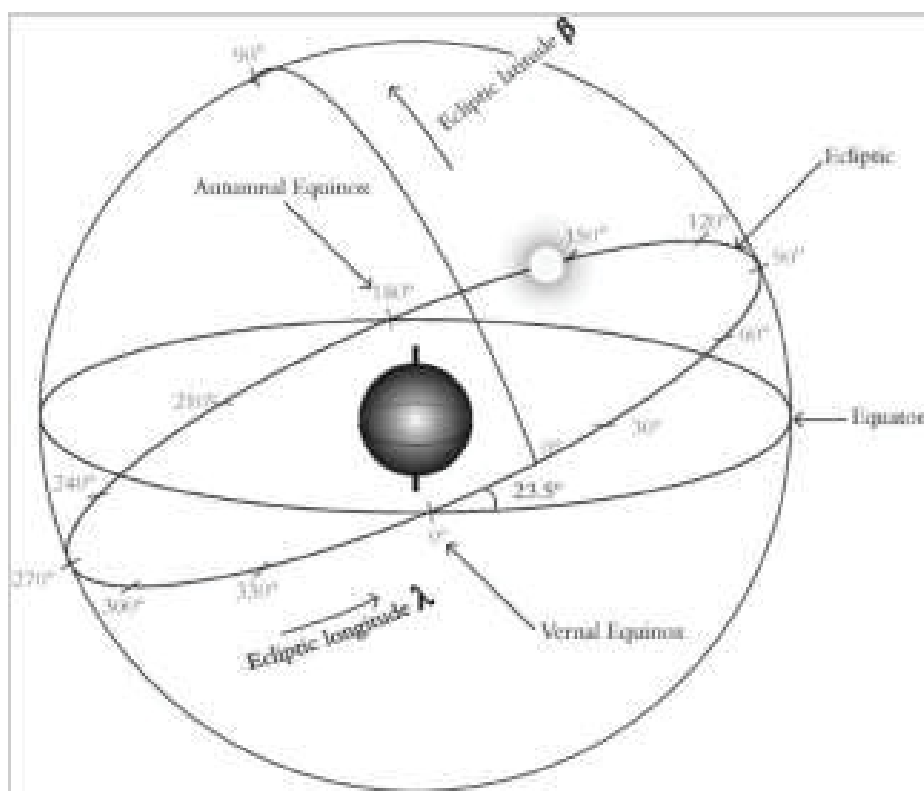


Figura 50 – Sistema de coordenadas eclípticas

Fonte: Harper, 2011, p.6.

A começar da origem no equinócio vernal, 12 constelações conhecidas (nomeadas pelos símbolos do zodíaco) segmentam o círculo da órbita do Sol em divisões de 30 graus, marcando outros pontos de referência.

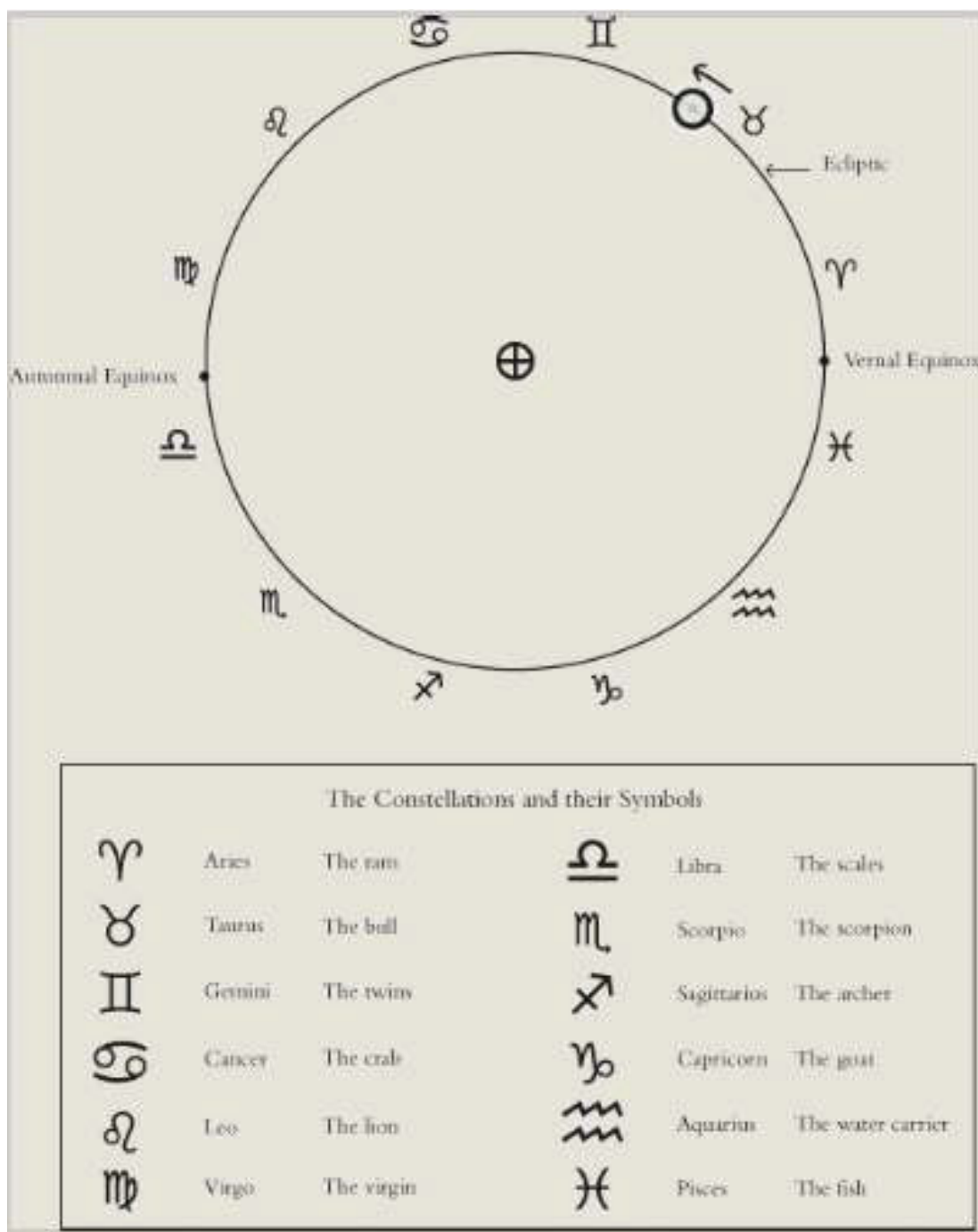


Figura 51 – Símbolos das 12 constelações do zodiaco
 Fonte: Harper, 2011, p.7.

Provavelmente devido o seu alinhamento com o sistema cosmológico aristotélico, a sua ausência de conflito com a doutrina da igreja na idade média e o seu razoável sucesso na predição dos movimentos e localizações dos astros, a vigência absoluta do modelo astronômico ptolomaico perdurou por cerca de 14 séculos. Todavia, ao final desse período muitos problemas já haviam se acumulado. Na época do Ptolomeu, por volta do século II a.C., a origem do sistema de coordenadas eclípticas coincidia precisamente com a constelação de

Áries. No entanto, ao longo dos séculos que se passaram os astrônomos perceberam que a posição dos equinócios não era fixa em relação às constelações. Constatou-se que os equinócios se moviam no sentido anti-horário pelo zodíaco retrocedendo cerca de 1 grau e 23 minutos de arco a cada século. Esse fenômeno ficou conhecido como “precessão dos equinócios”, e por fim foi atribuído ao movimento de rotação do eixo inclinado da Terra com relação ao plano da eclíptica. Os astrônomos concluíram que o movimento completo do eixo levaria 26 mil anos para ser concluído. Por volta do séc. XVII a posição do equinócio vernal já estava na constelação de Peixes.

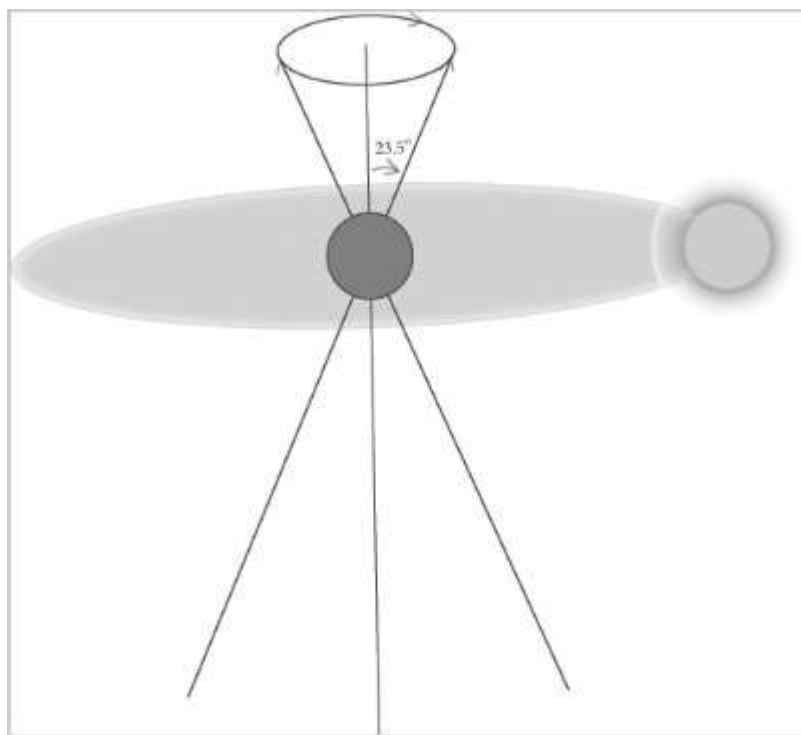


Figura 52 – Precessão dos Equinócios
Fonte: Harper, 2011, p.8.

Com efeito, Ptolomeu já tinha um conhecimento parcial desse fenômeno, mas havia previsto uma precessão dos equinócios de apenas 1 grau por século. O erro de 23 minutos de arco por século, depois de mais de 14 séculos, já produzia imprecisões bastante consideráveis nas tabelas astronômicas e a necessidade de reforma nos calendários. Além disso, a excessiva complexidade do movimento dos planetas no sistema ptolomaico era um assunto que incomodava muitos astrônomos. O diagrama de Kepler do movimento de Marte num sistema geocêntrico ilustra bem essa complexidade.

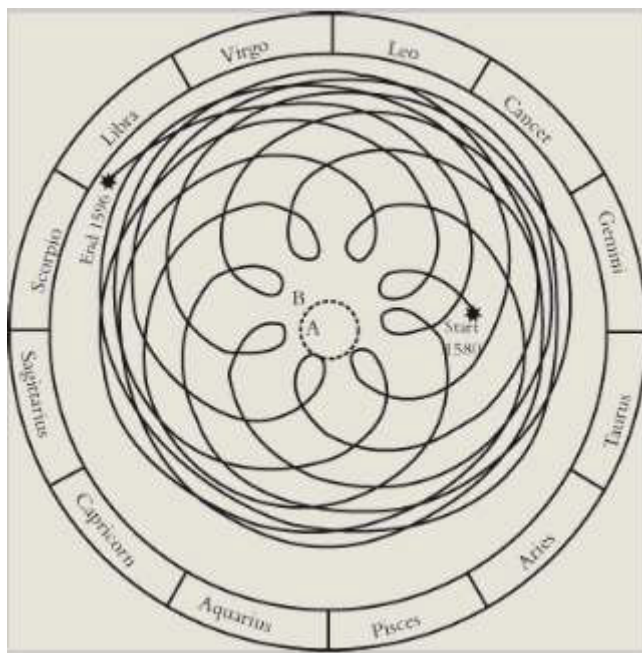


Figura 53 – Diagrama de Kepler para o movimento de Marte num sistema geocêntrico
Fonte: Harper, 2011, p.12.

Todos esses problemas com o sistema geocêntrico de Ptolomeu acabaram levando à formulação de sistemas astronômicos alternativos. Certamente o mais conhecido deles foi o sistema heliocêntrico apresentado na obra *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (*Da Revolução das Esferas Celestes*), do astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473-1543 d.C).

Além da excessiva complexidade dos epiciclos, Copérnico estava incomodado com o movimento circular não uniforme dos planetas no sistema ptolomaico, uma vez que dificilmente se poderia conceber um mecanismo físico para um modelo como esse.³⁴⁸ É possível perceber, por conseguinte, que o astrônomo polonês já estava revestido de uma tendência crescente da sua época em diluir as fronteiras entre a astronomia e a cosmologia. Levar em consideração o “mecanismo físico” do movimentos dos planetas como um critério para avaliar a conveniência de um modelo astronômico é uma sinalização clara em direção ao abandono de uma concepção de uma astronomia puramente instrumental, interessada apenas em “salvar os fenômenos”, e sem qualquer preocupação com a realidade física desses fenômenos. E embora o próprio Copérnico não tenha reconhecido que considerava a realidade dos movimentos dos corpos celestes em seu tratado, não é difícil perceber no contexto da época que essas fronteiras estavam sob séria ameaça, e que a obra do astrônomo polonês teve importante contribuição para a criação desse quadro.³⁴⁹

³⁴⁸ Harper, 2011, p.9.

³⁴⁹ Vale lembrar do conhecido prefácio não assinado de Osiander ao livro de Copérnico que se concentra em enfatizar o caráter instrumental, puramente matemático, das hipóteses do astrônomo polonês, uma vez que essas

Copérnico construiu o seu sistema retomando hipóteses antigas que consideravam que a Terra não era estática como Aristóteles propusera. Ele considerou o Sol estático no centro do universo, fazendo da Terra, então, mais um dos planetas. Uma das principais vantagens da hipótese de Copérnico era uma explicação mais simples para o movimento retrógrado dos planetas. A figura abaixo apresenta a explicação do movimento retrógrado de Marte a partir da perspectiva da Terra considerada como um planeta igualmente em órbita em torno do Sol.

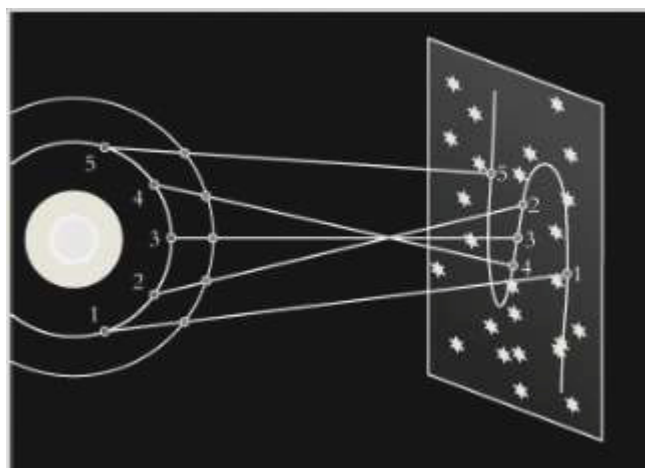


Figura 54 – Movimento retrógrado de Marte explicado pela perspectiva heliocêntrica
Fonte: Harper, 2011, p.9.

As posições relativas dos dois planetas na ultrapassagem da Terra por Marte durante o movimento de ambos em torno do Sol forneceu uma explicação muito mais simples para o movimento retrógrado de Marte do que aquela fornecida pelo sistema geocêntrico ptolomaico. Além disso, o modelo copernicano fornecia previsões pelo menos tão precisas quanto o modelo de Ptolomeu. Quatro décadas após a publicação da obra de Copérnico, apesar das divergências da sua teoria com a doutrina da igreja, o modelo do astrônomo polonês foi utilizado pelo Papa Gregório para reformar o calendário, fato que serve para mostrar a influência que o seu sistema adquirira a aquela altura.

Tirar a Terra do centro do universo, todavia, era uma mudança muito radical para a época. E não apenas pelos amplamente conhecidos motivos religiosos. Todo o sistema de ensino fora erigido sobre a filosofia aristotélica. Aceitar o modelo copernicano implicava na destruição da cosmologia aristotélica. Naturalmente, surgiram sistemas astronômicos que

hipóteses, pela surpreendente adequação ao movimento dos planetas, estavam começando a ser consideradas pelos leitores como uma representação da realidade física. Naturalmente, o argumento de Osiander no prefácio visava preservar a obra de Copérnico das implicações religiosas que estariam envolvidas na assunção de uma possível associação do tratado do autor com a realidade do mundo. Veja o prefácio de Osiander em Copernicus, 1992.

tentaram conciliar as mudanças necessárias na astronomia com a manutenção da Terra no centro do universo, como o sistema do mundo do astrônomo dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601 d.C.). Conforme nos lembra Harper, “Brahe conduziu um empreendimento de observação em astronomia que produziu um extenso e impressionante preciso conjunto de dados astronômicos”.³⁵⁰ A precisão desses dados decorria parcialmente da sua disciplina na observação sistemática e paciente, registrando os movimentos dos astros nos seus mínimos detalhes, e parcialmente dos seus instrumentos de observação de grande porte, provendo aquilo que poderia haver de melhor em termos de precisão antes do uso do telescópio para esse fim. Com base nesses dados, o astrônomo dinamarquês percebeu a necessidade de uma revisão no sistema ptolomaico, mas optou por uma reforma mais conservadora que a de Copérnico, desenvolvendo um sistema que muitas vezes é classificado como um modelo “geo-heliocêntrico”, no qual a Terra permanece no centro do universo, mas os planetas giram em torno do Sol.

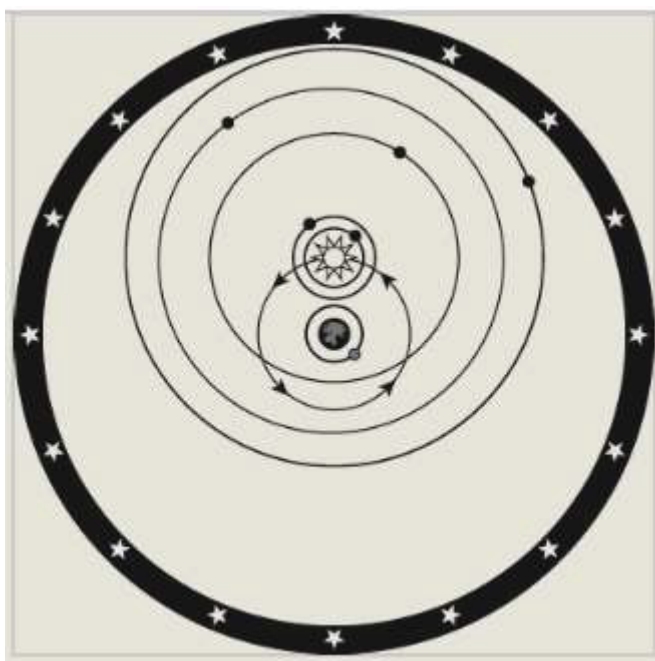


Figura 55 – O Sistema Geo-Heliocêntrico de Tycho Brahe
Fonte: Harper, 2011, p.10.

No sistema tychonico o Sol e a Lua giram em torno da Terra, enquanto que os demais planetas giram em torno do Sol. Diferente de Copérnico, Brahe não considerou a Terra como um dos planetas. Embora questões religiosas e pragmáticas possam ter pesado na formulação do seu

³⁵⁰ Harper, 2011, p.10.

sistema, o astrônomo dinamarquês também tinha evidências observacionais para defender que a Terra não se movia em torno do Sol.³⁵¹

É um fato bastante conhecido que Tycho Brahe legou os seus dados astronômicos, coletados ao longo de uma vida, ao seu discípulo alemão Johannes Kepler (1571-1630 d.C.). Em 1601 Kepler escreveu obra que hoje poderia ser classificada como de história e filosofia da astronomia, na qual ele defendeu que “a equivalência empírica entre os sistemas geocentricos e heliocentricos poderiam ser superadas com o recurso à causas físicas”.³⁵² Em 1609 ele publicou *Nova Astronomia baseada em Causas ou Física Celeste, tratada por meio dos comentários de Sobre o Movimento da Estrela de Marte, das observações de Tycho Brahe, Gent.*³⁵³ Nesse livro Kepler referiu-se à sua própria hipótese acerca das causas físicas dos movimentos dos astros e usou os dados de Brahe para argumentar que Marte se move numa órbita elíptica com o Sol localizado em um dos focos da elipse.³⁵⁴ Além disso, ele argumentou que a área varrida pelo raio que liga o planeta ao foco é constante para intervalos iguais de tempo. Atualmente conhecemos essas duas conclusões como primeira e segunda leis de Kepler, respectivamente.

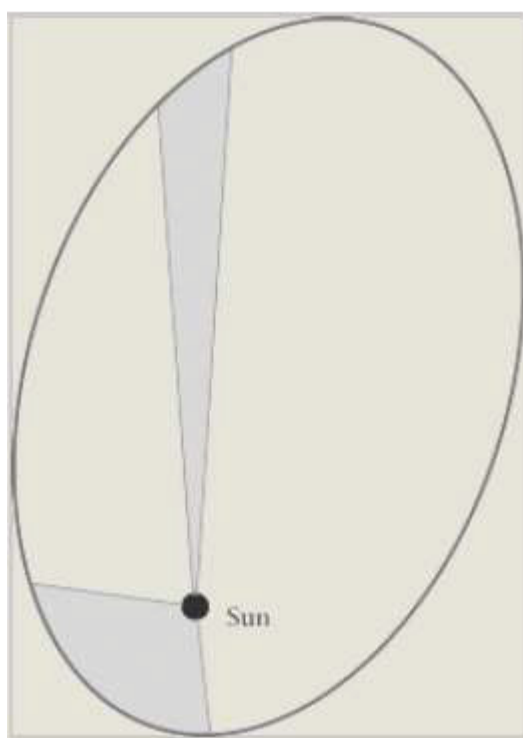


Figura 56 – Lei das áreas de Kepler numa trajetória elíptica. Fonte: Harper, 2011, p.12.

³⁵¹ Van Helden, 1989. Veja também Harper, 2011, cap.1.

³⁵² Jardine, 1984. Veja também Harper, 2011, p.11.

³⁵³ Trata-se da obra de Kepler mais popularmente conhecida entre os comentadores como *Astronomia Nova* (Veja Kepler, 1992).

³⁵⁴ Harper, op. cit., p.11.

Em 1619 Kepler publicou o livro *A Harmonia do Mundo*, no qual ele usou os seus dados astronômicos para chegar à “regra harmônica”. De acordo com essa regra os planetas se movem em torno do Sol de tal modo que a proporção entre os seus períodos e as suas distância médias até aquele astro obedece à “razão sesquiáltera” ($3/2$), uma conhecida razão utilizada na teoria antiga da harmônica. Especificamente, Kepler argumentou que o período T dos planetas era proporcional à distância média R ao Sol elevado à razão sesquiáltera ($T \propto R^{3/2}$). Numa forma mais conhecida, o astrônomo defendeu que a razão T^2/R^3 é constante para qualquer as órbitas planetárias. Essa é a relação hoje difundida como a terceira lei de Kepler.

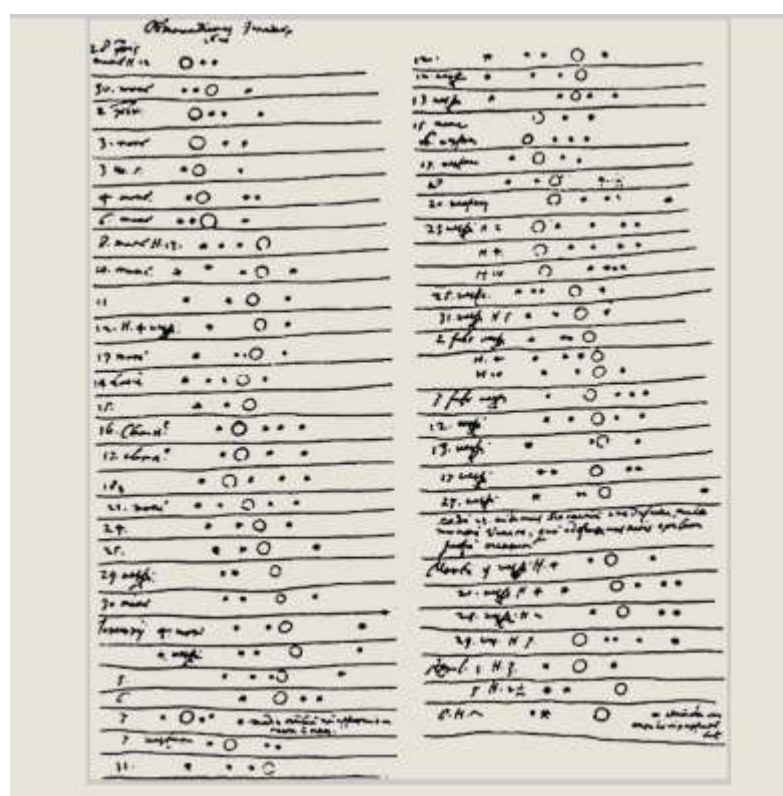
Duas observações devem ser feitas a respeito do trabalho de Kepler. A primeira é sobre a exatidão das predições dos movimentos dos planetas decorrentes das suas regras. Conforme nos informa Harper, a culminação dos trabalhos de Kepler ocorreu em 1627 com a publicação das *Tabelas Rudolfinas*, na qual forneceu predições de posições e movimentos dos planetas a partir das suas regras orbitais. Hoje sabemos que essas predições são cerca de trinta vezes mais precisas do que as tabelas concorrentes da sua época.³⁵⁵ A segunda observação é sobre o projeto para a ciência da astronomia proposto por Kepler. Ele não apenas seguiu a tendência referida há pouco de uma astronomia que passava a considerar, ainda que veladamente, a realidade dos sistemas propostos. Ele assumiu uma posição explícita a esse respeito. Conforme foi destacado, já nas suas primeiras obras ele propôs abertamente a inclusão de considerações sobre as causas físicas dos movimentos dos planetas como critério de escolha entre os sistemas geocêntrico e heliocêntrico. Isso significava uma clara ruptura com as fronteiras erigidas pelo aristotelismo entre a cosmologia e astronomia e, conseqüentemente, entre a matemática e a filosofia natural, ruptura esta que alcançaria o seu auge algumas década depois com os *Principia* de Newton.³⁵⁶

³⁵⁵ Ibid, p.14.

³⁵⁶ A questão da “equivalência empírica” levantada por Kepler entre os sistemas heliocêntrico copernicano e o geocêntrico tychoniano não estava apenas relacionada com um semelhante grau de predição dos dois sistemas. Estava relacionada principalmente com a falta de convicção na possibilidade de se chegar a uma definição entre os dois sistemas do mundo pela experiência, ou melhor, pelas observações astronômicas. Para decidir se a Terra ou o Sol estava em repouso no centro do universo seria necessário encontrar, no sistema planetário, um outro corpo ou planeta que estivesse também em repouso, uma vez que as estrelas fixas não serviam para avaliar o repouso da Terra ou do Sol. O problema é que não havia esse corpo em repouso. Todos os planetas estavam em movimento. E as regras das áreas dos períodos forneciam resultados exatamente iguais tanto para a Terra girando em torno do Sol quanto para o Sol girando em torno da Terra. Assim, não restava outra alternativa a não ser tentar encontrar essa resposta pela investigação das causas dos movimentos planetários. Veja mais sobre isso no capítulo 11.

8.1.2 O telescópio

Sem dúvida um certo dispositivo tecnológico teve um papel central na ruptura com as divisões criadas pela filosofia aristotélica. O telescópio. No início do séc. XVII a qualidade dos dados astronômicos deu um salto considerável quando o telescópio passou a ser utilizado especificamente para a observação astronômicas. É um consenso entre os historiadores que o primeiro pensador a utilizar o telescópio para esse fim foi o Galileu (1564-1642 d.C.). Em 1609, Galileu construiu telescópios muito mais poderosos que aqueles até então conhecidos e em 1610 publicou os seus primeiros resultados sobre as observações da Lua, estrelas e planetas.³⁵⁷ Ele fez várias descobertas inéditas na astronomia, mas talvez duas mereçam destaque aqui. Primeiro, as suas observações de Júpiter revelaram que esse planeta era orbitado por quatro luas, um dado que sugeria que uma semelhança da Terra com os outros planetas do sistema solar.



³⁵⁷ Publicado em *Sidereus Nuncius* (1610). Veja Galilei, 1989.

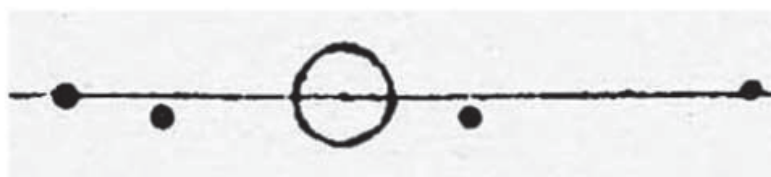


Figura 57 – Registros das observações telescópicas de Galileu das luas de Júpiter, compiladas pelos jesuítas astrônomos do Colégio Romano. Fonte: Harper, 2011, p.52.

Em segundo lugar, as suas observações de Vênus revelaram que esse planeta apresentava diferentes fases. Essa observação teve uma importância capital na história da astronomia. O fato de Vênus possuir fases implicava de maneira praticamente inequívoca que esse planeta girava em torno do Sol.

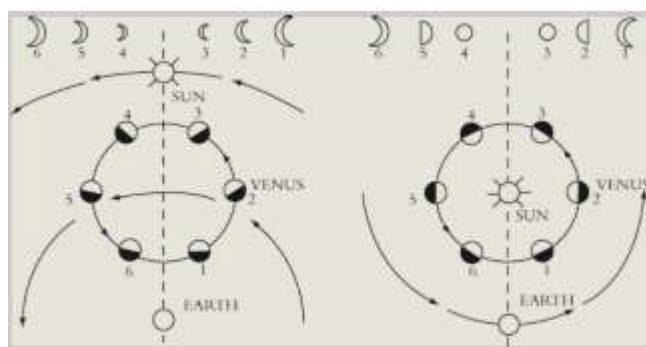


Figura 58 – Fases de Vênus explicada de modo satisfatório pelo sistema copernicano, mas não pelo sistema ptolomaico. Fonte: Harper, 2011, p. 58.

Conforme assevera Harper, essa última observação de Galileu provia a primeira evidência observacional direta contra o sistema geocêntrico ptolomaico. Não obstante, não descartava a hipótese do sistema geo-helicêntrico de Brahe. Como vimos, nesse sistema os planetas giravam em torno do Sol, mas o Sol girava em torno da Terra. Depois que as observações das fases de Vênus foram confirmadas pelos jesuítas do Colégio Romano, o sistema tychonico se tornou dominante entre astrônomos defensores de uma cosmologia geocêntrica.³⁵⁸ Galileu, por sua vez, se posicionou firmemente ao lado do sistema copernicano, como é amplamente sabido, embora tenha escrito a sua célebre obra *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo copernicano e ptolomaico*, numa forma de aparente neutralidade.

As descobertas astronômicas continuaram a ocorrer com grande velocidade com o aperfeiçoamento do telescópio. O matemático holandês Christiaan Huygens (1629-1695 d.C.) inventou um telescópio que usava lentes de longas distâncias focais para obter imagens mais nítidas dos astros.

³⁵⁸ Harper, 2011, p.14.

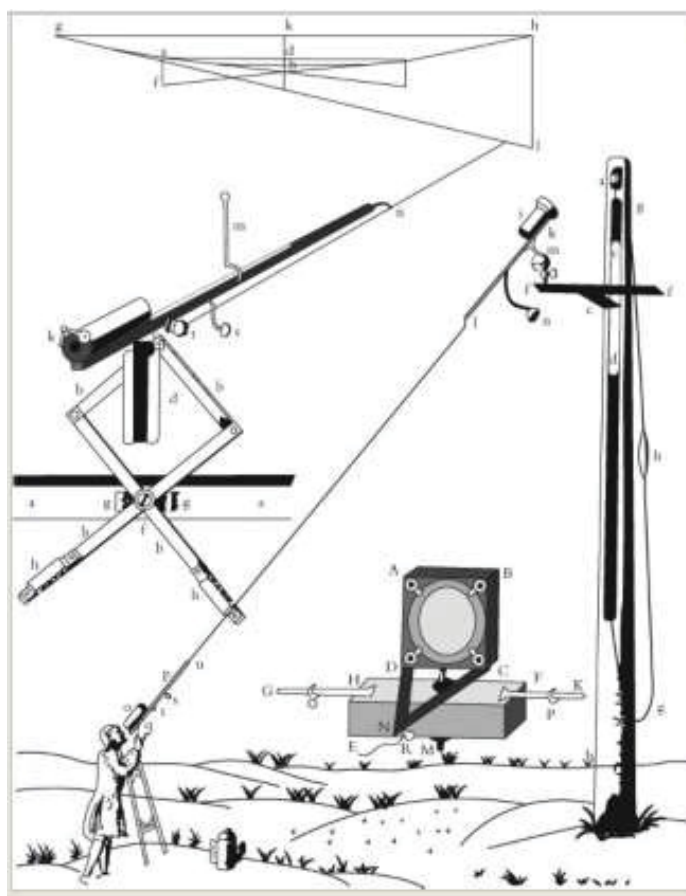


Figura 59 – Telescópio de 123 pés de Huygens
Fonte: Harper, 2011, p. 20.

Com o auxílio de um telescópio de 123 pés de distância focal (aproximadamente 40 metros), Huygens obteve informações mais precisas sobre os satélites de Júpiter e Saturno, além de descobrir uma nova lua de Saturno (Titã). Mais à frente veremos que o telescópio de 123 pés de Huygens teve um papel importante na obtenção de vários dados astronômicos mobilizados por Newton no Livro III dos *Principia*. O grande avanço na astronomia impulsionado pelo uso do telescópio acelerou ainda mais o enfraquecimento de uma astronomia puramente instrumental, que não se preocupava com a realidade dos sistemas que propunha. No auge da revolução científica, principalmente na segunda metade do séc. XVII, os campos da cosmologia e astronomia dificilmente se distinguiram. E não apenas estes. As fronteiras entre a matemática, a filosofia natural, as artes mecânicas, entre outros campos, também não mais se discerniam com clareza. Em suma, as divisões aristotélicas do conhecimento que vigoraram durante tantos séculos já eram praticamente ignoradas por muitos renomados pensadores. É nesse contexto de ruptura com a filosofia aristotélica que a

investigação das causas físicas dos movimentos planetários se tornou uma das principais questões entre os matemáticos e astrônomos.

8.1.3 Causas físicas dos movimentos planetários

Como destacamos mais atrás, no sistema cosmológico aristotélico os movimentos circulares dos planetas eram explicados por meio de argumentos metafísicos. No mundo supralunar, preenchido pelo éter, as coisas eram incorruptíveis, e os fenômenos, perfeitos e imutáveis. O movimento dos planetas junto às esferas celestes era circular e eterno. Apesar de Copérnico contribuir em grande parte para a demolição do edifício aristotélico, ele manteve uma explicação metafísica para o movimento dos planetas, sustentando a ideia da naturalidade dos seus movimentos circulares. Galileu, embora prescindindo de muitas explicações metafísicas dos seus antecessores, também não rompeu com a ideia do movimento circular natural dos planetas, não se tornando, dessa forma, a explicação desses movimentos uma questão fundamental para ele. Com Kepler, todavia, a situação foi diferente. Ao admitir que as órbitas planetárias eram elípticas, em vez de circulares, a questão sobre a causa dos movimentos planetários se tornou, para ele, uma questão fundamental. Em *Astronomia Nova*, ele aderiu à hipótese do filósofo natural inglês William Gilbert, que haveria algum tipo de poder magnético irradiando do Sol, que diminuía com a distância, e que seria responsável pelo movimento dos planetas em torno desse astro, bem como pelas variações nas velocidades desses planetas ao longo da trajetória.³⁵⁹ As explicações de Kepler, todavia, chamam a atenção por serem permeadas por especulações teológicas e metafísicas.

Mas a hipótese para a causa dos movimentos planetários que sem dúvida se tornou a mais popular durante o séc. XVII foi a hipótese do filósofo francês Rene Descartes (1596-1650 d.C.). Como já foi informado em outros pontos desse trabalho, nos *Principios de Filosofia*, Descartes formulou uma hipótese para a explicação do movimento dos planetas que envolvia a admissão de uma matéria fluida permeando o universo. Diferente de Copérnico e Galileu, o filósofo francês rejeitou a ideia do movimento circular natural. Para ele o movimento natural era em linha reta e, portanto, requeria-se uma explicação para o movimento circular. Além disso, pelos pressupostos da sua filosofia mecânica, todos os fenômenos da natureza deveriam ser explicados exclusivamente pelo choque de matéria ou, em outras palavras, pelo *contato*. Desse modo, Descartes concluiu que deveria haver uma

³⁵⁹ Veja *De Magnete* de William Gilbert (1600).

matéria invisível que se chocava com os planetas fazendo-os alterar as suas trajetórias retilíneas continuamente. Essa matéria seria algum tipo de fluido em movimento que revolucionaria em razão do surgimento de vórtices no lugar onde se encontravam os planetas e o Sol.

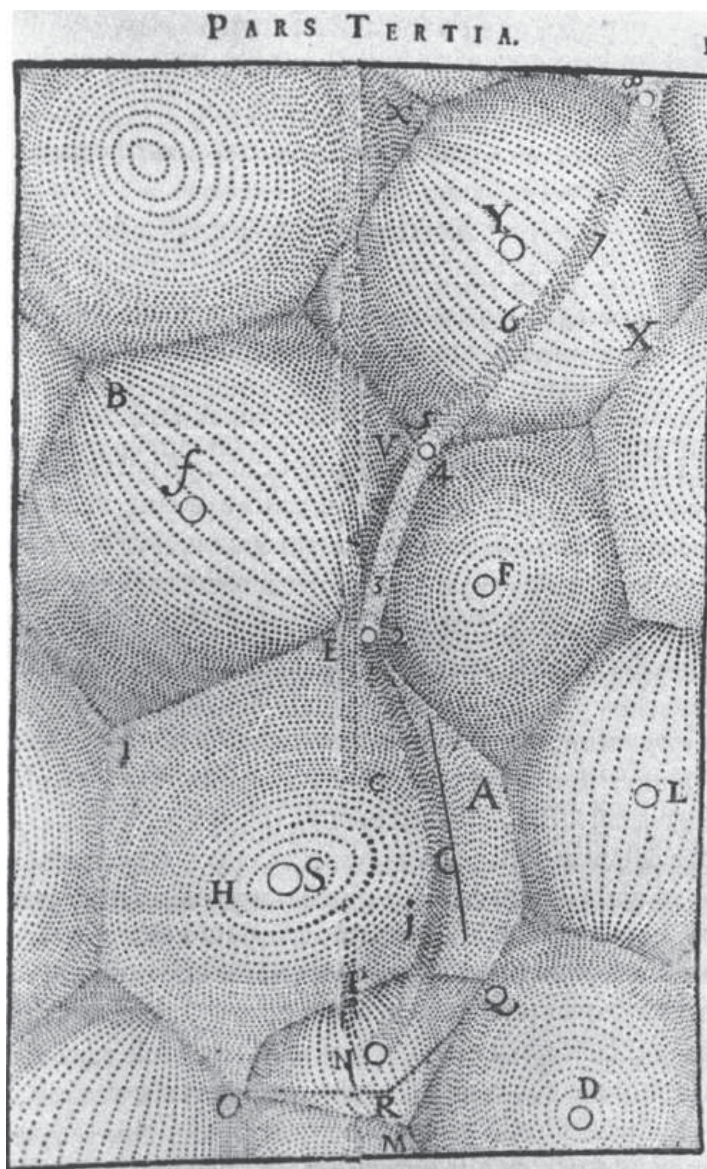


Figura 60 – Modelo dos Vórtices de Descartes.
Fonte: Descartes, Princípios de Filosofia.

O modelo de Descartes se distingue dos demais modelos citados anteriormente pelo fato de apresentar uma pretensão semelhante aos modelos cosmológicos antigos, qual seja, explicar a totalidade da realidade. O leitor deve notar que Descartes não era um astrônomo, tampouco se interessou em oferecer um simples modelo do céu. Seu objetivo era muito mais ambicioso. Ele ofereceu um modelo que mobilizava, à exemplo da cosmologia aristotélica, informações e princípios tanto da astronomia e da física terrestre, quanto da metafísica,

embora todos atualizados. Assim, Descartes procurou explicar não apenas o movimento dos planetas, mas a gravidade terrestre e até o magnetismo. Em particular, para o filósofo francês tanto a queda dos corpos graves quanto o movimento planetário era explicado com recurso à matéria vorticial. O magnetismo também se explicava pelo movimento de uma matéria sutil e invisível. De qualquer modo, o que me interessa aqui dizer é que, embora Descartes não estivesse preocupado apenas como a elaboração de um modelo do céu, para construir a sua cosmologia ele admitiu a hipótese copérnicana como base para as suas elaborações.³⁶⁰ O Sol se encontra no centro do universo e a causa dos movimentos dos planetas é o choque da matéria vorticial em movimento que preenche o espaço interplanetário.

É evidente que a hipótese cartesiana, embora popular, não era a única que se apresentava como uma opção para a explicação dos movimentos planetários. Hipóteses semelhantes à proposta de Kepler, de algum tipo de atração, também eram aventadas por vários astrônomos e filósofos naturais. Conforme vimos na seção 7.1, Borelli e Hooke consideraram uma hipótese de atração magnética do Sol como possível causa para os movimentos dos planetas, adequando essa hipótese aos critérios da filosofia experimental e expurgando as especulações teológicas e metafísicas de Kepler. O leitor deve lembrar que à essa época o poder magnético ainda era pouco compreendido e, por essa razão, as referências à atração magnética apenas transferiam as explicações para um outro domínio, que requeria a causa do próprio magnetismo. Descartes explicou esse domínio, como vimos, recorrendo à própria matéria vorticial. Hooke tentou formular uma teoria vibratória, que também procurava se adequar aos tipos de explicação aceitos pela filosofia mecânica. No entanto, tanto a hipótese de Descartes quanto aquelas de Hooke pareciam concordar que havia uma ligação entre a causa do movimento dos planetas e a causa da queda dos corpos na superfície da Terra.³⁶¹

Portanto, muitas questões permaneciam abertas na segunda metade do séc. XVII. Qual dos dois principais modelos astronômicos era o correto: o geocêntrico ou o heliocêntrico? Quais seriam as verdadeiras trajetórias dos movimentos planetários? Uma vez que já era consenso que o movimento circular não era natural, e que com grande probabilidade os movimentos de vários planetas sequer seriam circulares, qual seria a verdadeira causa física dos movimentos planetários? E qual seria a relação entre a queda dos corpos na superfície da Terra e o movimento dos planetas, se é que havia alguma? É no contexto desses problemas

³⁶⁰ Descartes fez isso no seu tratado *Le Monde*, publicado postumamente. O filósofo desistiu da publicação após tomar conhecimento da condenação de Galileu. Descartes, 2008.

³⁶¹ Também Huygens sugeriu uma relação entre as duas coisas no *Horologium*.

que os *Principia* de Newton foi formulado. E por isso desde o prefácio Newton alerta ao leitor que o seu objetivo é investigar as causas dos movimentos e, em especial, a causa dos movimentos planetários. Conforme afirma Harper, o Livro III dos *Principia* é a concretização do projeto de Kepler de usar as causas físicas dos movimentos dos planetas para decidir entre os dois máximos sistemas do mundo. Isso foi feito, no entanto, não apenas com a dissolução da fronteira entre a astronomia e a cosmologia, ou a filosofia natural; mas com a fusão de um outro tipo de abordagem de estudo da natureza que ganhou muita força na modernidade: a “filosofia experimental”. A notável fusão entre a matemática e a astronomia com a filosofia experimental foi que efetivamente tornou possível concretizar o projeto de Kepler e Newton. Ao longo dessa *Parte 3* veremos de que maneira, precisamente, esses elementos se conjugaram de modo a fornecer a solução para uma das maiores questões científicas da história da ciência: a determinação da causa física dos movimentos planetários e a consequente determinação do verdadeiro sistema do mundo.

8.2 O MÉTODO AXIOMÁTICO NA FILOSOFIA NATURAL

No texto de abertura do Livro III, Newton alertou o leitor que apresentaria os conteúdos do Livro III “à maneira matemática”, ou seja, seguindo a mesma estrutura do método axiomático que utilizou nos Livros I e II. No capítulo 4 foram apresentadas algumas informações históricas desse método, bem como algumas de suas características gerais. Interessa-nos, agora, algumas notícias sobre a sua utilização nas ciências da natureza e na filosofia natural.

Conforme já foi mencionado anteriormente, para Aristóteles a matemática e a filosofia natural eram dois campos distintos e, portanto, esse último campo estava excluído do domínio das “ciências demonstrativas”. Mas desde a antiguidade esse entendimento aristotélico estava longe de ser unanimidade. Platonistas e pitagóricos, por exemplo, não enxergavam uma separação tão nítida entre o estudo da natureza e a geometria. Para eles a filosofia natural também era matéria de uma ciência demonstrativa. Além disso, durante a idade média e moderna, o método axiomático acabou se tornando um modelo de rigor, passando a ser empregado amplamente mesmo fora da esfera da matemática. Ainda assim, o paradigma terminológico desse método continuou sendo o *Segundos Analíticos* do filósofo grego. No que se refere à investigação do mundo natural, a descrição do método axiomático feita por Aristóteles se aplicava ao menos para as *ciências da natureza*, ou melhor dizendo, para as

matemáticas mistas, e nesse contexto os “primeiros princípios” do sistema axiomático frequentemente recebiam a denominação de “hipóteses”.

Como vimos, nos *Segundos Analíticos* Aristóteles classificou os primeiros princípios de uma ciência demonstrativa em “axiomas”, “hipóteses” e “postulados”. Os axiomas eram princípios necessários, indemonstráveis, autoevidentes, e comum a todas as ciências. As hipóteses e os postulados eram princípios que poderiam ser demonstráveis ou indemonstráveis, e que não possuíam o estatuto de necessidade, sendo, portanto, apenas *assumidos* como verdadeiros no ponto de partida. A diferença entre os *postulados* e a *hipóteses* estaria na concordância entre o mestre e o aprendiz. Todavia recordo o leitor que também essa caracterização de Aristóteles estava muito distante de um consenso geral. Assim, para os nossos propósitos, mais importante do que se perguntar acerca de como Aristóteles entendia esses princípios, é se perguntar acerca de como Newton os entendia. Embora o matemático inglês não tenha demonstrado grande interesse em discutir a natureza desses princípios ao longo da sua carreira, é possível ao menos arriscar um esboço das suas concepções a partir dos pronunciamentos de Isaac Barrow sobre esse assunto. O mentor de Newton em Cambridge produziu uma série de preleções exclusivamente sobre a estrutura do discurso matemático, que, ao que tudo indica, foram atendidas pelo jovem Newton no seu período de formação. É evidente que nada garante que ele tenha seguido a mesma orientação do seu professor, mas como o leitor perceberá há uma significativa congruência entre algumas observações de Barrow e a organização axiomática dos *Principia*.

Nas aulas 7 e 8 das suas preleções sobre a “utilidade do aprendizado da matemática”, Barrow discorreu sobre a natureza do “discurso matemático”, ou, sobre “o modo matemático de argumentar”³⁶². Nessas preleções Barrow não apenas resumiu a doutrina de Aristóteles sobre a natureza e divisões dos primeiros princípios, pontuando-a com as considerações de vários comentadores clássicos, como apresentou a sua própria leitura do texto aristotélico, seguida de várias revisões e interpretações pessoais. Será proveitoso, nesse momento, fazer algumas observações sobre as aulas de Barrow acerca dos primeiros princípios para, depois, compará-las com a estrutura axiomática dos *Principia*.

A primeira observação que convém ser feita acerca das aulas de Barrow é a respeito da sua concepção de *axiomas*. Ele tinha uma concepção de *axioma* muito mais flexível que o filósofo grego, e não considerava esse princípio obrigatoriamente indemonstrável e autoevidente. Barrow afirmou que, uma vez que Aristóteles “pareceu um pouco obscuro, e

³⁶² *Usefulness*, p.102.

quase inconsistente consigo mesmo nesse assunto”, ele não iria seguir integralmente a sua opinião. Ele defendeu que pouquíssimos eram os casos de axiomas realmente indemonstráveis e comuns a todas as ciências. Sob a classificação de Aristóteles, o axioma geométrico *a soma dos três ângulos de um triângulo é igual a dois ângulos retos*, ou outro ainda mais elementar, como *dois pontos definem uma reta*, por exemplo, não poderiam ser considerados axiomas, uma vez que não seriam absolutamente indemonstráveis, admitindo demonstração numa ciência superior tal como a metafísica. Princípios realmente indemonstráveis seriam extremamente raros. *O todo é maior do que a parte*, ou, *proposições contraditórias não podem ser, ambas, verdadeiras ou falsas*³⁶³ seriam alguns possíveis candidatos. Para Barrow, os axiomas seriam verdades necessárias que, eventualmente, poderiam ser imediatas e indemonstráveis, mas que, na maioria das vezes, não o eram, podendo ser demonstrados a partir de uma ciência mais geral, ou a partir de princípios mais amplos (ou mais simples). A única restrição que seria imposta a esses princípios é que não deveriam ser demonstráveis *no interior da própria ciência* que se constituem como princípios. No caso específico de Newton nos *Principia*, as “leis do movimento”, evidentemente, não figurariam como *axiomas* no sentido aristotélico, mas o poderiam no sentido mais aberto de Barrow. É certo que elas não podem assumir o papel de princípios indemonstráveis, autoevidentes e necessários, mas tomadas como princípios da geometria mecânica elas satisfariam facilmente os critérios do matemático londrino.

A segunda observação que convém destacar das aulas de Barrow se refere às diferenças práticas que ele percebe entre “axiomas”, “hipóteses” e “postulados”. Para Barrow, do ponto de vista prático, as diferenças entre axiomas, hipóteses e postulados simplesmente não são muito significativas. Os primeiros princípios da geometria de Euclides foram chamados de “postulados”. Os primeiros princípios da sua óptica foram chamados de “hipóteses”. Arquimedes aplicou “de maneira um tanto promíscua” os termos “postulado” e “axioma”, transparecendo que o primeiro era usado quando os princípios eram considerados de uma maneira mais precária³⁶⁴. E o próprio Aristóteles admitiu – ressaltou Barrow – que, de maneira geral, um “princípio” não passa de tudo aquilo que permite que dele se retirem conclusões.³⁶⁵ Desse modo, Barrow não considerava a distinção entre “axiomas”, “postulados” e “hipóteses” tão significativa, do ponto de vista prático. “Os outros dois tipos

³⁶³ Ibid, p.103.

³⁶⁴ Ibid, p.125.

³⁶⁵ Ibid, p.106.

de princípios”, advertiu ele referindo-se às hipóteses e postulados, “eu penso não diferirem em nada dos axiomas”.³⁶⁶

A terceira observação sobre as aulas de Barrow se refere à sua compreensão da aplicação do termo “hipótese”. Para ele, a qualificação dos primeiros princípios como “hipóteses” era mais apropriada e comumente empregada em enunciados derivados da experiência. Em outras palavras, o termo “hipótese” era frequentemente utilizado para os enunciados de princípios não-necessários relacionados à experiência. Na conclusão da sua aula 8, sobre a natureza e divisão dos primeiros princípios, ele afirma que “qualquer ação, movimento, ou modo do ser que seja sujeito a observação, ou possa ser apreendido pela experiência, é objeto de *hipóteses*”.³⁶⁷ E nessa passagem ele só resume o que já havia mostrado ao longo das aulas 7 e 8. No fim da aula 7 ele já havia se referido à lei da queda dos corpos de Galileu sob a designação de “hipótese”. Da mesma maneira, com os enunciados derivados das ciências dos poderes mecânicos e da astronomia.³⁶⁸ Na aula 8, ele citou como exemplo de *hipóteses* um enunciado semelhante à “lei da inércia” e as descrições dos movimentos planetários de Kepler (hoje, primeira e segunda leis de Kepler).³⁶⁹ Lembrou, ainda, dos princípios da óptica de Euclides, que foram igualmente chamados de “hipóteses”. Assim, embora Barrow tivesse defendido que não haviam diferenças práticas muitos significativas entre os tipos de princípios, ele reconheceu que a qualificação de “hipótese” era a terminologia normalmente empregada para os primeiros princípios de ciências matemáticas que se relacionavam de alguma forma com a natureza.

O uso corrente do termo “hipótese” para enunciados relacionados à experiência também se confirma entre a prática dos matemáticos e filósofos naturais nos séc. XVI e XVII. Huygens, por exemplo, em *De motu corporum ex percussione* (“Sobre o movimento dos corpos em colisões”), produzido provavelmente na década de 1670, mas publicado postumamente em 1703, abre o seu estudo com duas “hipóteses” (Hipótese I e II), dentre as quais uma delas é a conhecida “lei da inércia”.

Hipótese I: Qualquer corpo em movimento continuará a se mover perpetuamente com a mesma velocidade e numa linha reta a não ser que seja impedido³⁷⁰

³⁶⁶ Ibid, p.122.

³⁶⁷ Ibid, p.134.

³⁶⁸ Ibid, p.110-111.

³⁶⁹ Ibid, p.128.

³⁷⁰ Huygens, 1974.

E também no aclamado *Horologium Oscillatorium* Huygens utilizou a terminologia de “hipóteses” para referir-se aos seus princípios derivados da experiência. Ele apresentou três hipóteses na segunda parte do seu tratado.

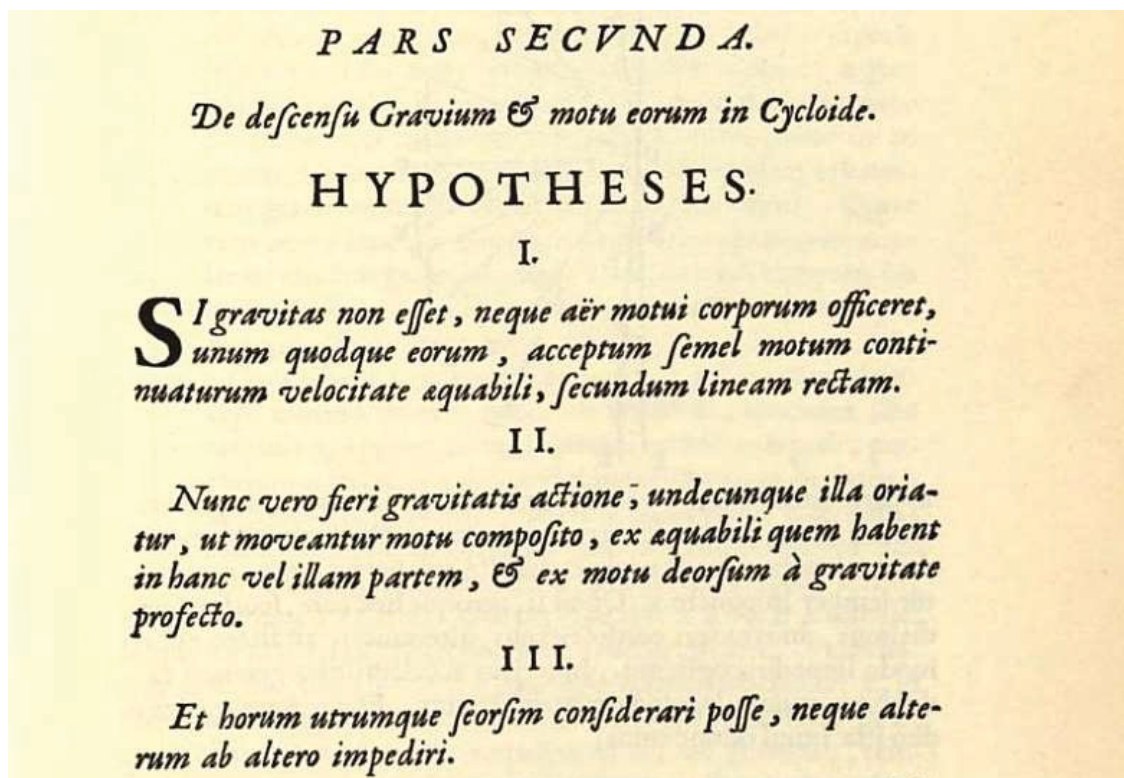


Figura 61 – Segunda Parte do *Horologium* de Huygens na publicação original em latim.
Fonte: *Horologium*, 1673.

Como se pode perceber pela figura, a hipótese I do *Horologium* também é uma das versões da “lei da inércia”. Uma tradução livre seria: “Desconsiderando os efeitos da gravidade e do ar, os corpos movem-se com velocidade constante e em linha reta”. A prática de Huygens, portanto, concorda com as observações de Barrow. Na estrutura do sistema axiomático de uma matemática mista, um princípio que se constitui num enunciado relacionado com a experiência é referido como uma “hipótese”.

Aparentemente, nas primeiras duas versões do tratado *De Motu* – o precursor dos *Principia* – Newton seguiu precisamente a mesma orientação de Barrow e Huygens. Ele introduziu o tratado com um conjunto de definições e quatro “hipóteses”, duas delas correspondente às duas primeiras leis do movimento.³⁷¹ E embora ele tenha alterado essa designação na terceira versão do *De Motu* para “leis”, e nos *Principia* para “leis ou axiomas”,

³⁷¹ Veja Herivel, 1965.

ainda assim o Livro III da sua obra magna abre com um novo conjunto de princípios intitulados “hipóteses”.

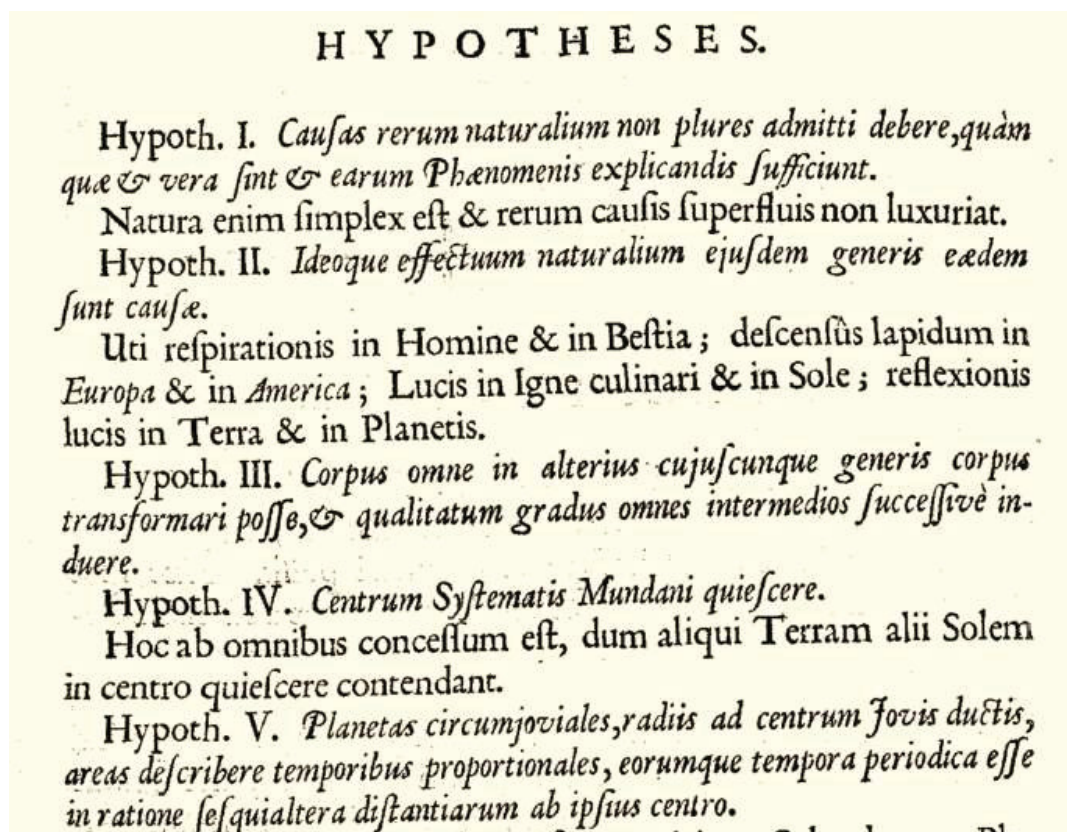


Figura 62 – Hipóteses do Livro III dos *Principia* na primeira edição em latim.

Fonte: *Principia*.

Com exceção das duas primeiras hipóteses, todas as demais são princípios relacionados com a experiência. Como se mostrará na próxima seção, a maior parte dessas hipóteses se referem à descrição matemática dos movimentos planetários tal como propostas por Kepler.³⁷² Portanto, ao que tudo indica, Newton adotou – pelo menos inicialmente – a terminologia ensinada por Barrow em suas preleções, aplicando a qualificação de “hipóteses” para os primeiros princípios relacionados a enunciados derivados da experiência.

A quarta e última observação acerca das preleções de Barrow é sobre a relatividade dos “princípios” e “conclusões”. Para o matemático londrino, assim como também provavelmente para Newton, os “princípios”, sejam *axiomas*, *hipóteses* ou *postulados*, e os “teoremas” (ou quaisquer outras conclusões derivadas dos princípios) são quase sempre relativos ao contexto. Um *axioma* numa ciência particular pode ser um *teorema* numa “ciência superior”. E um *teorema* numa ciência em especial pode se tornar um *axioma* em

³⁷² As duas hipóteses restantes têm um papel de apoio que será comentado mais adiante.

outra ciência “subordinada”. “Porque o que quer que seja demonstrado”, afirma Barrow, “é um teorema; mas um teorema que não é provado numa ciência particular, mas é tomado de alguma ciência superior, obtém o estatuto de axioma nessa ciência”.³⁷³ Da mesma forma, uma *hipótese* numa ciência pode ser considerada um *axioma* em outra.

Essa última observação é pertinente para a compreensão dos *Principia* porque Newton mobiliza várias ciências particulares em diversos contextos no seu tratado. Interpretando os *Principia* estritamente sob a ótica da tradição terminológica dos *Segundos Analíticos*, seria possível dizer que no Livro I Newton apresentou uma ciência matemática (uma geometria mecânica) cujos axiomas foram demonstrados em outra ciência particular, anterior a essa, mas que não figurou no corpo do tratado, a não ser fornecendo os seus princípios. Essa ciência seria uma *ciência mista* que investiga as forças e os movimentos em geral na natureza (nas colisões e atrações)³⁷⁴. Além disso, essa ciência retiraria os seus princípios da experiência, e por isso mesmo, no jargão aristotélico, esses princípios seriam naturalmente nomeados de “hipóteses”. Todavia, essas “hipóteses”, no contexto do Livro I, seriam consideradas por Newton, em outro contexto, como axiomas de uma geometria mecânica que, como sabemos, foi construída propositamente em analogia com a natureza. Já no Livro III, Newton estaria considerando outra ciência mista: a astronomia. E, novamente, os princípios dessa ciência seriam também chamados de “hipóteses”. Porém, para proceder as deduções que levariam ao novo princípio da gravitação universal, Newton usaria os princípios dessa ciência da astronomia em associação com os princípios e teoremas de uma “ciência superior”, a saber, a ciência mista das forças e movimentos da natureza, cujos teoremas foram desenvolvidos separadamente no Livro I. Mas nesse último caso essas leis do movimento voltariam ao seu estatuto original de “hipóteses”, pois teriam retornado ao domínio do discurso sobre a natureza. Desse ponto de vista, caso Newton fosse apresentar os princípios do Livro III estritamente segunda a terminologia tradicional aristotélica, uma possível representação simplificada seria:

Princípios do Livro III: Hipóteses.

1. Definições do Livro I
2. Leis do movimento
3. Teoremas e corolários deduzidos a partir das leis do movimento

³⁷³ *Usefulness*, p.122. Veja também p.130.

³⁷⁴ No capítulo 5 chamei essa ciência mista de “mecânica racional das colisões”, em contraste com a mecânica racional das máquinas simples dos antigos.

4. Descrições matemáticas de Kepler para o movimento dos planetas

5. Princípios de apoio.³⁷⁵

E todos esses princípios deveriam ser nomeados por “hipóteses”.

Mas não é difícil perceber a essa altura que essas questões terminológicas eram de menor relevância tanto para Barrow quanto para Newton. E ainda uma menor relevância era esperada para Newton. Como vimos no capítulo 3, sob a ótica da *mechanicae universalis* tanto a geometria quanto a natureza são construídas a partir dos mesmos princípios mecânicos, e portanto qualquer distinção entre os princípios desses dois campos seria artificial. Pouco importava, então, essas distinções de termos usados para princípios derivados das investigações da natureza ou da geometria. Uma evidência clara da pequena preocupação de Newton com os termos empregados para designar os primeiros princípios do seu sistema axiomático é a alteração do título “hipóteses” da abertura do Livro III na primeira edição dos *Principia*, para duas outras seções intituladas “Regulae Philosophandi” (Regras para Filosofar) e “Phaenomena” (Fenômenos), na segunda edição.

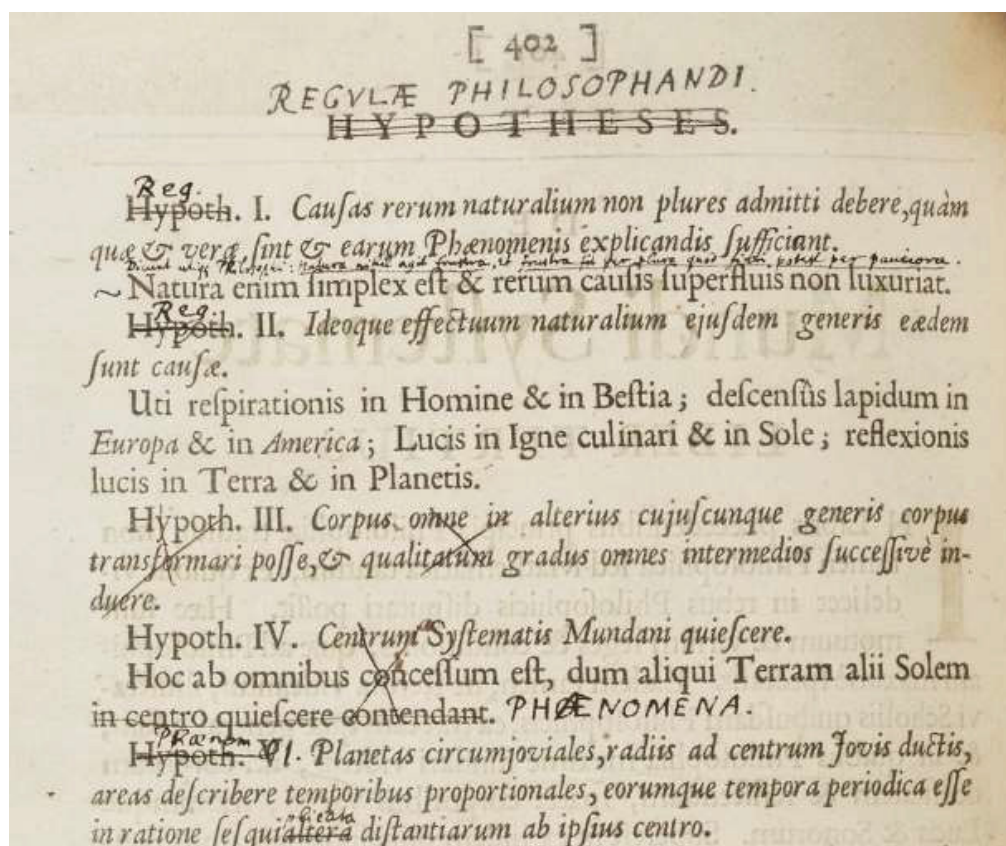


Figura 63 – Anotações de Newton na sua primeira edição particular dos *Principia* visando as alterações para a segunda edição.

³⁷⁵ Trata-se das regras para filosofar que serão discutidas apenas mais adiante.

Na primeira edição dos *Principia*, o Livro III se iniciava com a apresentação de nove “Hipóteses”. Nas edições seguintes as duas primeiras hipóteses se transformaram nas Regras 1 e 2, a Hipótese 2 foi excluída, duas novas regras foram acrescentadas, uma das hipóteses permaneceu com essa mesma designação, e as cinco últimas hipóteses se transformaram em seis “Fenômenos”. Cohen apresenta uma tabela bastante útil para ter uma panorama das mudanças ocorridas nas três edições.

Tabela 1 – Alterações das Hipóteses e Regras nas três edições dos *Principia*

<i>Primeira Edição</i>	<i>Segunda Edição</i>	<i>Terceira Edição</i>
Hipótese 1	Regra 1	Regra 1
Hipótese 2	Regra 2	Regra 2
Hipótese 3	----	----
----	Regra 3	Regra 3
----	----	Regra 4
Hipótese 4	Hipótese 1*	Hipótese 1*
Hipótese 5	Fenômeno 1	Fenômeno 1
----	Fenômeno 2	Fenômeno 2
Hipótese 6	Fenômeno 3	Fenômeno 3
Hipótese 7	Fenômeno 4	Fenômeno 4
Hipótese 8	Fenômeno 5	Fenômeno 5
Hipótese 9	Fenômeno 6	Fenômeno 6

Fonte: Cohen, 1999, nota ‘aa’, p.794

Como afirmam vários comentadores, para evitar algumas polêmicas que surgiram da polissemia do termo “hipótese” no séc. XVII, Newton terminou abandonando definitivamente a termonologia aristotélica nesse particular.

Essas observações finais revelam que assim como Barrow, Newton considerava os termos utilizados para designar os primeiros princípios de uma ciência bastante relativos e variando com o contexto de aplicação. O mais importante no método axiomático não seriam os termos empregados para designar as proposições, mas o rigor do próprio método, bem como a solidez dos princípios no qual se fundamenta. No próximo capítulo iniciarei a apresentação dos “princípios” do Livro III, tal como Newton os designou a partir da segunda

edição dos *Principia*. Tratam-se dos princípios distinguidos por Newton sob os títulos de “Regras para Filosofar” (*Regulae Philosophandi*) e “Fenomenos” (*Phenomena*). Para a compreensão futura do método de Newton nesse trabalho será útil não perder de vista que ambas as categorias de proposições fazem parte do quadro único de “princípios” do Livro III, quadro que já estava sinalizado na primeira edição.

9 PRINCÍPIOS DO LIVRO III

9.1 REGRAS PARA FILOSOFAR

Entre os comentadores de Newton muito tem se discutido acerca do papel das *Regulae* no seu projeto.³⁷⁶ Alguns se perguntam se elas seriam princípios epistemológicos, ou metodológicos, ou metafísicos, ou até mesmo uma mistura dessas várias classes de preceitos. Ao longo do estudo do Livro III pretendo mostrar – mais pelo uso concreto das regras no argumento da gravitação do que propriamente por essa discussão em separado – que as *Regulae* de Newton têm sido um tanto superestimadas. Ao meu ver, o principal objetivo dessas regras seria mais modesto do que algumas vezes tem se argumentado. Basicamente, seria satisfazer um requisito formal do sistema axiomático. Elas seriam facilmente dispensáveis caso o tratado não fosse escrito dessa maneira particular. Com efeito, acredito que o papel dessas regras nos *Principia* é semelhante ao papel das “definições” ou, ainda, das “opiniões comuns” em qualquer outro sistema axiomático.³⁷⁷ Fundamentalmente, as regras seriam princípios elementares e até certo ponto consensuais acerca de como o conhecimento é construído a partir da experiência. Isso é importante. Apesar da enunciação em forma de preceitos, Newton não estaria falando sobre como o conhecimento *deve ser* construído, mas sim como o conhecimento *é* construído. Em outras palavras, não como *devemos* raciocinar, mas como de fato raciocinamos.

Na terceira edição dos *Principia*, Newton apresentou quatro regras. Como já foi dito, as duas primeiras regras já estavam presentes na primeira edição de 1687 sob a designação de “hipóteses”. A terceira regra surgiu somente 26 anos depois, na segunda edição de 1713, e a quarta regra 39 anos depois, na terceira edição de 1726. Essas demarcações de tempo possuem certa importância aqui porque servirão para reforçar a posição de que as duas últimas regras correspondem mais a um amadurecimento do pensamento de Newton – e uma explicitação gradativa dos seus pressupostos – do que significativos acréscimos de informações ao conteúdo das primeiras. Para sublinhar ainda mais esse lapso temporal entre as duas primeiras e as duas últimas regras apresentarei nessa seção apenas as duas primeiras regras, adiando a exposição das demais para a ocasião em que forem requisitadas, e especialmente no capítulo 12, onde receberão uma análise completa. Uma discussão mais

³⁷⁶ Por exemplo, Koyre, 1965; I. B. Cohen, 1966, 1999; Mamiani, 2001; Ducheyne, 2012, 2013; Maxwell, 2014; para citar apenas alguns.

³⁷⁷ Elas surgiriam apenas da necessidade de explicitar todos os passos do raciocínio numa forma dedutiva, num sistema axiomático. (Mesmo aqueles raciocínios que de outro modo pareceriam triviais).

elaborada e conclusiva sobre as regras, portanto, ficará pendente até aquele capítulo. Por ora, essa apresentação terá um caráter mais introdutório, o suficiente para acompanhar o argumento da gravitação universal.

9.1.1 Regras 1 e 2: sobre as causas das coisas naturais

As duas primeiras regras podem ser entendidas como um único preceito acerca das “causas das coisas naturais”. Vejamos, primeiramente, essas regras em seu conjunto:

Regra 1

Não se deve admitir mais causas para as coisas naturais além daquela que seja, ao mesmo tempo, verdadeira e suficiente para explicar os seus fenômenos. Como dizem os filósofos: a Natureza nada faz em vão, e mais será vão quando menos é suficiente. Porque a natureza é simples, e não ostenta o excesso de causas superfluas.

Regra 2

Portanto, aos efeitos naturais da mesma espécie se deve atribuir, tanto quanto possível, as mesmas causas. Como no caso da respiração no homem e nos animais; na queda das pedras na Europa e na América; na luz do fogo culinário e do Sol; na reflexão da Lua na Terra e nos planetas.³⁷⁸

Como se pode perceber das citações acima, as duas primeiras regras fazem parte de um todo coeso. Porém, comecemos a nossa discussão comentando cada regra em separado. Há uma diferença significativa entre as traduções do Mote-Cajori e do Cohen nessa regra. Afirma o texto da tradução do Mote-Cajori:

We are to admit no more causes of natural things than such as are both true and sufficient to explain their appearances (Não devemos admitir mais causas das coisas naturais além daquelas que sejam, ao mesmo tempo, verdadeiras e suficientes para explicar as suas aparências).³⁷⁹

Na tradução do Cohen, lemos:

No more causes of natural things should be admitted than are both true and sufficient to explain their phenomena (Nenhuma causa das coisas naturais deve ser admitida além daquela que seja, ao mesmo tempo, verdadeira e suficiente para explicar os seus fenômenos).³⁸⁰

³⁷⁸ *Principia*, tradução diretamente do latim (3ed). Regulae 1: “Causas rerum naturalium non plures admitti i debere, quam qua & vera sint & earum phaenomenis explicandis sufficient.” Regulae 2: “Ideoque effectuum naturalium ejusdem generis eadem assignandae sunt casae quatenus fieri potest.”

³⁷⁹ MC, p.398.

³⁸⁰ CW, p.794.

Aparentemente Cohen procura evitar um eventual mal entendido na tradução que o antecedeu. O sentido não seria que se deve buscar o mínimo possível de causas para um fenômeno, como a tradução do Mote-Cajori pode dar a entender, mas que somente *uma única* causa deve ser aceita para um fenômeno, o que reduziria drasticamente o número de causas para a totalidade dos fenômenos. Em outras palavras, não devemos admitir mais do que uma causa verdadeira e suficiente para os fenômenos. Talvez possa facilitar a compreensão reescrever a regra na tradução do Mote-Cajori na forma de uma afirmação positiva: *Apenas devemos admitir causas para as coisas naturais que sejam, ao mesmo tempo, verdadeiras e suficientes para explicar as suas aparências*. Ou indo direto ao ponto: só devemos admitir causas *suficientes*.

Ao que parece, com “suficiente” Newton quer dizer o usual, que a causa, por si só, sem a necessidade de qualquer outro recurso, deve ser capaz de explicar o fenômeno. E se não explica de maneira “suficiente”, então não deve ser admitida. Se essa “causa” não elimina a necessidade de admissão concorrente de outras causas, então significa que não estamos lidando com a causa do fenômeno. Não é difícil perceber esse fato em alguns exemplos cotidianos. Se uma pessoa que percebe a presença do fogo, calor e fumaça, ao mesmo tempo, supõe que a causa da fumaça é o calor – o que seria razoável – e numa situação seguinte presencia a ocorrência de fumaça sem calor, ela não irá supor que a causa da fumaça é o calor em conjunção com alguma outra causa ainda desconhecida, por exemplo, a luz. Ninguém pensa dessa maneira. Raciocinamos de modo a imaginar uma única causa. Se não é o calor, então é outra coisa. *A causa da fumaça é o fogo*, alguém poderia corrigir. Se há fogo, então há fumaça. E se eventualmente constatamos que há fumaça sem fogo, imediatamente deixamos de acreditar que o fogo é a verdadeira causa fumaça, passando a procurar um evento mais elementar que possa assumir esse papel. Parece-me que a primeira regra de Newton não pretende apresentar nada além de uma formalização (em palavras) da maneira natural por meio da qual é construído o conhecimento cotidiano que retiramos da experiência. A primeira regra de Newton – portanto – poderia ser parafraseada da seguinte forma: *deve-se admitir apenas uma – e uma única – causa para um fenômeno. E essa causa deve ser verdadeira e suficiente para explicá-lo*.

Já percebemos que duas coisas são afirmadas nessa regra: (1) Deve-se admitir que haja somente uma causa para um fenômeno; (2) Dois elementos devem ser considerados na avaliação de uma possível causa de um fenômeno: essa causa deve ser (i) suficiente; e (ii) verdadeira. Consideramos acima a primeira cláusula, da condição suficiente; resta agora considerarmos a segunda, de ser “verdadeira”.

A segunda exigência da regra parece ser, de certo modo, prescindível. Todavia, conforme alguns comentadores já destacaram³⁸¹, com “verdadeira” Newton provavelmente pretendia afastar as considerações comuns em muitas correntes filosóficas que conscientemente adotavam um discurso sobre causas que se sabia não serem verdadeiras, como, por exemplo, a hipótese dos vórtices de Descartes. O próprio filósofo francês admitiu que estava “inventando” essa hipótese, e que o seu livro deveria ser lido como um romance.³⁸² Não obstante, o seu discurso falava abertamente dos vórtices como a *causa* dos movimentos planetários. A partir do que se foi enunciado nessa regra é razoável supor que Newton poderia responder que não faz sentido falar em causas das coisas naturais que não se suponha serem verdadeiras, pois nesse caso não estaríamos a falar de causa alguma. Necessariamente, ao falarmos da causa de um fenômeno natural esta causa deve crida como *suficiente* para explicar o fenômeno, e *verdadeira* (pelo menos em tese).³⁸³ Da mesma maneira que foi afirmado para o requisito da *suficiência*, a exigência da causa ser “verdadeira” também é uma clara sinalização da recusa de Newton em se desviar do modo natural pelo qual o nosso conhecimento do mundo empírico é elaborado. Quando nos convencemos que o fogo é a causa do calor, por exemplo, essa causa é por nós concebida como suficiente e verdadeira, mesmo quando ainda haja a possibilidade de no futuro se revelar falsa. E se não a considerarmos tanto suficiente quanto verdadeira, simplesmente não acreditamos que é a causa. A regra de Newton indicaria tão somente que não devemos nos desviar dos preceitos naturais do pensamento, como alguns filósofos – na sua avaliação – provavelmente estavam fazendo, contribuindo assim mais para a confusão do que para o avanço do conhecimento.

Mas haveria alguma justificativa para seguir essa regra? O comentário de Newton à regra fornece um breve esclarecimento.

9.1.2 A simplicidade da natureza

Newton justifica a sua primeira regra afirmando que devemos tomar como parâmetro um princípio que há muito os filósofos têm defendido: a simplicidade da natureza. Afirma Newton: “Como dizem os filósofos: a Natureza nada faz em vão, e mais [causas] será vão

³⁸¹ Harper, 2011, p.170-171.

³⁸² Não aprofundarei nessa questão agora. Mais adiante voltaremos a ela.

³⁸³ A ambiguidade do “verdadeira” aqui vai ser suprida pelas duas últimas regras que serão apresentadas no capítulo 12.

quando menos é suficiente. Porque a natureza é simples, e não ostenta o excesso de causas superfluas”.³⁸⁴ Na tradução do Mote- Cajori:

To this purpose the philosophers say that Nature does nothing in vain, and more is in vain when less will serve; for Nature is pleased with simplicity, and affects not the pomp of superfluous causes (À esse propósito os filósofos dizem que a Natureza não faz nada em vão, e mais é vão quando pouco servirá; porque a natureza se agrada com a simplicidade, e não se afeta com a pompa de causas superfluas).³⁸⁵

Na tradução do Cohen:

As the philosophers says: Nature does not in vain, and more causes ar in vain when fewer suffice. For nature is simple and does not indulge in the luxury of superfluous causes (Como afirmam os filósofos: a Natureza nada faz em vão, e muitas causas são vãs quando poucas são suficientes. Porque a natureza é simples, e não satisfaz com o luxo de causas supérfluas).³⁸⁶

A natureza é estruturada da maneira mais simples possível, por essa razão possui o menor número de causas possível. Não há causas supérfluas na natureza. Com efeito, o princípio da simplicidade enunciado por Newton era bem conhecido. Frequentemente esse preceito é atribuído a Guilherme de Okham, pensador do séc. XIV, sendo mais popularmente conhecido como a “navalha de Okham”. Dentre as várias versões atribuídas a Okham, talvez uma das mais populares seja a que declara que “entidades não devem ser multiplicadas desnecessariamente; a natureza é, por si mesma, econômica e não se multiplica em vão”.³⁸⁷

À primeira vista esse preceito aparenta ser uma regra de parcimônia, visando principalmente a simplicidade e a economia nas explicações científicas ou filosóficas. Conservando as demais variáveis, a melhor explicação é sempre a mais simples. A complexidade das explicações deve ser aumentada somente na medida em que elas se tornam absolutamente necessárias. Todavia, essa não é uma questão apenas de “explicação”, ou de como a nossa razão funciona, ou mesmo do caminho mais produtivo para construir o conhecimento. A *própria natureza* é simples. “(...) A natureza é, por si mesma, econômica (...)”, afirma Newton. Portanto, ainda que esse princípio estivesse visando especificamente as

³⁸⁴ Original em latim (3ed): “Dicunt utique philosophi: Natura nihil agit frustra, & frustra fit per plura quod fieri potest per pauciora. Natura enim simplex est & rerum causis superfluis non luxuriat”.

³⁸⁵ MC, p.398.

³⁸⁶ CW, p.794.

³⁸⁷ Embora esse princípio geralmente seja atribuído a Guilherme de Okham alguns comentadores chamam a atenção que em lugar algum na obra de Okham ele pode ser encontrado. O difundido princípio “Entidades não devem ser multiplicadas desnecessariamente” (*Non sunt multiplicanda entia sine necessitate*) foi formulado pelo filósofo franciscano John Punch em 1639 no seu comentário à obra de Duns Scotus.

entidades explicativas, o que se estaria objetivamente sendo defendido é que *porque a natureza é simples, a explicação mais provavelmente correta é também a mais simples*.

Embora esse princípio, como foi dito, tenha se popularizado com o frade inglês, muitas variações dele são conhecidas bem antes de Okham. Nos *Segundos Analíticos*, Aristóteles já afirmava que, mantidas as demais condições em igualdade, “devemos assumir a superioridade da demonstração que se utiliza de menos postulados e hipóteses”.³⁸⁸ No séc. XIII, Tomás de Aquino defendeu de forma cristalina que “se uma coisa pode ser feita adequadamente por meio de uma, é supérfluo fazê-la por meio de várias; porque nós observamos que a natureza não emprega dois instrumentos quando um é suficiente”³⁸⁹. E mesmo depois de Okham, vemos Galileu Galilei se utilizar de palavras muito semelhantes daquelas atribuídas ao frade inglês, ao comparar o sistema ptolomaico com o copernicano: “a natureza não multiplica coisas desnecessariamente; ela faz uso dos meios mais fáceis e simples para produzir os seus efeitos; ela não faz nada em vão”.³⁹⁰

Não há dúvidas, portanto, que esse princípio era conhecido bem antes de Newton, ou mesmo de Okham.³⁹¹ Isso sugere uma interpretação desse princípio que será útil à presente discussão, mas que protelarei para depois do comentário à segunda regra.

9.1.3 Regra 2: causas e efeitos de mesma espécie

A admissão de uma princípio de simplicidade da natureza parece implicar em pelo menos três suposições sobre as causas das coisas naturais que agora já podem ser referidas. Para que haja o mínimo possível de causas na natureza é necessário (1) que cada fenômeno natural tenha uma, e somente uma, causa; (2) que cada causa possa ser responsável por mais de um fenômeno; e (3) que certas espécies de efeitos naturais tenham a mesma espécie de causas. A Regra 1, como foi mostrado, está relacionada com a premissa (1); as premissas (2) e (3) estão relacionados à Regra 2. Vejamos novamente o seu enunciado: “Portanto, aos efeitos naturais da mesma espécie se deve atribuir, tanto quanto possível, as mesmas causas”.

Alguém poderia indagar se a Regra 2 estaria mesmo se comprometendo com as premissas (2) e (3) ou somente com a premissa (2), ou com a premissa (3). Mas um exame da

³⁸⁸ *Anal. Post.*, Livro I, 86a, 25, (1), em Aristotle, 1943.

³⁸⁹ Aquinas, 1945, p.129.

³⁹⁰ *Diálogo* [Drake], p.397. Na tradução do Mariconda, p.475. Aqui é interessante notar que embora o princípio citado no início dessa seção seja atribuído Okham, ele é encontrado explicitamente nos trabalhos de Galileu e não do frade inglês.

³⁹¹ Na Crítica da Razão Pura, Kant também lembra dessa regra, segundo ele, escolástica: “princípios não devem ser multiplicados sem necessidade” (Kant, 1999, p.398).

sua aplicação no argumento da gravitação e do esclarecimento que Newton oferece em seguida revelará que de fato as premissas (2) e (3) estão incluídos na Regra 2.³⁹² A segunda regra, portanto, também é consequência imediata da admissão de um princípio de simplicidade da natureza. Se a natureza é simples, não apenas um fenômeno deve possuir uma única causa, como uma única causa deve ser a origem de vários fenômenos, o que conferiria ainda maior simplicidade à natureza e menos causas desnecessárias. Além disso, se a natureza é simples, não apenas uma única causa deve ser a origem de vários fenômenos, como determinados *tipos* de causas devem produzir efeitos semelhantes; ou seja, deve haver uma similitude nos efeitos produzidos por causas semelhantes, ou ainda, pela *mesma* causa (pois se assim não fosse a natureza poderia ser concebida como mais simples do que é). Temos, nesse ponto, um tipo de princípio de analogia. Se *A* sofre um determinado efeito e *B* sofre um efeito semelhante, então a causa do efeito em *B* deve ser semelhante a causa em *A*. Se assim não fosse, repito, a natureza não seria a mais simples possível. Newton segue fornecendo alguns exemplos:

Como no caso da respiração no homem e nos animais; na queda das pedras na Europa e na América; na luz do fogo culinário e do Sol; na reflexão da Lua na Terra e nos planetas.³⁹³

Nos exemplos citados fica ainda mais claro que essa regra está diretamente ligada à forma natural como pensamos e conhecemos. Associamos, por semelhança, a luz do fogo na cozinha com a luz do Sol, e projetamos ao Sol uma causa semelhante a do fogo. Associamos o brilho de um corpo na terra (que reflete a luz) com o brilho dos planetas, atribuindo causa semelhante. Associamos as causas dos mecanismos da respiração dos seres humanos com as causas de efeitos semelhantes nos animais. Restam poucas dúvidas: essa regra não indica a forma como *devemos* pensar; indica a forma como de fato pensamos. Não indica a forma como o conhecimento *deve ser* construído. Indica a forma como *é*, de fato, construído. Nas regras 1 e 2, Newton está apenas formalizando (em palavras) um preceito pelo qual se

³⁹² A redação da regra é um tanto ambígua. E a ambiguidade permanece nas traduções do Mote-Cajori e do Cohen. Eis o enunciado da tradução do Mote-Cajori: “Therefore to the same natural effects we must, as far as possible, assign the same causes (Portanto, para os mesmos efeitos naturais devemos, tanto quanto possível, atribuir as mesmas causas)”. E na tradução do Cohen: “Therefore, the causes assigned to the natural effects of the same kind must be, so far possible, the same (Portanto, as causas atribuídas aos efeitos naturais do mesmo tipo devem ser, tanto quanto possível, as mesmas)”. Pelo simples enunciado da regra não fica claro se Newton está se referindo somente a premissa (2) ou também a premissa (3) – apresentadas no corpo do texto acima. Na tradução de Cohen ainda é mais forte a impressão que ele se refere somente a (2), ou talvez o próprio Cohen tenha assim entendido. Mas tanto a aplicação futura da regra no argumento da gravitação quanto o esclarecimento que Newton faz logo após o enunciado sugerem fortemente que o objetivo também é (3), e principalmente (3).

³⁹³ MC, p.398.

explicita o modo como naturalmente pensamos e conhecemos. Está formalizando o processo pelo qual construímos espontaneamente os conhecimentos provenientes da experiência. Mas esse processo está correto? É a melhor maneira? Provavelmente Newton responderia: *não importa. É assim que é*. O que justifica essa regra? *Não vem ao caso. Talvez seja a simplicidade que observamos na natureza; ou, ainda que não sejamos capazes de observar essa simplicidade da natureza, talvez seja mesmo a adoção de um princípio metafísico de simplicidade da natureza; ou, talvez, seja a simplicidade da nossa própria razão que faz parte da natureza que é, por sua vez, simples. Não importa. O que importa é que independente da justificativa é assim que o nosso conhecimento é construído*.

Posto isso, pode-se dizer que a difusão de alguma versão do princípio de Okham em variadas épocas, a que me referi mais acima, formulados de maneiras diferentes por diferentes pensadores, sugere muito mais uma tentativa de justificação da forma natural como conhecemos, e do motivo da sua eficiência nas elaborações explicativas, do que propriamente uma tentativa de normatização de um procedimento a ser seguido. Sem dúvida, a justificativa desse princípio resvala na metafísica (“a natureza é simples”) e, se é possível observar esse fato, é uma questão a se discutir. Todavia me parece claro que esse não é o ponto principal de Newton. O ponto principal é que nosso conhecimento do mundo se fundamenta na atribuição de causas únicas para os fenômenos e na associação de efeitos semelhantes a causas semelhantes ou iguais. A ênfase de Newton me parece ser numa questão epistemológica, e não numa questão metafísica, ou mesmo metodológica. Na discussão da Regra 3 aprofundaremos, ainda, nessa questão. Mas deixemos esse aprofundamento para mais adiante, quando, na aplicação das regras no argumento da gravitação, essas considerações se tornarem mais concretas. Por ora, analisemos a segunda categoria de princípios do Livro III: “os Fenômenos”.

9.2 FENÔMENOS

À primeira vista os “Fenômenos” dos *Principia* são princípios retirados da ciência da astronomia. No entanto, uma caracterização mais precisa desses princípios será da máxima importância nesse trabalho. Farei, portanto, uma caracterização prévia que será retomada logo após a apresentação e discussão dos fenômenos nessa seção. Além disso, ainda retornaremos a esse assunto mais adiante para uma caracterização completa. Preliminarmente, pode-se dizer que os princípios que aqui Newton apresenta como “Fenômenos” são enunciados astronômicos sujeitos aos requisitos de legitimidade da filosofia experimental. Em outras

palavras, são enunciados astronômicos que podem ser considerados – com uma margem razoável de segurança – em concordância com a experiência. Esse detalhe é fundamental.

O leitor deve se recordar da seção 8.1 na qual foi esclarecido que a astronomia estava passando por um período de transformações na modernidade, porém, oficialmente, ela ainda não estava totalmente desligada da tradição que a considerava como um conhecimento instrumental, que não se ocupava, necessariamente, com a realidade concreta do mundo. Por conseguinte, muitos elementos de um sistema de astronomia não estavam vinculados a evidências empíricas, mas a compromissos metafísicos ou religiosos dos seus proponentes. Ao submeter a astronomia aos critérios da filosofia experimental, Newton estava restringindo drasticamente os princípios dessa ciência que legitimamente poderiam ser levados em consideração. Como veremos no que se segue, Newton não adotou todas as leis de Kepler como “Fenômenos” na sua seleção, mas criteriosamente escolheu somente aquelas que, segundo a sua avaliação, estavam suficientemente de acordo com a experiência. Além disso, incluiu enunciados que poderiam ser atribuídos a outros astrônomos e que se enquadravam sob esses mesmos critérios.

Feitas essas considerações iniciais, os seis Fenômenos do Livro III serão apresentados em seu conjunto e depois comentarei cada um deles separadamente. Ao final acrescentarei mais elementos à caracterização preliminar oferecida nessa abertura. Segue a lista dos “Fenômenos” dos *Principia*:

Fenômeno 1

Os planetas circunjoviais [ou os satélites de Júpiter], por raios traçados ao centro de Júpiter, descrevem áreas proporcionais aos tempos, e os seus tempos periódicos – estando as estrelas fixas em repouso – estão para a potência de $3/2$ das distâncias a partir desse centro.

Fenômeno 2

Os planetas circumsaturnianos [ou os satélites de Saturno], por raios traçados ao centro de Saturno, descrevem áreas proporcionais aos tempos, e os seus tempos periódicos – estando as estrelas fixas em repouso – estão para a potência de $3/2$ das distâncias a partir desse centro.

Fenômeno 3

Os cinco planetas primários, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, com suas várias órbitas, circundam o Sol.

Fenômeno 4

Estando as estrelas fixas em repouso, os tempos periódicos dos cinco planetas primários em torno do Sol, e tanto do Sol em torno da Terra quanto da Terra em torno Sol, estão para potência de $3/2$ das distâncias médias a partir do Sol.

Fenômeno 5

Os planetas primários, por raios traçados até a Terra, de modo algum descrevem áreas proporcionais aos tempos, mas por raios traçados até o Sol descrevem áreas proporcionais aos tempos.

Fenômeno 6

A Lua, por raios traçados ao centro da Terra, descrevem áreas proporcionais aos tempos.³⁹⁴

Depois da apresentação dos enunciados acima listados, Newton oferece uma breve discussão sobre cada um dos fenômenos. Como já sabemos, num sistema axiomático os princípios de uma ciência particular não são demonstrados, servindo os eventuais comentários apenas para elucidá-los. No caso específico de Newton no Livro III, ele se propõe menos a esclarecer o princípio do que fornecer um esboço das evidências empíricas em que ele se sustenta. Mas de todo modo, o objetivo não é justificá-los.

9.2.1 Fen. 1 e 2: satélites de Júpiter e Saturno

O Fenômeno 1 apresenta as regularidades dos movimentos dos satélites de Júpiter que Kepler formulou na forma de regras matemáticas. Trata-se da regra das áreas e dos períodos, hoje conhecidas como a segunda e terceira leis de Kepler. O enunciado afirma que os satélites de Júpiter, em relação ao centro desse planeta, percorrem áreas iguais em tempos iguais e, além disso, o quadrado dos seus períodos é proporcional ao cubo do raio das suas órbitas ($T^2 \propto R^3$).

Imediatamente após apresentar o enunciado acima Newton afirma que “isso é estabelecido pelas observações astronômicas” (“*Constat ex observationibus Astronomicis*”).³⁹⁵ Aqui já começa a se manifestar a preocupação em deixar claro ao leitor que os enunciados astronômicos selecionados são somente aqueles que estão estritamente de acordo com a experiência, ou com as “observações”. Isto é assim porque logo em seguida Newton passa a desenvolver uma econômica discussão que aparentemente tem por objetivo evidenciar o que é, exatamente, “estabelecido” pelas observações astronômicas. Mais precisamente, ele procura colocar em evidência (i) que dados astronômicos objetivamente os astrônomos detém; (ii) qual é grau de segurança desses dados em relação à sua concordância com a experiência; (iii) qual é nível de adequação das regras de Kepler em comparação com esses dados, permitindo concluir que essas regras também estão de acordo com a experiência. Começemos com os dados objetivos que os astrônomos detém. Das observações astronômicas sabemos com segurança:

³⁹⁴ CW, p.797-801.

³⁹⁵ O verbo “constat”, do latim, significa claramente evidente, certo, sem dúvida.

- (1) que as órbitas dos satélites de Júpiter são circulares (“diferem insensivelmente de círculos concêntricos à Júpiter”).
- (2) que o movimento dos satélites de Júpiter é uniforme (“são percebidos como uniformes”).
- (3) os tempos de revolução desses satélites em torno de Júpiter (os períodos orbitais).
- (4) as distâncias de cada satélite ao centro de Júpiter (o raio das órbitas).

Para esses dois últimos conjuntos de dados Newton fornece a tabela abaixo:

Tabela 2 – Tempos periódicos dos satélites de Júpiter

Periodic times of the satellites of Jupiter				
	1 ^d 18 ^h 27'34"	3 ^d 13 ^h 13'42"	7 ^d 3 ^h 42'36"	16 ^d 16 ^h 32'9"
Distances of the satellites from the center of Jupiter in semidiameters of Jupiter				
From the observations of	1	2	3	4
Borelli	5 $\frac{2}{3}$	8 $\frac{2}{3}$	14	24 $\frac{2}{3}$
Towneley (by micrometer)	5.52	8.78	13.47	24.72
Cassini (by telescope)	5	8	13	23
Cassini (by eclips. satell.)	5 $\frac{2}{3}$	9	14 $\frac{23}{60}$	25 $\frac{3}{10}$

Fonte: *CW*, p.797.

De todo esse conjunto de informações que se obtém objetivamente das observações astronômicas, as distâncias dos satélites até o centro de Júpiter são as únicas sobre as quais se pode pairar alguma dúvida, em virtude da dificuldade óbvia em se obter essas medidas de forma precisa. É provavelmente por essa razão que Newton concentra o restante da sua discussão para oferecer um ideia da confiabilidade dessas medidas. Em primeiro lugar, deve-se notar que já na tabela Newton mostra que essas medidas foram obtidas por diferentes astrônomos e utilizando diferentes métodos (telescópio, telescópio em conjugação com o micrômetro, e o método dos eclipse dos satélites) e ainda assim foram obtidos resultados bastante convergentes. Em segundo lugar, Newton esclarece como, precisamente, essas medidas foram obtidas na aplicação desses métodos, e as fontes e margens de erro dessas medidas.

Na terceira edição dos *Principia* ele esclarece como o reverendo e astrônomo britânico James Pound obteve as medidas.³⁹⁶ “Mr. Pound determinou o diâmetro de Júpiter e a elongação dos seus satélites com o auxílio de um excelente micrômetro”, afirma Newton. Como o leitor deve ter percebido na tabela acima, as distâncias dos satélites de Júpiter são medidas relativas, e estão expressas em termos do raio de Júpiter. E tanto o raio de Júpiter quanto o raio da órbita dos satélites são determinados pelo abertura angular a partir do ponto de vista da Terra, numa distância sempre constante do nosso planeta até Júpiter, com o auxílio de um telescópio.

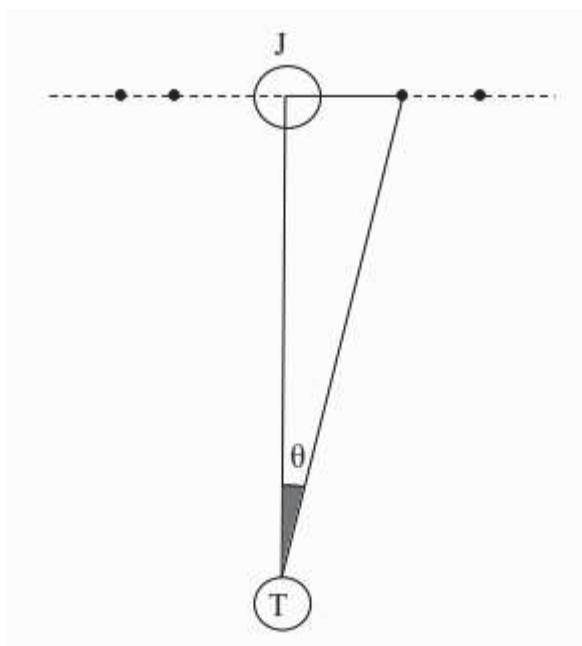


Figura 64 – Ângulo de elongação de um dos satélites de Júpiter
Fonte: o autor

O micrômetro se faz necessário porque o ângulo θ para as medidas que se pretende é muito pequeno, muito menor do que esse que se mostra na figura, fora de escala. Newton afirma que o Mr. Pound obteve a distância do quarto satélite de Júpiter (o mais afastado) com o auxílio de um telescópio de 15 pés e um “excelente micrômetro” e obteve, para a elongação em relação ao Sol, o ângulo de $8' 16''$, ou seja, 8 minutos e 16 segundos de graus (aproximadamente 0,137 graus).³⁹⁷ Da dimensão desse ângulo já é possível perceber a dificuldade em se medir as distâncias dos satélites que estão ainda mais próximos de Júpiter e,

³⁹⁶ A discussão e os dados de James Pound foram introduzidos apenas na terceira edição dos *Principia*. A investigação do astrônomo britânico ocorreu por iniciativa e apoio do próprio Newton nos anos de 1718-1720.

³⁹⁷ Newton prefere apresentar os ângulos de elongação em relação ao Sol e não em relação à Terra. Como se mostrará na seção 11.3, conhecendo-se o ângulo de elongação à Terra e a distância da Terra e de Júpiter ao Sol se pode determinar tanto esse ângulo em relação à Terra quanto em relação ao Sol.

o maior problema, medir o diâmetro de Júpiter. Para obter essas medidas Newton nos informa que o reverendo inglês se utilizou do telescópio mais avançado da época: o telescópio de 123 pés de Huygens. Com o auxílio desse telescópio e do micrômetro, Mr. Pound obteve as distâncias angulares organizadas na tabela abaixo:

Tabela 3 – Ângulo de elongação dos satélites de Júpiter

<i>Satélite</i>	<i>Ângulo</i>	<i>ângulo em graus</i>	<i>telescópio</i>
4	8' 16''	0,137°	15 pés
3	4' 42''	0,078°	123 pés
2	2' 56'' 47'''	0,049°	123 pés
1	1' 51'' 6'''	0,030°	123 pés

Fonte: o autor.

Sobre a medida mais difícil, o diâmetro de Júpiter, Newton esclarece que foram utilizados procedimentos para avaliar os erros das medidas experimentais, muito prováveis, em se tratando das dimensões do ângulo aferido. Ele informa que essa medida foi tomada muitas vezes com ambos os tipos de telescópios. E apresenta um resumo da flutuação dos dados obtidos. Em “telescópios mais curtos” o diâmetro ficou entre 40'' e 41''. No telescópio de 123 pés o diâmetro se mostrou “sempre abaixo de 40'', nunca menor que 38'', e geralmente 39''. Nitidamente, Newton está realizando uma rigorosa avaliação dos erros experimentais. Na sequência ele justifica porque os dados dos telescópios mais curtos devem ser descartados:

Porque a luz de Júpiter é um pouco dilatada pela sua refrangibilidade não uniforme, e essa dilatação dos raios, e essa dilatação conduz a uma menor proporção no diâmetro de Júpiter em longos mais perfeitos telescópios do que naqueles menores e menos perfeitos.³⁹⁸

Na passagem acima Newton faz uma breve avaliação das fontes de erros das medidas obtidas pelos dois telescópios. Nos equipamentos de menor distância focal ocorre um efeito óptico indesejado que distorcem os medidas aferidas. Ele atribui esse efeito à “dilatação da luz”. Nos telescópios com maior distância focal esse efeito é minimizado e, portanto, são os resultados mais seguros. Os dados dos telescópios mais curtos, portanto, devem ser desconsiderados.

Além do método do telescópio com o micrômetro, Newton fornece os mesmos dados obtidos pelo método indireto dos eclipses dos satélites, obtidos igualmente pelo reverendo

³⁹⁸ CW, p.798.

Pound. Com o auxílio do telescópio de 123 pés o astrônomo inglês determinou o tempo transcorrido para que dois dos satélites, o primeiro e o terceiro, “passassem pelo corpo de Júpiter”, ou seja, percorressem o espaço do diâmetro do planeta. Em outras palavras, ele mediu o tempo transcorrido “desde o início do ingresso até o início do egresso, e do completo ingresso até o completo egresso” dos satélites. E da velocidade constante conhecida desses satélites (em graus por unidade de tempo) ele obteve 37,125” para o primeiro satélite e 37,375”, e 37” usando a sombra do primeiro satélite. Assim, Newton calcula as distâncias dos quatro satélites em termos do valor médio do diâmetro obtido pelo método do eclipse dos satélites (37,25”). “As maiores elongações do primeiro, segundo, terceiro e quarto satélite” – afirma Newton – “serão respectivamente iguais a 5.965, 9.494, 15.141, e 26.63 semidiâmetros de Júpiter”.³⁹⁹

Será útil apresentar a tabela de Newton ampliada, com as medidas obtidas por Pound incluídas na terceira edição.

Tabela 4 – Elongações dos quatro satélites de Júpiter de acordo com vários astrônomos

<i>Das observações de:</i>	1	2	3	4	
Borelli	5,66	8,66	14	24,66	<i>Raios de Júpiter</i>
Townly (micrômetro)	5,52	8,78	13,47	24,72	
Cassini (telescópio)	5	8	13	23	
Cassini (eclipse dos satélites)	5,66	9	14,38	25,3	
Pound (micrômetro)	5,69	9,06	14,46	25,43	
Pound (eclipse dos satélites)	5,965	9,494	15,141	26,63	

Fonte: *Principia* [trad. Cohen]. Adaptado pelo autor.

Tendo elucidado quais os dados que os astrônomos detêm objetivamente de observações seguras, e a confiabilidade desses dados dentro de uma margem bastante razoável de precisão experimental, resta enfatizar a concordância das regras de Kepler com esses dados. Sobre a regra das áreas a análise não traz qualquer dificuldade. Sendo as órbitas dos

³⁹⁹ Harper destaca que uma comparação com os valores de hoje sugerem que os dados estimados por James Pound eram muito mais precisos do que qualquer outro dado disponível à época. “É muito provável que as observações de Pound eram as mais exatas do mundo na época em que foram feitas” (Haper, 2011, p.55). A tabela abaixo compara as medidas atuais com aquelas de James Pound.

Aferidor	Io	Europa	Ganymede	Calisto
ESAA	5,90276	9,38567	14,9667	26,3386
Pound	5,965	9,494	15,141	26,63

satélites na forma de círculos concêntricos à Júpiter, e as suas velocidades constantes, segue-se naturalmente que eles descrevem áreas proporcionais aos tempos em relação a esse centro. Sobre a regra dos períodos, Newton aplica a relação $T_1^2/R_1^3 = T_2^2/R_2^3$ para os valores conhecidos dos períodos e obtém os valores para os raios das órbitas dos satélites, que podem ser comparados com os dados obtidos das observações astronômicas, expressos na tabela anterior. Novamente, será útil incluir esses dados numa nova tabela.

Tabela 5 – Comparação entre a média da elongação dos quatro satélites de Júpiter obtidas pela observação direta e pela regra dos períodos de Kepler

<i>Das observações de:</i>	1	2	3	4	
Borelli	5,66	8,66	14	24,66	<i>Raios de Júpiter</i>
Townly (micrômetro)	5,52	8,78	13,47	24,72	
Cassini (telescópio)	5	8	13	23	
Cassini (eclipse dos satélites)	5,66	9	14,38	25,3	
Pound (micrômetro)	5,69	9,06	14,46	25,43	
Pound (eclipse dos satélites)	5,965	9,494	15,141	26,63	
MÉDIA	5,58	8,83	14,07	24,95	
Pela regra dos períodos de Kepler	5,667	9,017	14,38	25,299	

Fonte: o autor.

Não é difícil perceber a impressionante convergência entre média dos dados experimentais e a regra dos períodos de Kepler. A margem de erro ficou em torno de 0,3'' de grau para mais ou para menos, em relação à média. Vários dados experimentais da tabela estão bem mais deslocados da média do que esse desvio proveniente da regra dos períodos. Além disso, esse dado é bastante satisfatório tendo em vista principalmente que a regra harmônica de Kepler utiliza potências quadradas e cúbicas dos períodos e raios, o que amplia significativamente a propagação do erro. Pode-se admitir, portanto, que também a regra dos períodos de Kepler está seguramente de acordo com a experiência.

Para o caso dos satélites de Saturno, no Fenômeno 2, Newton fornece uma discussão muitos semelhante a que foi apresentada para os satélites de Júpiter, com a diferença que ele chama a atenção para algumas particularidades relativas aos anéis de Saturno, que requerem um cuidado adicional na determinação do diâmetro desse planeta. No entanto, tendo já percorrido os detalhes da discussão para Júpiter não há necessidade de seguirmos a exposição dos satélites de Saturno. Passemos prontamente à discussão sobre os planetas primários.

9.2.2 Fen. 3 e 4: planetas primários, Terra e Sol

Os fenômenos de 3 a 4 apresentam enunciados que relacionam os planetas primários, a Terra e o Sol. O Fenômeno 3, em particular, limita-se a declarar que os planetas primários (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno) giram em torno do Sol.

Os cinco planetas primários, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter, e Saturno, com suas várias órbitas, circundam o Sol.⁴⁰⁰

Na discussão sobre esse fenômeno está subentendido o que Newton já afirmou anteriormente no Fenômeno 1. Esse enunciado decorre estritamente do que pode ser considerado como certo das observações astronômicas. Conforme Newton enfatiza, “que Mercúrio e Vênus revolvem em torno do Sol é evidente pela apresentação de fases semelhantes à Lua”. Na seção 8.1 relembrei que o aperfeiçoamento do telescópio por Galileu permitiu que ele observasse diretamente que Vênus tinha fases como a Lua, e que essas fases eram incompatíveis com o modelo geocêntrico ptolomaico. Esse fato forneceu uma evidência praticamente inequívoca que aquele planeta gira em torno do Sol. Newton informa que não apenas Vênus tem fases compatíveis com uma órbita em torno do Sol, mas igualmente Mercúrio. Além disso, em certas circunstâncias também é possível vê-los como “pontos atravessando o disco solar”, o que confirma a conclusão anterior. Com relação à Marte, que é um “planeta superior” (ou seja, sua órbita não passa entre o Sol e a Terra), embora não apresente um conjunto de fases completas como os dois “planetas inferiores”, suas fases também indicam que revolve em torno no Sol.

Em relação aos planetas superiores Júpiter e Saturno, as evidências apresentadas são um tanto diversas. Em razão das grandes distâncias que se encontram do Sol não seria possível observar, de qualquer forma, uma sequência fases além da “cheia”. Newton utilizou, portanto, um raciocínio alternativo. É possível concluir que esses astros mais distantes também revolvem em torno do Sol pela observação da sombra dos seus satélites projetadas sobre eles. A visualização dessa sombra indica, em primeiro lugar, que a luz com a qual esses planetas brilham não provém deles mesmos; e segundo, indica a posição desses planetas em relação ao Sol em vários pontos da trajetória, conforme nos mostra a ilustração simplificada abaixo.

⁴⁰⁰ MC, p.403.

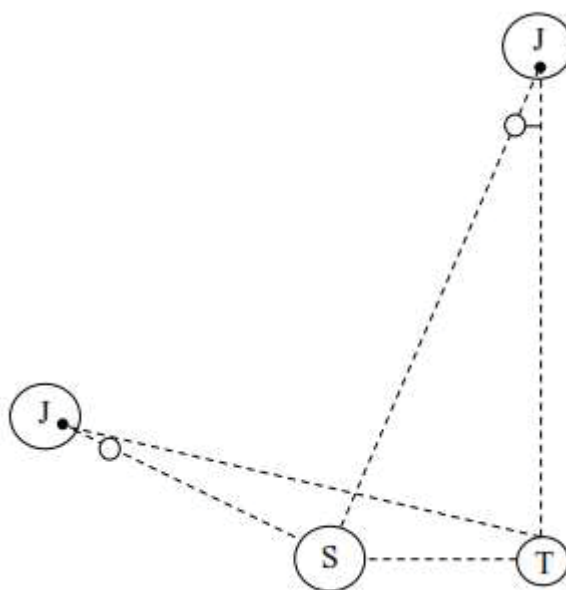


Figura 65 – Sombras dos satélites de Júpiter em diferentes configurações de posição relativas
Fonte: o autor

Conhecendo-se a posição do Sol em relação à Terra, e acompanhando a mudança do ângulo da sombra do satélite projetada é possível concluir que também Júpiter e Saturno revolvem em torno do Sol. Assim, os cinco planetas primários asseguradamente circundam o Sol. É fundamental notar que Newton não menciona a Terra nesse fenômeno. Como não há qualquer evidência observacional direta de uma possível órbita da Terra em torno do Sol, Newton simplesmente silencia a esse respeito, embora os sistemas astronômicos existentes não deixassem de assumir uma posição específica para a Terra. Novamente, vemos nesse ponto a operação dos critérios da filosofia experimental. Não há qualquer evidência segura que possa ser mobilizada a favor de uma possível órbita da Terra em torno do Sol, então nada deve ser declarado a esse respeito. O Fenômeno 4, entretanto, faz considerações sobre a Terra:

Estando as estrelas fixas em repouso, os tempos periódicos dos cinco planetas primários em torno do Sol, e tanto do Sol em torno da Terra quanto da Terra em torno Sol, estão para potência de $3/2$ das distâncias médias a partir do Sol.⁴⁰¹

Para o Fenômeno 4 se tornar mais claro será interessante dividi-lo em duas partes. A primeira parte declara que a regra dos períodos de Kepler, em relação ao centro do Sol, vale para os cinco planetas primários citados no fenômeno anterior e também para a Terra. A segunda parte declara que a regra dos períodos de Kepler se observa tanto tomando a Terra

⁴⁰¹ MC, p.404.

girando em torno do Sol quanto tomando o Sol girando em torno da Terra. Começemos pela primeira parte.

Para aferir a validade da regra dos períodos para os planetas primários e a Terra, Newton precisava dos dados referentes aos períodos orbitais desses astros e as suas distâncias médias até o Sol. Assim como no caso dos fenômenos 1 e 2, a maior dificuldade na obtenção desses dados repousava na determinação dos raios das órbitas, ou melhor, nas distâncias médias até o Sol. Newton afirma que “para Mercúrio e Vênus, não deve haver dúvidas acerca das suas distâncias ao Sol (...)”. De fato, havia um método relativamente seguro para a determinação das distâncias dos planetas inferiores ao Sol por meio da aferição do ângulo de elongação máxima entre esses planetas e o astro maior. A figura abaixo mostra um esquema que ilustra esse ângulo.

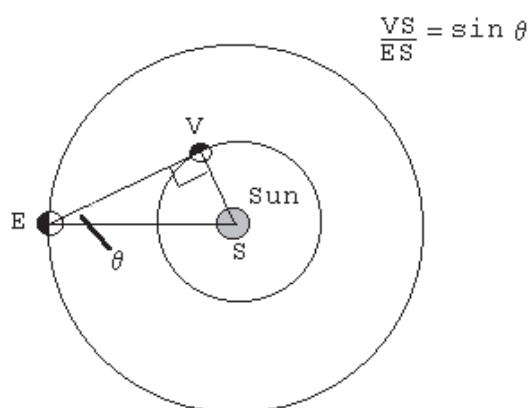


Figura 66 – Ângulo de Elongação máxima entre Vênus e o Sol.
Fonte: domínio público

Não é difícil perceber que esse método é eficiente mesmo para o caso em que se admita que o Sol gira em torno da Terra. Ainda nesse último caso o ângulo máximo permanecerá o mesmo e igualmente as distâncias médias. Entretanto, essa situação não permanecerá verdadeira para os planetas superiores, o que torna as distâncias desses planetas até o Sol sujeitas a dúvidas e “disputas”, como Newton dá a entender na sua discussão. De todo modo, ele afirma que “no caso dos planetas superiores todas as disputas são eliminadas pelos eclipses dos satélites de Júpiter”, uma vez que, como pode ser percebido da figura 65, é possível obter essas distâncias pela determinação da posição das sombras desses satélites.⁴⁰²

⁴⁰² Chamo a atenção para um detalhe importante nesse ponto sobre o qual voltarei alguns parágrafos mais adiante. Tanto Kepler quanto outros astrônomos perceberam na determinação das distâncias dos planetas primários até o Sol que estas distâncias não são fixas, ou seja, as órbitas planetárias não são circulares. Certamente essa foi uma das razões da dificuldade na obtenção dessas distâncias. Elas deveriam ser

Passo, agora, à segunda parte do fenômeno. A regra dos períodos de Kepler até poderia sugerir que a Terra revolve em torno do Sol, assim como os planetas primários. No entanto, o “parênteses” que Newton introduz nesse fenômeno esclarece que a validade dessa regra é simplesmente inconclusiva a esse respeito. A lei harmônica de Kepler é observada tanto para a Terra em relação ao Sol quanto para o Sol em relação à Terra. Portanto, até o momento não há nada que garanta que a Terra realmente circunde o Sol. A situação pode bem ser a oposta. Esse parênteses de Newton é de grande importância porque indica que ele não assumiu a hipótese copernicana como certa entre os fenômenos. Nem o Fenômeno 3 apresenta informações sobre a possível órbita da Terra, nem o Fenômeno 4 serve para esse fim. De fato, até o momento, os fenômenos descartam a hipótese geocêntrica ptomaica, mas não garante de imediato a hipótese copernicana. Os fenômenos são compatíveis tanto com o sistema heliocêntrico de Copérnico quanto com o sistema geo-heliocêntrico de Tycho Brahe, como Kepler e outros astrônomos depois dele já haviam observado. Mais uma vez Newton se restringe estritamente ao que poderia ser garantido pelas observações astronômicas.

9.2.3 Fen. 5 e 6: a lei das áreas nos planetas primários e na Lua

O Fenômeno 5 ainda está interligado aos fenômenos 3 e 4 abordados nos parágrafos anteriores. Neste fenômeno, Newton conclui a validade da regra das áreas para os planetas primários em relação ao centro do Sol, e a sua não-validade para esses mesmos planetas em relação ao centro da Terra. Assim conclui o Fenômeno 5, depois do que foi apresentado pelos fenômenos anteriores:

Os planetas primários, por raios traçados até a Terra, de modo algum descrevem áreas proporcionais aos tempos, mas por raios traçados até o Sol descrevem áreas proporcionais aos tempos.⁴⁰³

Na discussão desse fenômeno Newton afirma que em relação à Terra o movimento dos planetas são vistos “às vezes como diretos, às vezes estacionários, e às vezes retrógrados”. Já do ponto de referência do Sol esses movimentos são “sempre vistos como diretos, e a procederem com um movimento próximo de uniforme, ou melhor dizendo, um pouco mais rápido no periélio e um pouco mais lento no afélio, de modo a manter a igualdade da

determinadas em vários pontos da trajetória para o cálculo posterior de uma *distância média*, que era a distância efetivamente considerada na lei dos períodos.

⁴⁰³ CW, p.801.

descrição das áreas”. Os movimentos irregulares dos planetas do ponto de vista da Terra, naturalmente, inviabiliza a observância da regra das áreas para esse ponto de referência. Por outro lado, a regularidade da descrição uniforme das áreas é observada do ponto de referência do Sol, sendo “uma proposição destacada entre os astrônomos, e particularmente demonstrável para Júpiter, a partir do eclipse dos seus satélites”.

Em primeiro lugar, esse fenômeno confirma as conclusões anteriores que os planetas primários giram em torno do Sol. A simples existência de uma regularidade como a lei das áreas para os planetas primários em relação ao Sol, mas não em relação à Terra, já é uma forte evidência de que esses planetas revolvem em torno do astro maior. Mas em segundo lugar, para os nossos propósitos nessa seção, esse fenômeno é importante tanto pelo que ele afirma diretamente quanto por aquilo que ele não afirma. O leitor deve ter percebido que nada é afirmado nesse fenômeno – nem nos anteriores – acerca da forma das órbitas planetárias. Aqui convém lembrar que, ao declarar a validade da lei dos períodos e das áreas para os satélites de Júpiter e Saturno, nos fenômenos 1 e 2, as órbitas consideradas eram *circulares*. No entanto nesse fenômeno, que se refere aos planetas primários, a forma das órbitas não é especificada. Já era de amplo conhecimento na época que as órbitas dos planetas primários não eram órbitas circulares; as distâncias coletadas desses planetas ao Sol em momentos diferentes já haviam evidenciado isso, como afirmei há pouco. Mas aqui também não se assume que essas órbitas eram *elípticas*. Isso significa que Newton também não considerou como válida a hoje chamada primeira lei de Kepler, que os planetas se movem em órbitas elípticas, com o Sol em um dos focos. Para Newton, Kepler não conseguiu evidenciar essa hipótese a partir dos dados astronômicos. O que estava evidenciado era que as trajetórias dos planetas primários eram *ovais*, apresentando uma elipse, com o sol deslocado do centro dessas trajetórias. Mas na falta de uma evidência mais segura sobre a forma exata dessa órbita, Newton não considera a primeira lei como um fenômeno com o qual ele pode trabalhar.⁴⁰⁴

O último fenômeno apresentado por Newton aborda o caso da Lua. O Fenômeno 6 afirma a validade da lei das áreas de Kepler para o satélite terrestre, porém silencia a respeito da lei dos períodos. Afirma o Fenômeno 6: “A Lua, por raios traçados ao centro da Terra, descreve áreas proporcionais aos tempos”.

Naturalmente, o silêncio de Newton acerca da lei dos períodos decorre de não haver outros satélites que revolvem a Terra, como nos casos de Júpiter e Saturno. Não havendo outros satélites não é possível avaliar a ocorrência da regra harmônica. Sobre a regra das

⁴⁰⁴ Volto a esse ponto na seção 10.2.

áreas, Newton afirma que ela é observada “a partir do aparente movimento da Lua, comparada com o seu aparente diâmetro”. O “diâmetro aparente” fornece a sua distância da Terra à Lua, em raios lunares. Conforme Harper nos informa, o diâmetro aparente da Lua no perigeu e no apogeu corresponde, por exemplo, a 33,5’ e 29,5’, respectivamente. Aplicando a tangente da metade desse ângulo é possível concluir as essas distâncias são equivalentes a 233,07 e 205,24 raios lunares.⁴⁰⁵ O “movimento aparente” da Lua, por sua vez, indica um aumento de velocidade no perigeu e uma diminuição no apogeu, como seria de se esperar pela ocorrência da regra das áreas. No entanto era de conhecimento dos astrônomos que para o caso da Lua a validade da regra das áreas era apenas grosseiramente observada. Tanto Kepler quanto o astrônomo inglês Jeremiah Horrocks haviam observado pequenas violações da lei das áreas para o movimento lunar.⁴⁰⁶ É provavelmente por essa razão que Newton faz a observação final sobre esse fenômeno: “É verdade que o movimento da Lua é um pouco perturbado pela ação do Sol: mas, no estabelecimento desse fenômeno, eu desprezo esses pequenos e insignificantes erros”.

É notável nesse último fenômeno o fato de que Newton antecipa parte do que irá defender mais adiante como justificativa para considerá-lo como suficientemente adequado às observações astronômicas. Seria isso válido dentro dos rígidos critérios que ele adotara até então? Difícil dizer no momento. Como Newton esclareceu, essas violações na lei das áreas eram pequenas, como também se pode averiguar pelas observações de Kepler e Horrocks. Ainda assim, o que o leva acreditar que essas pequenas discrepâncias poderiam ser admitidas nesse caso, mas não para as elipses de Kepler? Aparentemente, duas coisas podem ser aventadas. Em primeiro lugar, pode ser a operação – já aqui – de algum convencimento por indução. Em segundo lugar, é bastante provável que Newton tenha assumido provisoriamente esse fenômeno, efetuando estudos adicionais para averiguar a possibilidade da concorrência de outras causas que pudessem explicar essas discrepâncias, e terminando por se convencer que a lei das áreas se observa com considerável precisão quando essas causas são levadas em consideração. De todo modo, será necessário avançar no argumento da gravitação universal para se ter uma compreensão mais exata da decisão de Newton aqui. Antes de passar ao argumento da gravitação, entretanto, voltemos à caracterização dos fenômenos que aqui foram apresentados, e com a qual iniciamos essa seção.

9.2.4 Caracterização dos Fenômenos

⁴⁰⁵ Harper, 2011, p.65, nota 37.

⁴⁰⁶ Ibid.

Apresentados os seis fenômenos que compõem o Livro III, nos resta, agora, concluir a caracterização preliminar desses princípios. Destacarei brevemente cinco características dos fenômenos que acredito que ficaram claras do que foi exposto até o momento. A primeira característica dos fenômenos – tal como apresentados aqui – é que eles são *enunciados astronômicos*. Destaco essa característica apenas para dizer que posteriormente essa noção será ampliada pelo próprio Newton. Embora os enunciados apresentados nas páginas anteriores sejam os únicos oficialmente nomeados como fenômenos nos *Principia*, mais adiante ficará manifesto que eles não são únicos que merecem assim serem chamados. Por ora, no entanto, não precisamos antecipar essa ampliação. Portanto, conceda o leitor que eles sejam somente enunciados astronômicos.

A segunda característica é que eles são enunciados astronômicos que podem ser seguramente considerados de acordo com a experiência, ou com as observações astronômicas. Ao longo de todos os fenômenos apresentados percebemos essa constante preocupação de Newton. É importante notar, todavia, que essa estrita “concordância com experiência” não se limitou a evitar suposições que pudessem eventualmente ser contrárias às observações; evitou, igualmente, as suposições que, embora em nada a experiência as obstaculizasse, nenhuma evidência desfrutavam a seu favor. Foi o caso, por exemplo, da hipótese copernicana. Apesar de Galileu, Kepler, e muitos outros astrônomos na época de Newton já terem se posicionado abertamente a favor do heliocentrismo e, além disso, apesar de não haver qualquer oposição contundente da experiência em relação à essa hipótese, ainda assim ela não foi assumida entre os fenômenos por não se perceber qualquer evidência observacional ou experimental que garantisse a sua validade. Ou melhor, não havia uma evidência decisiva que garantisse a hipótese copernicana como *única* possibilidade compatível com os dados. Portanto, para Newton, aparentemente, um *fenômeno* é um enunciado astronômico que não apenas não contradiz a experiência, mas que é claramente evidenciado por ela; e isso ocorre principalmente quando não há outras possibilidades possíveis além daquela que está estabelecida.

A terceira característica dos fenômenos que merece aqui ser destacada é que eles são enunciados nos quais a “concordância com a experiência” é considerada de maneira bastante criteriosa. Evidentemente, “concordância com a experiência” é um parâmetro um tanto subjetivo. As órbitas elípticas de Kepler poderiam ser consideradas por muitos filósofos experimentais como de acordo com a experiência (Hooke é um exemplo disso). Contudo, para Newton os dados de Kepler não forneciam uma base suficientemente rigorosa para a sua

aceitação. Nesse ponto parece que o rigor de Newton varia de acordo com os seus propósitos. Diante de uma investigação estritamente matemática que fazia das órbitas dos corpos, ele já estava a par do fato que uma pequena variação na órbita ou na posição do centro de força (desviando do foco da elipse) poderia alterar completamente os resultados procurados. Assim, mesmo que alguns princípios pudessem por ele ser considerados como estando razoavelmente de acordo com a experiência, eles deveriam ser evitados caso o contexto de utilização pudesse sugerir uma propagação de erro incompatível com as exigências que a própria natureza da investigação demandava. É isso aparentemente que Newton fez. Para os possíveis fenômenos avaliados, portanto, não bastava estar de acordo com a experiência; era mister considerar essa concordância de maneira bastante criteriosa de acordo com o contexto de argumentação e com os obtivos que se almejava.

A quarta característica dos fenômenos que merece destaque é que eles são enunciados que incluem desde simples observações astronômicas (como no Fenômeno 3) até relativamente sofisticadas “regras” ou leis matemáticas. Em geral os fenômenos aqui apresentados por Newton não são dados brutos da experiência, ou a experiência imediata dos sentidos. Longe disso. Mas também não deixam de ser. Há uma certa flexibilidade na noção de Newton. No entanto as “regras” matemáticas de Kepler que Newton considera como fenômenos, principalmente a “regra dos períodos”, tem muito mais uma característica de uma lei descritiva dos dados empíricos. Ou seja, um simples equacionamento da regularidade presente num conjunto de dados. Por exemplo, dado o conjunto de números 3, 6, 9, 12, 15 pode-se investigar a regularidade que há nesses dados e expressá-la matematicamente por uma expressão como $y = 3x$. O que se teria no caso concreto de Kepler seria uma organização dos dados brutos na tentativa de compreender a regularidade presente e expressá-la na forma de uma lei matemática. Para Newton, aparentemente, as regras de Kepler eram fenômenos porque elas seriam apenas uma espécie de síntese de um conjunto extenso de dados da experiência. Evidenciando-se que essa síntese realmente está de acordo com os dados da experiência, a própria síntese pode ser considerada um fenômeno que concorda com a experiência.

A quinta e última característica dos fenômenos que merece ser lembrada é que eles são os pontos de partida do sistema axiomático do Livro III. Não se deve perder de vista essa característica que já foi antecipada na seção 8.2. Por essa razão eles haviam sido incluídos como “Hipóteses” na primeira edição. A mudança terminológica em nada altera esse fato, como se mostrará na sequência. A razão da alteração do termo “Hipótese” para “Fenômeno”, contudo, já pode ser vislumbrada em alguns de seus aspectos pelo leitor. O termo escolhido

por Newton enfatiza o critério de admissibilidade para seus os primeiros princípios no Livro III. Apenas os enunciados que estão estritamente de acordo com a experiência devem ser considerados.

Não custa lembrar, entretanto, que dentre os princípios do Livro III que servirão como base para argumentação de Newton, ainda figuram as “Regras para Filosofar”, que abordamos algumas páginas atrás e, sobretudo, os axiomas e teoremas do Livro I que, agora, assumirão também o estatuto de “princípios” nessa última etapa dos *Principia*. Conforme as suas palavras nas linhas de abertura do Livro III, esses princípios são “as leis e condições dos movimentos e das forças, que especialmente se relacionam com a filosofia”, ou, os princípios “nos quais o estudo da filosofia [natural] pode ser fundado”. Posto isto, será bastante proveitoso oferecer, nesse momento, um breve resumo dos principais resultados do Livro I que Newton mobilizará no argumento da gravitação universal, os quais ficaram inevitavelmente dispersos no capítulo 7.

9.3 PRINCÍPIOS MATEMÁTICO-MECÂNICOS E TEOREMAS DERIVADOS

Nessa seção apresento um resumo dos principais resultados do Livro I que agora serão utilizados como princípios no argumento da gravitação e na demonstração do sistema do mundo. Será oportuno oferecer esse resumo numa tabela. Esse expediente facilitará tanto a consulta posterior quanto uma visualização eficiente de todo o percurso do capítulo 7. Dividi a tabela em 11 “situações”, em ordem crescente de complexidade, que contemplam (1) as “características do movimento” de um corpo qualquer em movimento na geometria mecânica; (2) as “condições de força” necessárias para ocorrência daqueles movimentos; (3) uma “abreviação simbólica”, que não passa de uma formulação reduzida da relação entre o movimento específico e a força, sem qualquer pretensão de uma sofisticação de formalismo lógico para além daquilo que seria compatível com os instrumentos de Newton à época; e (4) a “correspondência no Livro I”, que indica a localização da situação elencada na tabela na estrutura axiomática dos *Principia*. Naturalmente, as “situações” contempladas na tabela não esgotam todos os resultados do Livro I que farei menção nos argumentos dessa seção. Trata-se tão somente dos resultados que foram considerados como de maior importância e que terão um destaque mais elevado no argumento da gravitação. Sempre que for conveniente serão suscitados outros teoremas e corolários do Livro I que não estiverem incluídos nessa relação. Segue, portanto, o resumo dos princípios matemáticos do Livro I.

Tabela 6 – Resumo dos princípios matemáticos do Livro I

Situação	Características do Movimento	Condição de força	Abreviação simbólica ⁴⁰⁷	Correspondência no Livro I
1	Corpo descrevendo uma trajetória retilínea com velocidade constante	Ausência de forças ou composição de forças igual a zero	$MRU \leftrightarrow F_R = 0^*$ (*) excluindo o repouso absoluto	Axiomas 1 e 2
2	Corpo descrevendo uma trajetória retilínea sofrendo alteração <i>instantânea</i> de velocidade num meio sem resistência considerável	Força <i>impulsiva</i> atuando na mesma direção do movimento inicial do corpo	$\Delta v \leftrightarrow F_{imp}$	Axiomas 1 e 2
3	Corpo descrevendo uma trajetória retilínea sofrendo alteração <i>contínua</i> e uniforme de velocidade num meio sem resistência considerável	Força <i>contínua</i> atuando na mesma direção do movimento inicial do corpo	$MRUV \leftrightarrow F_{cont}$ ou $MRUV \leftrightarrow F_{imp} \propto t$	Axiomas 1 e 2; e Lema 1
4	Corpo descrevendo uma trajetória retilínea sofrendo alteração <i>instantânea</i> na direção no seu movimento inicial num meio sem resistência considerável	Força impulsiva atuando em direção perpendicular ao movimento inicial do corpo	$\Delta(direção) \leftrightarrow F_{imp}(perp)$	Axiomas 1 e 2, cor.1;
5	Corpo descrevendo uma trajetória curvilínea num meio sem resistência considerável	Força contínua perpendicular ao movimento do corpo	$curva \leftrightarrow F_{cont}(perp)$	Axiomas 1 e 2, cor.1; e Lema 3, cor.4.
6	Corpo descrevendo uma trajetória curvilínea que odebece a lei das áreas em relação a um ponto fixo num meio sem resistência considerável	Força centrípeta direcionada ao ponto fixo de referência da lei das áreas	$Lei\ das\ áreas \leftrightarrow F_c$	Teoremas 1 e 2

⁴⁰⁷ Apenas por uma razão de conveniência usei nas abreviações algumas siglas e símbolos atuais e, alguns, amplamente conhecidos. Não custa enfatizar que Newton jamais usou qualquer desses símbolos e siglas nos *Principia*. Vale lembrar os significados de algumas dessas siglas: *MRU* (movimento retilíneo uniforme), *MRUV* (movimento retilíneo uniformemente variado), *MCU* (movimento circular uniforme) e Δ (variação). Utilizo as setas para indicar implicação ou bi-implicação no sentido da lógica clássica atual.

7	Corpo descrevendo uma órbita circular com velocidade constante num meio sem resistência considerável	Força centrípeta constante, direcionada para o centro do círculo, e proporcional a qualquer das leis de força possíveis na coluna ao lado	$MCU \rightarrow F_c \propto 1/D^{2n-1}$	Teorema 4, cor.3 a 7
8	Corpo descrevendo uma órbita elíptica com velocidade areal constante em relação ao centro da elipse ⁴⁰⁸ constante num meio sem resistência considerável	Força centrípeta diretamente proporcional à distância do centro da elipse	$\text{órbita elíptica}_1 \rightarrow F_c \propto D$ ⁴⁰⁹	Problema 5 (prop.10)
9	Corpo descrevendo uma órbita elíptica com velocidade areal constante em relação a um dos focos da elipse constante num meio sem resistência considerável	Força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância a partir do foco da elipse	$\text{órbita elíptica}_2 \rightarrow F_c \propto \frac{1}{D^2}$	Problema 6 (prop.11)
10	Corpo descrevendo uma seção cônica com velocidade areal constante em relação ao foco da cônica num meio sem resistência considerável	Força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância a partir do foco da cônica	$\text{seções cônicas} \leftrightarrow F_c \propto \frac{1}{D^2}$ ⁴¹⁰ (*) com exceção do círculo	Problema 8 (prop.13), cor.1
11	Vários corpos descrevendo órbitas fechadas quaisquer, semelhantes, com velocidade areal constante em relação a um ponto interno a órbita, e obedecendo a lei harmônica ($T^2 \propto R^3$)	Força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância a partir do centro de força da órbita	$\text{lei harmônica} \leftrightarrow F_c \propto \frac{1}{D^2}$	Teorema 4, cor.7 e 8; e Teorema 7 (prop.15).

Fonte: o autor.

Realizado esse resumo dos princípios matemático-mecânicos do Livro I, estamos prontos para ingressar na apresentação e análise do argumento da gravitação.

⁴⁰⁸ Velocidade areal constante é o mesmo que dizer que o movimento obedece a lei das áreas.

⁴⁰⁹ Uso os subíndices 1 e 2 para distinguir velocidade areal constante em relação ao centro da elipse ou ao foco, respectivamente.

⁴¹⁰ Nas seções cônicas aqui excetua-se o círculo, conforme esclarecido na seção 7.7, relação [43].

10 O ARGUMENTO DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

Após apresentar os princípios do Livro III, Newton passa para a parte dedutiva do método axiomático. Essa parte é intitulada simplesmente de “proposições”. Como foi antecipado no prefácio, Newton partirá agora dos “fenômenos do movimentos” para as “forças da natureza”; em seguida, uma vez descobertas essas forças, ele demonstrará os outros fenômenos.⁴¹¹ Em outras palavras, ele irá aplicar o conhecido método da *análise e síntese*. Primeiro, parte-se dos efeitos conhecidos para as causas desconhecidas; depois, encontradas as causas, deduz-se os efeitos a partir dessa causa. Os passos demonstrativos da proposição 1 até a proposição 7 do Livro III representam precisamente a etapa da *análise*: a determinação da causa dos movimentos celestes a partir dos seus efeitos – os fenômenos astronômicos. Vejamos primeiramente em detalhes os argumentos mobilizados por Newton em cada um dessas sete primeiras proposições, para em seguida esboçar uma caracterização mais completa do método da análise e síntese.

10.1 PROP. 1: A FORÇA CENTRÍPETA ATUANDO NOS SATÉLITES DE JÚPITER E SATURNO

Na proposição 1 do Livro III Newton afirma:

Proposição 1 – Teorema 1

As forças pelas quais os planetas circunjoviais [ou os satélites de Júpiter] são continuamente desviados dos seus movimentos retilíneos e mantidos em suas respectivas órbitas são [1] direcionadas ao centro de Júpiter e são [2] inversamente proporcionais ao quadrado da distância das suas posições até esse centro.⁴¹²

É fácil perceber que Newton formula o seu enunciado em duas partes. A primeira parte faz uma acerção a respeito da direção das forças que operam nos satélites, e a segunda parte sustenta a proporcionalidade matemática por meio da qual essas forças operam. Como está claro no enunciado, Newton afirma que as forças são direcionadas para o centro de Júpiter e que a proporção matemática em que operam é segundo o inverso do quadrado da distância até o centro do planeta. No comentário à proposição Newton fornece a uma econômica demonstração para cada parte da proposição:

⁴¹¹ Veja a seção 2.7.1.

⁴¹² CW, p.802. Os colchetes com numerais são meus. O primeiro colchetes é de Cohen.

A primeira parte da proposição é evidente do fen. 1 e da prop. 2 ou prop. 3 do Livro I, e a segunda parte do fen. 1 e do corol. 6 à prop. 4 do Livro I.⁴¹³

Naturalmente, esse estilo de “demonstração” é selado para os leitores que não conhecem as proposições do Livro I, como Newton deixou bem claro no seu texto de abertura ao Livro III. Como ele nos informou, esse procedimento foi adotado propositadamente para impedir “disputas”, ou melhor, para impedir a avaliação daqueles que não estudaram cuidadosamente as proposições matemáticas do Livro I. Hoje, por certo, essa estratégia não é mais necessária. Abrirei, portanto, a demonstração das proposições do Livro III para permitir uma análise mais precisa das mesmas, a começar por essa primeira proposição. Antes de fazer isso, contudo, proponho uma pequena adaptação no enunciado dessa proposição que será útil à presente análise. Newton expressou a primeira proposição, como vimos, em duas partes. Mas considero conveniente aqui considera-la em três partes, explicitando uma passagem que Newton deixou apenas subentendida, mas que em razão do propósito investigativo desse trabalho torna-se importante evidenciar. As três partes da presente proposição poderiam assim serem expressas:

- (1) Há uma força contínua atuando nos satélites de Júpiter.*
- (2) Essa força é direcionada para o centro de Júpiter.*
- (3) Essa força é proporcional ao inverso do quadrado da distância dos satélites até o centro do planeta.*

A explicitação da primeira parte da proposição é importante porque a questão da naturalidade do movimento circular não estava absolutamente superada à época de Newton, embora seja verdade que uma grande parte dos filósofos naturais já consideravam a inércia retilínea como certa. De todo modo, essa questão não estava definitivamente superada. Desse ponto de vista considerarei a primeira parte da proposição como carecendo igualmente de demonstração. A demonstração de Newton, agora, para cada uma das três partes da proposição, poderia ser expressa com abaixo:

- a) Parte 1: Decorre do fen. 1 e das Lei 1 e 2 do Livro I;
- b) Parte 2: Decorre do fen.1 e prop. 2 ou 3 do Livro I;
- c) Parte 3: Decorre do fen. 1 e corol. 6 da prop. 4 do Livro I.

⁴¹³ Ibid.

Antes abrir cada uma das partes da demonstração, lembremos que o parâmetro de demonstração do séc. XVII – e também de Newton – é a noção de “dedução” presente nos *Segundos Analíticos* de Aritóteles, conforme foi evidenciado no capítulo 4 e na seção 8.2. Em outras palavras, o modelo de procedimento demonstrativo seguido por Newton é o *silogismo aristotélico*, que provê as deduções dentro do sistema axiomático. Isso significa que toda e qualquer argumentação oferecida por Newton deve ser passível de se expressar em termos *dedutivos*, pois caso contrário não estaria seguindo o rigor lógico considerado adequado para um tratado “científico” na sua época. “Abrir as demonstrações” de Newton, portanto, significa apenas explicitar os processos dedutivos realizados por ele. É isso que farei no que se segue, embora à medida que esses processos se tornem mais claros para o leitor seja possível avançar mais rapidamente na apresentação. Por ora, vejamos detalhadamente a explicitação das deduções na proposição 1.

A primeira parte da proposição 1, conforme a adaptamos mais acima, declara: *Há uma força atuando nos satélites de Júpiter*. Segue a sua demonstração.

Pelas Leis 1 e 2 do movimento, um corpo descrevendo uma trajetória curvilínea necessariamente está sob a ação de uma força contínua. Esse resultado também está expresso na “Situação 5” da tabela 6. Pelo Fenômeno 1 os satélites de Júpiter descrevem órbitas circulares, portanto, curvilíneas. A conclusão é que há uma força atuando nos satélites de Júpiter. De maneira ainda mais adequada aos padrões aristotélicos, a presente dedução poderia ser expressa:

1. Todo corpo descrevendo uma trajetória curvilínea está sob a ação de uma força contínua (Leis 1 e 2 do movimento).
2. Os satélites de Júpiter são corpos descrevendo trajetórias curvilíneas (Fen. 1).
3. Logo, os satélites de Júpiter estão sob a ação de uma força contínua.

Está realizada a demonstração da primeira parte da proposição 1. A segunda parte afirma: *Essa força é direcionada para o centro de Júpiter*.

Pela proposição 2 do Livro I, um corpo descrevendo uma trajetória curvilínea que obedece a lei das áreas em relação ao um ponto fixo necessariamente está sob a ação de uma força contínua direcionada a esse ponto fixo (uma força centrípeta). Esse resultado também está expresso na “Situação 6” da tabela 6. Pelo Fenômeno 1, os satélites de Júpiter descrevem uma trajetória curvilínea que obedece a lei das áreas em relação ao centro de Júpiter. A

conclusão é que os satélites de Júpiter estão sob a ação de uma força direcionada para o centro de Júpiter. Formalizando:

1. Todo corpo descrevendo uma trajetória curvilínea que obedece a lei das áreas em relação a um ponto fixo está sob a ação de uma força continua em direção a esse ponto (Prop. 2, Livro I).⁴¹⁴
2. Os satélites de Júpiter são corpos descrevendo trajetórias curvilíneas que obedecem a lei das áreas em relação a um ponto fixo, a saber, o centro de Júpiter (Fen.1).
3. Logo, os satélites de Júpiter estão sob a ação de uma força contínua em direção ao centro de Júpiter.

Está demonstrada a segunda parte da proposição 1. A terceira parte da proposição afirma: *Essa força é proporcional ao inverso do quadrado da distância dos satélites até o centro do planeta*. Explicitando a demonstração, teremos:

1. Todo conjunto de corpos descrevendo órbitas circulares concêntricas que obedecem a lei das áreas e a lei harmônica em relação ao centro do círculo estão sob a ação de uma força contínua proporcional ao inverso do quadrado da distância a partir desse centro (Prop.4, corol. 6; ou Situação 7 e 11 da tabela 6).
2. Os satélites de Júpiter são corpos descrevendo órbitas circulares concêntricas que obedecem a lei das áreas e a lei harmônica em relação ao centro dos círculos (Fen. 1).
3. Logo, os satélites de Júpiter estão sob a ação de uma força contínua proporcional ao inverso do quadrado da distância até o centro dos círculos.

Está demonstrada, portanto, a proposição 1. Há uma força atuando nos satélites de Júpiter, essa força é direcionada para o centro desse planeta, e é proporcional ao inverso do quadrado da distância dos satélites até esse centro. Newton termina essa proposição afirmando que “o mesmo deve ser entendido para os planetas [satélites] que circundam Saturno, pelo Fenômeno 2”.

⁴¹⁴ Todos os argumentos do Livro III partem da premissa de corpos se movendo em meios sem resistência, ou sem resistência considerável. Isso certamente poderia ser considerado uma hipótese não evidenciada empiricamente assumida por Newton. Mas não é o caso. Os meios resistentes foram considerados por Newton no Livro II anteriormente, e afastados como inconsistentes com a experiência. Por motivos de economia, resolvi oferecer uma análise do Livro II apenas no APÊNDICE B.

O único detalhe que deve se adicionar a conclusão de Newton é que a partir agora é preciso se especificar que tipo de quantidade de força está sendo considerada: acelerativa ou motriz. Conforme foi alertado ao longo da *Parte 2*, nas primeiras seções do Livro I se estava lidando somente com uma *partícula* ou um corpo de massa unitária e, portanto, a força acelerativa era igual a força motriz e não havia necessidade de distinção. Agora, no entanto, o que está sendo considerado é o movimento de planetas e satélites com massa considerável e, portanto, deve se especificar que aqui está sendo apreciada a *quantidade acelerativa* da força dos planetas. Em outros termos, os satélites de Júpiter estão sob a ação de uma *força acelerativa* proporcional ao inverso do quadrado da distância ou, mais exatamente, uma força que gera um efeito acelerativo proporcional ao inverso do quadrado da distância.⁴¹⁵

Antes de prosseguirmos para a próxima proposição vale destacar o fato que Newton faz menção direta à proposição 3, do Livro I, para justificar a segunda parte da proposição ora em análise (“essas forças são direcionadas para o centro de Júpiter”), e não apenas à proposição 2 do mesmo livro, como na apresentação que ofereci logo acima. Com efeito, ele afirma que esta parte da proposição “é evidente do fen. 1 e da prop. 2 ou prop. 3 do livro I (...)”.⁴¹⁶ A razão para Newton incluir essa disjunção mencionada decorre da dúvida em se admitir que Júpiter e Saturno, ou mais precisamente os seus centros, estão em repouso, conforme foi assumido na premissa maior da demonstração dessa parte da proposição. É evidente que se o centro a partir do qual se percebe a vigência da lei das áreas nas observações astronômicas não for fixo, a dedução da segunda parte da proposição, que apresentamos acima, tem a sua validade comprometida. É nesse ponto que entra em ação a proposição 3 do Livro I. Em termos elementares, essa proposição afirma que a relação de implicação entre a lei das áreas e a força centrípeta não se altera caso o centro e os corpos que o circundam estiverem todos em movimento paralelo uniforme, ou ainda que seja movimento acelerado.⁴¹⁷ Ora, os fenômenos 1 e 2 não informam se Júpiter e Saturno estão em movimento ou repouso. Mas pelo fenômeno 3, 4 e 5 torna-se claro que eles estão. Esse movimento, todavia, é acompanhando pelo movimento paralelo e equivalente dos satélites, o que é evidente pela posição relativa entre esses corpos que permanece igual a aquela que haveria

⁴¹⁵ Conforme foi esclarecido na seção 5.3.2, a força acelerativa é a força motriz por unidade de massa. O resultado, portanto, poderia ser enunciado também em termos de força motriz: $F_{mot} \propto \frac{m}{D^2}$.

⁴¹⁶ Grifo meu.

⁴¹⁷ A proposição 3 do Livro I afirma: “Every body, that by a radius drawn to the centre of another body, howsoever moved, describes areas about that centre proportional to the times, is urged by a force compounded of the centripetal force tending to that other body, and of all the accelerative force by which that other body is impelled”.

caso estivessem desprovidos desse movimento, e consequentemente o centro estivesse em repouso. Portanto, mesmo que Júpiter e Saturno estejam em movimento (e sabemos que estão), as deduções acima continuam válidas substituindo a proposição 2 pela proposição 3 do Livro I.

10.2 PROP. 2: A FORÇA CENTRÍPETA ATUANDO NOS PLANETAS PRIMÁRIOS

Afirma Newton na proposição 2 do Livro III:

Proposição 2 – Teorema 2

As forças pelas quais os planetas primários são continuamente desviados dos seus movimentos retilíneos e são mantidos nas suas respectivas órbitas são [1] direcionadas para o Sol e são [2] inversamente proporcionais ao quadrado das suas distâncias até esse centro.

A primeira parte da proposição é evidente do fen. 5 e da proposição 2 do Livro I, e a última parte do fen. 4 e da prop. 4 do mesmo livro.⁴¹⁸

Da mesma maneira que na análise da proposição 1, essa proposição foi dividida em duas partes por Newton, mas pode aqui ser mais convenientemente considerada em três partes.

- (1) Há uma força atuando nos planetas primários;*
- (2) Essa força é direcionada para o centro do Sol;*
- (3) Essa força é proporcional ao inverso do quadrado da distância desses planetas até o centro do Sol.*

Segue a justificação de cada parte:

- a) Parte 1: Decorre do fen. 3 e das Leis 1 e 2 do Livro I; ou situação 5, tab. 6.
- b) Parte 2: Decorre do fen.5 e prop. 2 do Livro I; ou situação 6, tab. 6.
- c) Parte 3: Decorre do fen. 4 e da prop. 4 do Livro I; ou situação 11, tab. 6.

No que se refere aos princípios do Livro I, até aqui as únicas diferenças entre a justificação dessa proposição e da anterior está em que na parte 2 Newton não menciona a proposição 3, e na parte 3 ele não especifica o corolário 6 da proposição 4. Isso significa, no primeiro caso, que, diferente do caso dos satélites de Júpiter e Saturno, Newton considera preliminarmente que o Sol está em repouso. Em outras palavras, não há qualquer evidência do

⁴¹⁸ CW, p.802.

movimento do Sol.⁴¹⁹ No segundo caso, Newton não cita o corolário 6 da proposição 4 (do Livro I) porque ele é um corolário específico para *órbitas circulares*.

Clark Glymour se questionou a respeito do fato de Newton preferir usar a proposição 4 para justificar a força do tipo inverso quadrado para os planetas primários em vez de usar a proposição 11, das órbitas elípticas, que ele mesmo demonstrara no Livro I, em associação com a primeira lei de Kepler, amplamente reconhecida pelos astrônomos. Glymour também se questiona sobre a validade da proposição 4 na aplicação para os planetas primários uma vez que essa proposição era direcionada para corpos se movendo em órbitas circulares, o que Newton bem sabia que não era o caso.⁴²⁰ Com efeito, como foi destacado na seção 9.2, os fenômenos 3, 4 e 5 não se pronunciam a respeito da forma das órbitas dos planetas primários. Pelo fenômeno 5 ficou claro que essas órbitas não eram circulares, porém Newton não assumiu que essas órbitas seriam necessariamente elípticas, como Kepler admitiu. E a razão que fornecemos foi meramente por Newton acreditar que Kepler não havia fornecido uma sólida evidência experimental ou matemática para essa hipótese.

A respeito disso convém lembrar do diálogo entre Newton e Halley a respeito da reivindicação de prioridade de Hooke, em que o professor lucasiano deixa transparecer indiretamente a sua posição sobre as órbitas elípticas de Kepler. Ele declara que da mesma forma que o Sr. Hooke sabia que a proporção do inverso quadrado se observava aproximadamente, e apenas “supôs” (guessed) que fossem válidas exatamente – “e supôs (guessed), erradamente, se estender essa proporção até ao centro [do Sol]” – assim também “Kepler sabia que as órbitas não eram circulares mas ovais, e supôs (guessed) que eram elípticas (...)”, embora, diferentemente de Hooke, ele tenha “suposto (guessed) corretamente sobre a elipse”.⁴²¹ Embora Newton estivesse focando em Hooke nessa carta, não restam dúvidas de que para ele as elipses representavam apenas um “palpite” de Kepler. A prova disso é que elas jamais figuraram entre os “fenômenos” dos *Principia*. Posto isso, percebe-se que estava simplesmente vedado a Newton o caminho de utilizar a proposição 11 do Livro I (força centrípeta em órbitas elípticas) para demonstrar a proporção da força atuando nos planetas primários, uma vez que essa proposição assumiria uma premissa que não fora prevista entre os fenômenos.

Sobre o detalhe de Newton ter usado uma proposição específica para órbitas circulares (prop.4) no caso dos planetas primários, cujas órbitas eram reconhecidamente não circulares

⁴¹⁹ Harper também notou esse detalhe. Harper, 2011, p.116.

⁴²⁰ Glymour, 1980, p.207-208. Veja também Harper, 2011, p. 119.

⁴²¹ Newton a Halley, 20 de Junho de 1686. *Correspondence*, vol. 2. Veja também Cohen, 1999, p.21.

(e isso admitido pelo próprio Newton nos fenômenos) cabe ressaltar que a confusão decorre do fato de Newton não especificar o corolário a que ele estava se referindo, a saber, o corolário 8. Conforme foi mencionado nas seções 7.3.2 e 7.7, o corolário 8 da proposição 4 é um corolário obscuro, fácil de passar despercebido, mas que trata de uma generalização dos resultados das órbitas circulares para outras formas de órbitas, demonstrado parcialmente apenas na proposição 15 do Livro I. Trata-se, portanto, de um resultado que não é válido apenas para órbitas circulares. Como esse corolário foi incluindo um tanto deslocadamente por Newton numa proposição específica sobre corpos se movendo em órbitas circulares, está justificada a estranheza que gerou entre alguns comentadores.⁴²² Desfeita essa confusão, cabe dizer que, de fato, o corolário 8 da proposição 4 é um caminho alternativo para inferir a lei do inverso quadrado sem que haja necessidade de assumir uma forma específica para as órbitas dos planetas primários. Na situação 11 da tabela 6 apresentei a síntese desse caminho alternativo.

Voltemos agora às três partes da proposição 2, e à sua demonstração. A primeira e a segunda parte da proposição é demonstrada rigorosamente da mesma maneira que na proposição 1, então não é necessário que explicitemos novamente esses dois primeiros passos dedutivos. A terceira parte, no entanto, que até o momento era discutida, merece ser evidenciada. Explicitando-a na forma de um silogismo, teremos:

1. Todo conjunto de corpos que descrevem órbitas fechadas (ovais), semelhantes, que obedecem a lei das áreas e a lei harmônica em relação a um ponto interno em comum das órbitas estão, necessariamente, sob a ação de uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância até esse ponto (Prop. 4, cor. 8, e prop. 15; Situação 11, tab. 6).
2. Os planetas primários são um conjunto de corpos que descrevem órbitas fechadas, semelhantes, que obedecem a lei das áreas e a lei harmônica em relação a um ponto interno em comum da órbita, a saber, o centro do Sol (Fen. 4 e 5).
3. Logo, os planetas primários estão sob a ação de uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância até o centro do Sol.

⁴²² Harper também chamou a atenção para essa demonstração “indireta” de Newton, e relembra as queixas de Glymour. Ele observou, como eu aqui, que as órbitas elípticas não estão entre os fenômenos de Newton. Entretanto, ofereceu uma resposta ligeiramente diferente para a proporção do inverso quadrado da força atuando nos planetas primários. A lei harmônica de Kepler considerava os movimentos planetários em órbitas elípticas equivalente ao movimento uniforme numa órbita circular cujo raio seria igual a distância média do planeta ao Sol. De fato, como mostrei na seção 7.7, Newton demonstra essa equivalência na proposição 15 do Livro I. No entanto, essa demonstração ainda depende da assunção das órbitas elípticas. Harper, 2011, p. 139, 141.

Os planetas primários estão sob ação de uma força, essa força é direcionada para o centro do Sol, e é proporcional ao inverso do quadrado da distância até esse centro. Está demonstrada a proposição 2 do Livro III.

O argumento da proposição 2, entretanto, não termina aí. Newton oferece o que aparenta ser uma demonstração alternativa. Na sequência do seu comentário à proposição 2, ele afirma:

Mas a segunda parte dessa proposição é provada com grande exatidão a partir do fato que os afélios [das órbitas] estão em repouso. Porque o menor desvio da razão do quadrado resultaria necessariamente (pelo Livro 1, prop.45, corol. 1) num perceptível movimento dos apsides numa única revolução e um movimento imenso dos mesmos em muitas revoluções.⁴²³

Nessa passagem, Newton cita os estudos da seção 9 do Livro I dos *Principia*, nos quais ele empreende uma sofisticada investigação matemática sobre “o movimento dos corpos em órbitas móveis, e o movimento dos apsides”. Os “apsides” de um órbita são os pontos extremos de uma órbita excêntrica. São os *apsis* dessas órbitas. No caso das órbitas dos planetas primários em torno do Sol esses *apsis* coincidem com o afélio e periélio, o ponto mais afastado e mais próximo do planeta até o Sol, respectivamente, e no caso da Lua, coincide com a apogeu e perigeu, o ponto mais afastado e mais próximo da Lua até a Terra, respectivamente. A figura abaixo ilustra os *apsides* das órbitas excêntricas da Terra e da Lua.

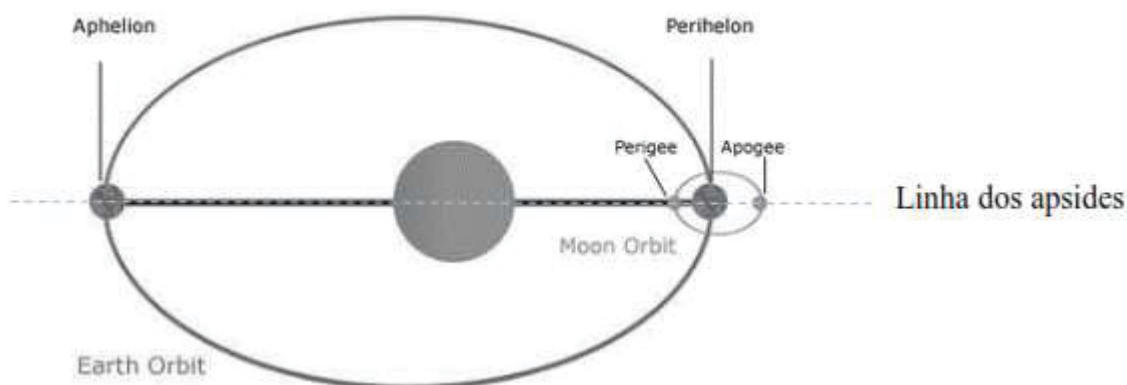


Figura 67 – Apsides das órbitas da Terra e da Lua. Obs.: Figura fora de escala
Fonte: domínio público

⁴²³ CW, p.802.

Na proposição 43 Newton se questiona se seria possível que um corpo numa órbita excêntrica revolucionasse em torno de um centro ao mesmo tempo em que o próprio plano da órbita sofresse, ele mesmo, uma revolução, e que o movimento do corpo na órbita giratória fosse exatamente o mesmo que ele descreveria caso o plano da órbita estivesse em repouso. Esse é o famoso “problema das órbitas giratórias” dos *Principia*. Em termos mais contemporâneos, trata-se um problema sobre o movimento de *precessão* das órbitas, ou melhor, o movimento de rotação da linha dos apsides a partir de um eixo sobre o centro de forças.

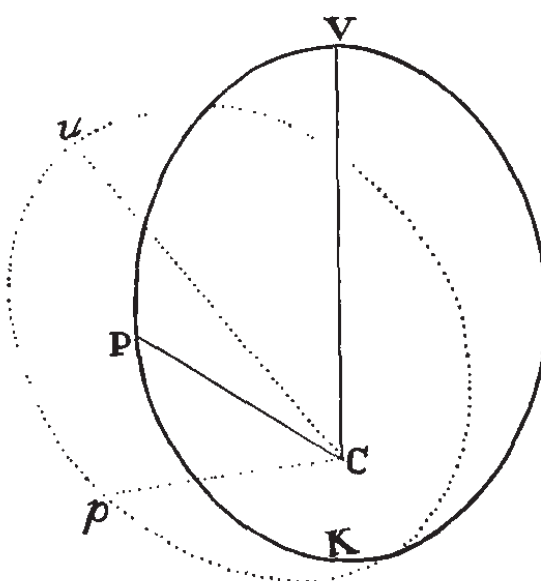


Figura 68 – Órbita Giratória.
Fonte: MC, p.135.

Em primeiro lugar Newton demonstra que é possível que haja um movimento semelhante a esse (proposição 43). Em seguida, ele usa todo o seu instrumental e talento matemático para demonstrar que tipo de condições seriam necessárias para que um corpo descrevesse uma órbita excêntrica e ao mesmo tempo essa órbita sofresse, ela mesma, um movimento de precessão dos seus apsides. Não sem um considerável esforço, Newton concluiu (no corolário 1 da proposição 45) que se um corpo descrevesse uma órbita que precessiona, o que implicaria pelos seus desenvolvimentos anteriores numa força centrípeta proporcional a uma certa potência da distância, essa potência poderia ser determinada pelo movimento angular de precessão dos apsides da órbita, e conversamente. Harper ofereceu uma útil formulação para esse corolário em termos mais atuais. Sendo p o ângulo de

precessão da órbita por revolução e n a potência da distância do centro de forças, a relação entre p e n seria dada por:

$$n = \left(\frac{360}{360 + p} \right)^2 - 3 \quad [50]$$

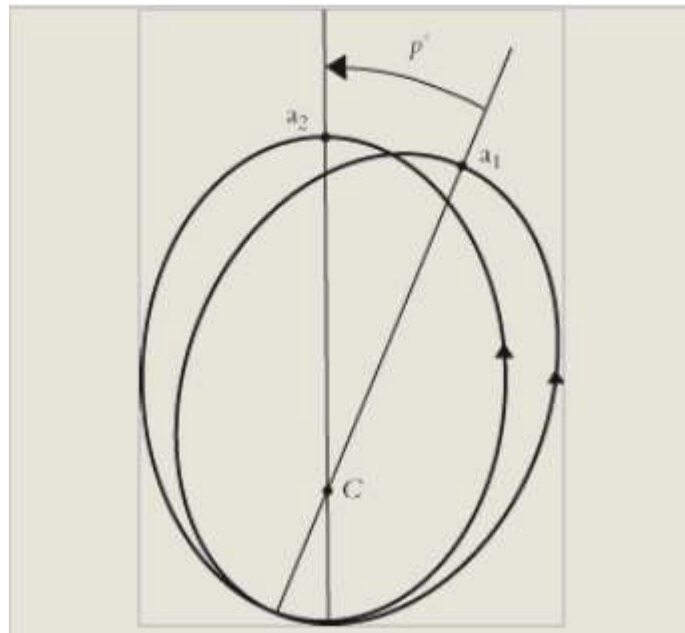


Figura 69 – Ângulo de precessão da órbita giratória
Fonte: Harper, 2011, p.121.

Caso o ângulo de precessão por revolução fosse $p = 0$, ou seja, não houvesse precessão, então, pela equação [50], teríamos:

$$n = -2$$

Ou seja, a força centrípeta seria:

$$F_C \propto D^{-2}$$

ou

$$F_C \propto \frac{1}{D^2}$$

O que corresponde a uma força do tipo inverso do quadrado da distância.

Caso o ângulo de precessão por revolução fosse $p = 30^\circ$, por exemplo, então $n = -2,14$, e a força centrípeta seria:

$$F_c \propto \frac{1}{D^{2,14}}$$

E assim por diante.

Genericamente, o resultado da proposição 45 de Newton estabelece que a precessão de uma órbita excêntrica implica necessariamente numa força centrípeta com uma determinada potência n da distância, e conversamente, conforme a relação abaixo.

$$\text{precessão da órbita} \leftrightarrow F_c \propto D^n \quad [51]$$

Onde n é sempre menor que 3 ou maior ou igual a 2, e tem seu valor fornecido pela equação [50].

Pelos exemplos acima é possível perceber que mesmo o menor desvio na proporção do inverso quadrado da distância da força centrípeta de um corpo descrevendo uma órbita excêntrica produziria uma precessão considerável nos *apsides* dessa órbita. É precisamente esse o argumento alternativo de Newton a favor da proporcionalidade da força variando com o inverso do quadrado da distância até o Sol para os planetas primários. Ele afirma que essa proporção é “provada com grande exatidão” pelo fato que “os afélios [das órbitas] estão em repouso”. E esse seria um fenômeno astronômico facilmente observável, pois mesmo que o ângulo de precessão fosse muito pequeno, ainda assim seria possível perceber a precessão da órbita ao longo de muitas revoluções.

Esse argumento alternativo adquire uma relevância especial quando se tem alguma incerteza não desprezível nos dados das distâncias e períodos que informam a lei harmônica, o que poderia levar a conclusão de uma lei de força centrípeta apenas aproximadamente proporcional ao inverso do quadrado da distância, e não *exatamente*. Isso pode ser mais claramente percebido na reformulação do argumento de Newton na forma contrafactual:

1. Todo corpo sob ação de uma força aproximadamente – mas não exatamente – proporcional ao inverso do quadrado da distância irá desenvolver um movimento de precessão da órbita (Prop. 45, Livro I).
2. Os planetas primários são corpos sob ação de uma força ou exatamente ou aproximadamente proporcional ao inverso do quadrado da distância em que *não se observa precessão* das suas órbitas.
3. Logo, os planetas primários estão sob a ação de uma força *exatamente* proporcional ao inverso do quadrado da distância.

Seguramente, portanto, no caso dos planetas primários, há uma força neles atuando, essa força é direcionada para o centro do Sol, e é proporcional ao inverso do quadrado da distância até o centro desse astro. Como se percebe do exposto acima, a menção à imobilidade dos apsides das órbitas dos planetas não é apenas uma “demonstração alternativa” oferecida por Newton. Trata-se de uma parte importante da própria demonstração da proposição, uma vez que a observação da lei das áreas e dos períodos não poderia ser tomada de forma exata. Volto a discutir esse ponto de forma mais aprofundada no capítulo 15.

10.3 PROP. 3: A FORÇA CENTRÍPETA ATUANDO NA LUA

A proposição 3 do Livro III declara:

Proposição 3 – Teorema 3

A força pela qual a Lua é mantida na sua órbita é [1] direcionada para a Terra e é [2] inversamente proporcional ao quadrado da distância das suas posições até o centro da Terra.

A primeira parte desse enunciado é evidente do fen. 6 e da prop. 2 ou prop. 3 do Livro I, e a segunda parte do movimento muito lento do apogeu da Lua.⁴²⁴

Da mesma maneira que nas proposições 1 e 2, a proposição 3 pode ser dividida em três partes: (1) há uma força contínua atuando na Lua; (2) essa força é direcionada ao centro da Terra; e (3) essa força é proporcional ao inverso do quadrado da distância da Lua até o centro da Terra. As duas primeiras partes são demonstradas da mesma forma que nas proposições 1 e 2. Pelo fenômeno 6, a Lua percorre uma trajetória curvilínea que obedece a lei das áreas em relação ao centro da Terra e, portanto, está sob ação de uma força contínua, e essa força é direcionada para o centro do nosso planeta. A terceira parte, entretanto, segue

⁴²⁴ Ibid.

uma argumentação distinta. Como o leitor deve recordar, a lei harmônica para o caso da Lua e Terra não figura entre os fenômenos de Newton. E isso por uma razão muito simples: a Terra possui um único satélite. A proporcionalidade entre o quadrado dos períodos e o cubo dos raios simplesmente não pode ser avaliada a partir de um satélite único. A utilização da lei harmônica para inferir a proporção do inverso quadrado, por conseguinte, está descartada.

Mas como Newton justificou a proporção do inverso quadrado para o caso da Lua? Parcialmente, pelo mesmo “argumento alternativo” utilizado para os planetas primários. “A segunda parte”, diz Newton, é evidente pelo “movimento muito lento do apogeu da Lua”. Ele recorre a proposição 45 do Livro I. Como já sabemos, esta proposição estabelece os resultados a respeito da precessão dos apsides das órbitas.

Desde a antiguidade as irregularidades do movimento da Lua já eram conhecidas pelos astrônomos. Por volta do séc. XVII já havia um vasto compêndio de dados e tabelas que procuravam descrever as minúcias do movimento do único satélite terrestre. A mais avançada teoria do movimento da Lua desenvolvida antes de Newton foi oferecida por Jeremiah Horrocks (1618-1641 d.C.), na qual as inequalidades da Lua foram interpretadas como uma variação na posição do apogeu e na excentricidade da sua órbita. Provavelmente, a descrição horrockiana do movimento lunar foi o que levou Newton a investigar sob quais condições de força seria possível uma precessão nos apsides da órbita de um corpo, o que gerou os estudos seção 9 do Livro I dos *Principia*.

Na proposição presentemente em análise, Newton menciona que há um movimento do apogeu da Lua, porém um movimento “muito lento”. Apenas “três graus e três minutos” por revolução. Ou seja, pelas relações [50] e [51] a força centrípeta atuando na Lua seria inversamente proporcional à distância elevada à potência $2\frac{4}{243}$, ou à potência 2,016. Em outros termos, pelo “movimento muito lento do apogeu da Lua”, ou, de outro modo, pela levíssima precessão dos seus apsides (apenas 3° e 3’), a proporcionalidade da força centrípeta poderá ser expressa por:

$$F_C \propto \frac{1}{D^{2,016}}.$$

Ora, o leitor dirá esse resultado prova precisamente o contrário do que Newton procura estabelecer na proposição. O movimento dos apsides da órbita da Lua revela que a força atuando nesse satélite *não é* proporcional ao inverso do quadrado da distância, embora o possa ser *aproximadamente*. No entanto, vale dizer que esse resultado não exclui cabalmente a

possibilidade de haver ao menos *uma* força proporcional ao inverso do quadrado da distância atuando na Lua. No corolário 2 da proposição 45 do Livro I, Newton mostra que se uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância for conjugada a uma segunda força muito menor, a composição dessas duas forças pode gerar uma força ligeiramente desviada do inverso do quadrado. Evidentemente, ele defendeu a ocorrência dessa última opção. Afirmou, no entanto, que a confirmação dessa possibilidade só ocorrerá nas proposições seguintes. Na presente proposição, ele oferece apenas um indício preliminar dessa convicção. “Com efeito, o movimento do apogeu emerge da ação do Sol (...) e, dessa maneira, deve ser ignorado aqui”.

A argumentação prévia que Newton apresenta a favor da proporção exata do inverso quadrado para o caso da Lua se fundamenta em três razões. Em primeiro lugar, a potência da distância é muito mais próxima do quadrado que cubo. Nas palavras de Newton “está 59,75 vezes mais próxima do quadrado do que do cubo”. Conforme foi informado na seção anterior, as possibilidades de órbitas giratórias estão restritas a potências das distâncias entre 2 e 3. No caso da suposta ocorrência de uma composição de forças, a probabilidade de uma das forças ser proporcional ao inverso do quadrado da distância é muito maior do que aquela da força ser proporcional ao inverso do cubo da distância.

A segunda razão apresentada por Newton está relacionada com a “ação do Sol”. Newton se refere a uma suposta ação do Sol sobre a Lua. Essa “ação” seria a componente da força centrípeta atuando na Lua em direção ao Sol que produziria uma distorção na sua órbita. Como o leitor deve lembrar, os “fenômenos” de Newton são neutros em relação ao sistema heliocêntrico copernicano e ao sistema geocêntrico tychonico. Em outras palavras, o Sol (e os planetas primários em torno dele), além da Lua, tanto podem revolver em torno da Terra, quanto a Terra (e a Lua em torno dela) podem revolver em torno do Sol. No primeiro caso, a Lua sofreria apenas uma força centrípeta em direção à Terra. Mas no segundo caso, a Lua estaria sob ação de uma força centrípeta em direção a Terra e de outra em direção ao Sol. Essa força centrípeta em direção ao Sol, por sua vez, pela proximidade do sistema Terra-Lua em relação ao astro maior, produziria componentes de força radiais não desprezíveis que contribuiriam para o desvio na proporção do inverso do quadrado da força centrípeta em direção à Terra.⁴²⁵ Portanto, essa “ação do Sol” a que Newton se refere é a componente não desprezível da força centrípeta da Lua em direção ao Sol, no caso de um possível sistema heliocêntrico, que se somaria à força centrípeta em direção à Terra, produzindo um desvio na sua proporção do inverso quadrado. Na proposição 3, por conseguinte, Newton adianta que o

⁴²⁵ Pelas distâncias do Sol, os satélites de Júpiter e Saturno não apresentaria componentes de forças consideráveis para desviar a força centrípeta para esses planetas da proporção do inverso do quadrado.

Sol pode bem ser a justificativa para o aparecimento de uma “segunda força” responsável pelo desvio da proporção do inverso quadrado.

A terceira razão apresentada por Newton está relacionada à convergência entre as suas estimativas para a possível interferência da força do Sol sob a órbita da Lua e os resultados previstos pela suposição teórica. Admitindo a ocorrência dessa “ação do Sol”, seria possível comparar a ação desse astro com a força centrípeta da Lua em direção à Terra, fazendo uma estimativa na qual se avaliaria a possibilidade de uma ação do Sol gerar uma precessão de aproximadamente 3 graus na órbita da Lua. De fato, Newton realizou “grosseiramente”, como ele disse, essas estimativas no corolário 2 da proposição 45 do Livro I. Caso uma “força estranha” atuasse conjuntamente com uma força proporcional ao inverso do quadrado de modo que a primeira fosse “357,45 vezes menor” que a segunda, então a órbita sofreria uma precessão de $1^{\circ} 31' 28''$. Aqui, na proposição 3 do Livro III, Newton se limitou a declarar que “a ação do Sol, na medida em que desvia a Lua da Terra (...) está para a força centrípeta da Lua, grosso modo, como 2 está para 357,45 ou 1 está para $178\frac{29}{40}$ ”. Em outras palavras, uma possível ação do Sol sobre a Lua geraria uma força estranha precisamente dentro da margem que se esperaria para produzir uma precessão de aproximadamente 3 graus nos seus apsides. No entanto, nesse momento Newton não fornece qualquer justificativa para a estimativa que fez para a “força estranha” do Sol. Ele apenas conclui a argumentação afirmando que “se essa tão pequena força do Sol for ignorada, a força remanescente pela qual a Lua é mantida na sua órbita será inversamente proporcional ao quadrado da distância”.

Embora Newton ressalte que a demonstração dessa proposição dependa do que apresentará em seguida (da prop. 4 e as demais), será proveitoso fazer a explicitação das premissas de Newton para a terceira parte dessa proposição, assim como fiz para as proposições anteriores. Na forma dedutiva, o argumento dessa terceira parte da proposição 3 poderia ser explicitado como se segue:

1. Todo corpo descrevendo uma trajetória fechada que obedece aproximadamente a lei das áreas e cuja órbita sofre precessão está sob a ação de uma força centrípeta dada pela relação [51] (Prop. 45, corolário 1, Livro I).
2. A Lua é um corpo que descreve uma trajetória fechada que obedece aproximadamente a lei das áreas e cuja órbita sofre precessão de $3^{\circ} 3'$ por revolução (Fen.6).⁴²⁶

⁴²⁶ Na minha opinião o fenômeno da precessão da Lua deveria ter sido incluído por Newton entre os “fenômenos” do Livro III. Ele não incluiu, mas o utiliza aqui, portanto deve ser considerado como um fenômeno.

3. Logo, a Lua está sob ação de uma força centrípeta *aproximadamente* proporcional ao inverso do quadrado da distância ($D^{-2,016}$).

O fenômeno do movimento de precessão do apogeu da Lua, juntamente com a proposição 45 do Livro I, portanto, levam a conclusão de uma força com proporção muito próxima do inverso do quadrado da distância. Uma inferência da proporção do inverso quadrado *exata*, com base nos argumentos adicionais de Newton nessa proposição, ainda que inconclusivos, poderia ser expresso como se segue:

1. Todo corpo que descreve uma órbita que sofre precessão de $3^{\circ} 3'$ por revolução está sob a ação (i) ou de *uma* força proporcional ao inverso de $D^{-2,016}$; (ii) ou de *duas* forças, uma proporcional ao inverso de D^2 e outra 178,725 vezes menor que a primeira; (iii) ou de duas forças, uma proporcional ao inverso de D^3 e outra X vezes menor que a primeira; (iv) ou ainda outras várias e possíveis configurações de composições de forças. (Prop. 45, cor. 2; e Lei 2 do Livro I).
2. A Lua é um corpo que descreve uma órbita que sofre precessão de $3^{\circ} 3'$ por revolução e está sob a ação de duas forças sendo uma delas em direção ao centro da Terra e a outra em direção ao Sol, esta última produzindo uma componente na direção radial da Terra 178,725 vezes menor que a primeira (Fenômenos introduzidos na prop. 3 do Livro III).
3. Logo, a Lua está sob ação de uma força proporcional ao inverso de D^2 (em direção à Terra) e outra, em direção ao Sol, que produz uma componente na direção radial da Terra 178,725 vezes menor que a primeira.

Evidentemente o leitor deve ter notado que esse argumento é inconclusivo principalmente em razão das dúvidas relativas à premissa 2. À essa altura do Livro III, não é certo que haja uma força em direção ao Sol, atuando na Lua, perturbando o movimento desse astro. Como vimos, a evidência apontada por Newton para a ação de uma força em direção ao Sol é o movimento orbital dos planetas primários em torno dessa estrela, mas pelos fenômenos de Newton não é certo que a Terra ou Lua orbitem igualmente em torno do Sol. Portanto, nesse ponto da argumentação, não há fenômeno que sustente a inferência acima apresentada. Além disso, ainda que houvesse uma segunda força atuando na Lua em direção ao Sol, não é igualmente certo que essa força produziria uma componente cerca de 178 vezes menor que a força em direção à Terra. Nessa proposição, Newton não dá detalhes de como

chegou nesse número. Desse modo, para que o argumento de Newton a favor da proporção do inverso quadrado para a Lua tenha validade ele precisa demonstrar que (1) há uma força atuando na Lua em direção ao Sol;⁴²⁷ e (2) essa força produz uma componente radial cerca de 178 vezes menor que a força que atua na Lua em direção à Terra. Caso consiga demonstrar esses dois elementos nas proposições seguintes, estará estabelecida a validade da proposição 3. Por ora, Newton pede que o leitor aceite que há uma força atuando na Lua, que essa força seja direcionada para o centro da Terra, e que seja exatamente proporcional ao inverso do quadrado da distância.

10.3.1 A hipótese da “força estranha” do Sol atuando a Lua

Como foi mencionado na seção anterior, para que o argumento de Newton a favor da proporção do inverso quadrado para a Lua tenha validade ele precisaria demonstrar, primeiro, que há uma força atuando na Lua em direção ao Sol e, segundo, que essa força produz uma componente radial cerca de 178 vezes menor que a força que atua na Lua em direção à Terra. Newton apresenta a demonstração desse segundo ponto somente na proposição 25 do Livro III, porém será proveitoso antecipá-la para esse momento, até porque ela não requer muitos elementos que já não estejam supostos na proposição 3. Naturalmente, a essa altura a referida proposição não terá o peso de uma “prova”, uma vez que sequer se mostrou que de fato há qualquer “ação do Sol” atuando na Lua. Todavia, será instrutivo proceder como o próprio Newton certamente procedeu aqui: admitir ao menos como uma hipótese a ação do Sol sobre a Lua, e determinar algumas consequências matemáticas dessa hipótese.

O ponto de partida básico que Newton admite para fazer a estimativa da proporção entre a suposta “ação do Sol” atuando na Lua e a força centrípeta da Lua em direção à Terra é que a Lua sofra, assim como os demais planetas primários, uma força centrípeta em direção ao Sol proporcional ao inverso do quadrado da distância até o centro desse astro. A hipótese de Newton é razoável nesse ponto do raciocínio, pois o sistema copernicano, como já disse anteriormente, era uma possibilidade concreta e viável, embora até o momento não houvesse qualquer fenômeno conclusivo que o endossasse. Cabe dizer, contudo, que Newton não precisaria admitir que essa “ação do Sol” fosse uma “força de atração”, ou qualquer coisa do

⁴²⁷ Como alertei mais acima, a ação do Sol poderia ser estabelecida pela admissão do sistema copernicano. No entanto, como veremos mais adiante esse não é o único caminho. Caso se encontre qualquer outro meio de justificar a ação de uma força na Lua em direção ao Sol que não seja pelo movimento da Lua e da Terra em torno do Sol, esse meio também pode ser considerado válido. Como se mostrará na sequência, é exatamente isso o que irá ocorrer.

gênero, para introduzir a hipótese. Bastaria ele admitir que, embora não houvesse qualquer fenômeno definitivo, a Terra e a Lua poderiam bem estar em órbita em torno do Sol, o que por si só já justificaria a admissão da suposição de uma “força estranha” em direção ao centro do Sol, além daquela em direção ao centro da Terra.

Pois bem, caso a Lua sofresse uma força em direção ao Sol proporcional ao inverso do quadrado da distância, quantas vezes a componente radial dessa força seria menor que a sua força centrípeta em direção à Terra?

Na proposição 25 do Livro III é proposto o problema: “encontrar a força do Sol que perturba o movimento da Lua”. Porém, no tratamento oferecido ao problema se remete à solução apresentada na proposição 66 do Livro I. Essa proposição, no entanto, é a maior proposição dos *Principia*, com 22 corolários. Trata-se do famoso e difícil “problema dos três corpos”, longamente debatido ao longo dos últimos três séculos. Por essa razão, não será possível nessa dissertação aprofundar nos detalhes dessa proposição. Em vez disso, apresentarei uma análise abreviada, usando alguns recursos matemáticos familiares, para evitar se estender aqui mais do que pretendo para um ponto bastante específico.⁴²⁸

Consideremos um sistema composto pela Terra, Lua e Sol, admitindo que tanto a Terra quanto a Lua sofram uma “ação do Sol”, ou uma “força” proporcional ao inverso do quadrado da distância em direção ao centro do Sol. Consideremos também que as forças entre os três astros sejam representadas por *vetores*, como estamos acostumados atualmente, e que o desenho esteja com a sua escala propositadamente bastante alterada. Teremos, então, a seguinte configuração:

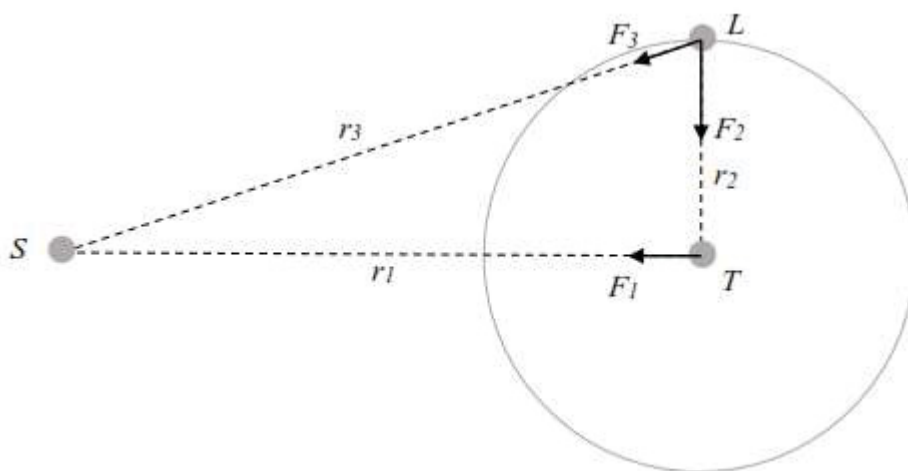


Figura 70 – Diagrama vetorial do problema dos três corpos. Prop. 66, Livro I.
Fonte: o autor.

⁴²⁸ Veja mais sobre a proposição 66 no APÊNDICE C.

onde F_1 e F_3 são as forças atuando na Terra e Lua em direção ao Sol, e F_2 , a força centrípeta atuando na Lua em direção à Terra; e r_1 , r_2 e r_3 , as distâncias correspondentes entre os astros indicados na figura.

Pelo corolário 2 e 8 da proposição 4 do Livro I, a proporção da força centrípeta atuando num corpo se movendo em uma trajetória fechada que obedece a lei das áreas pode ser dada pela proporção [19]:

$$F_c \propto \frac{r}{T^2}$$

onde r é o raio da órbita ou a distância média até o centro de força, e T é o período de revolução do corpo. Assim, temos que as forças indicadas na figura podem ser expressas pelas proporções abaixo:

$$F_1 \propto \frac{r_1}{T_1^2} \quad [52]$$

$$F_2 \propto \frac{r_2}{T_2^2} \quad [53]$$

$$F_3 \propto \frac{r_3}{T_3^2} \quad [54]$$

onde T_1 , T_2 e T_3 são os períodos da Terra em torno do Sol, da Lua em torno da Terra e da Lua em torno do Sol, respectivamente.

A força oblíqua F_3 na figura pode ser decomposta em duas componentes, uma paralela à F_1 e outra em direção ao centro da Terra, que pode ser chamada de F_e (“força estranha”).

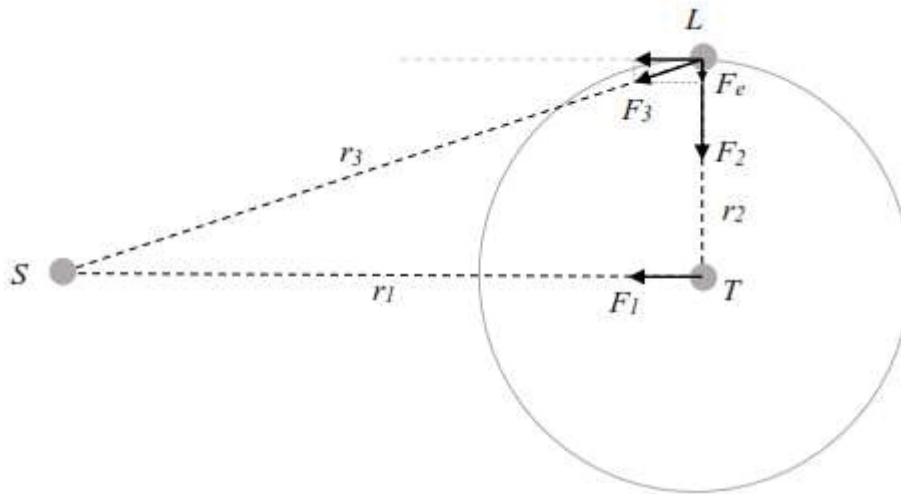


Figura 71 – Diagrama vetorial da “Força estranha” do Sol atuando na Lua
Fonte: o autor

Do triângulo STL e do triângulo semelhante a este formado pelas forças F_3 e F_e com L, podemos retirar a seguinte proporção:

$$\frac{F_e}{F_3} = \frac{r_2}{r_3}$$

Entretanto, se a distância entre o sistema Terra-Lua e o Sol for consideravelmente maior que a distância entre a Terra e a Lua, podemos admitir que r_3 é aproximadamente igual a r_1 e, da mesma forma, $F_3 = F_1$. Assim, a proporção acima ficará:

$$\frac{F_e}{F_1} = \frac{r_2}{r_1} \quad [55]$$

Combinando as proporções [52] e [55], teremos para a força estranha:

$$F_e = \frac{r_2}{T_1^2} \quad [56]$$

Consequentemente, combinando [56] com [53], a proporção entre a força estranha (F_e) que decorre da “ação do Sol” e a força centrípeta da Lua em direção a Terra (F_2) será dada por:

$$\frac{F_e}{F_2} = \frac{T_2^2}{T_1^2} \quad [57]$$

Que é o resultado que Newton apresenta no corolário 17 da proposição 66 do Livro I.

Na proposição 25 do Livro III se fornece os períodos de revolução da Terra em torno do Sol e da Lua em torno da Terra. $T_1 = 365$ dias, 6 horas e 9 minutos. $T_2 = 27$ dias, 7 horas e 43 minutos. Logo, a proporção entre as forças referidas será:

$$\frac{F_e}{F_2} = \frac{1}{178,725} \quad [58]$$

Portanto, a “ação do Sol” sobre a Lua está para a força centrípeta da Lua em direção à Terra assim como 1 está para $178\frac{29}{40}$. Não é difícil mostrar que esse resultado é válido para qualquer posição que a Lua ocupe na órbita da Terra.

Na proposição 3, analisada na seção anterior, Newton apresenta um corolário único que foi aqui omitido e que é o prelúdio para a proposição 4 que será introduzida na sequência. É oportuno citar esse corolário agora:

Corolário.

Se a força centrípeta média pela qual a Lua é mantida na sua órbita é aumentada primeiro na razão de $177\frac{29}{40}$ para $178\frac{29}{40}$, depois também na razão do quadrado do semidiâmetro da Terra para a distância média do centro da Lua até o centro da Terra, o resultado será a força centrípeta lunar na superfície da Terra, supondo que essa força, ao descer até a superfície da Terra, é continuamente aumentada na proporção do inverso do quadrado da altura.⁴²⁹

Nesse o corolário, Newton oferece uma relação para a determinação da “força centrípeta lunar na superfície da Terra”, numa situação hipotética em que o raio da órbita coincida com o raio da Terra. O corolário afirma que essa força pode ser obtida pela proporção:

$$\frac{F_M}{F_C} = \frac{177,725}{178,725} \cdot \frac{r_T^2}{r_{TL}^2}$$

ou

$$F_C = F_M \frac{178,725}{177,725} \cdot \frac{r_{TL}^2}{r_T^2} \quad [59]$$

⁴²⁹ CW, p.803.

onde F_C é a “força centrípeta lunar na superfície da Terra” e F_M é a “força centrípeta média pela qual a Lua é mantida na sua órbita”, e r_{LT} e r_T são as distâncias do centro da Terra até o centro da Lua e a o raio da Terra, respectivamente. A “força centrípeta média pela qual a Lua é mantida na sua órbita” (F_M), na verdade, é a força centrípeta proporcional a $D^{-2,016}$, ou, de modo equivalente, a força centrípeta da Lua na sua órbita (proporcional a D^{-2}) combinada com a “ação do Sol”, o que propicia uma análise matemática mais fácil.

É possível analisar esse corolário pela figura 74. Se consideramos somente as forças radiais atuando na Lua perceberemos que a *força resultante* (F_R) atuando nesse satélite pode ser expressa como:

$$F_R = F_2 + F_e \quad [60]$$

Combinando [58] e [60], temos:

$$F_R = F_2 + \frac{F_2}{178,725}$$

E, portanto,

$$F_R = \frac{179,725}{178,725} F_2$$

ou

$$F_2 = \frac{178,725}{179,725} F_R \quad [61]$$

Em certas posições da órbita da Lua, no entanto, a “força estranha” do Sol não irá se adicionar à força centrípeta F_2 , mas se subtrair. É o caso quando a Lua está na *sizígia*, ou seja, em *conjunção* ou *oposição* com o Sol, conforme indica a figura abaixo:

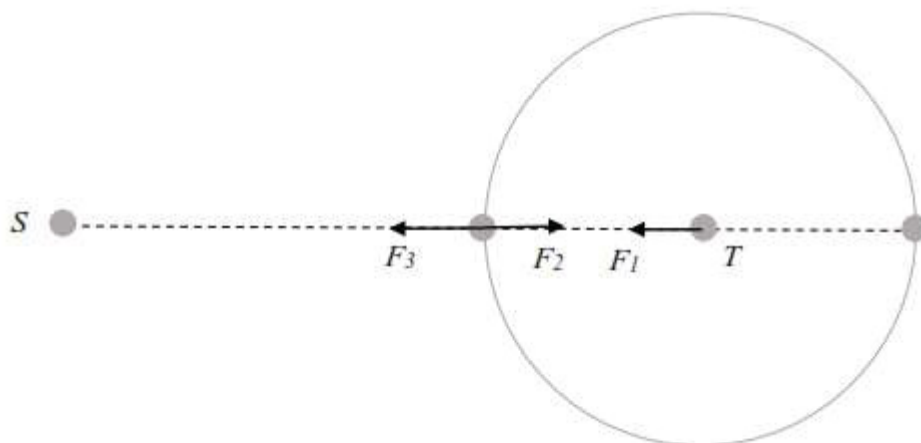


Figura 72 – “Força estranha” durante a *sizígia*.
Fonte: o autor

Nesse caso específico temos que:

$$F_R = F_2 - F_e^{430}$$

$$e$$

$$F_R = \frac{177,725}{178,725} F_2$$

$$ou$$

$$F_2 = \frac{178,725}{177,725} F_R \quad [62]$$

Como a força centrípeta da Lua em direção à Terra (F_2) ainda é proporcional ao inverso do quadrado da distância, na superfície da Terra, a proporção entre a força centrípeta na órbita e na superfície será:

$$\frac{F_2}{F'_2} = \frac{r_T^2}{r_{TL}^2} \quad [63]$$

onde F'_2 é a força centrípeta da Lua na superfície da Terra.

⁴³⁰ Por que no caso da *conjunção* a pequena diferença entre as distâncias da Terra até o Sol e da Lua até o Sol faz com que a Lua “caia” em direção ao Sol com maior força acelerativa que a Terra, gerando, portanto, uma diferença de aceleração que é equivalente a uma força acelerativa atuando na Lua na direção do afastamento desta em relação à Terra. Na *oposição*, a situação se inverte, no entanto, também há uma pequena força acelerativa de afastamento entre a Terra e a Lua.

Combinando [62] e [63], teremos:

$$F'_2 = F_R \frac{178,725}{177,725} \frac{r_{TL}^2}{r_T^2} \quad [64]$$

que é a mesma proporção [59], substituindo F'_2 por F_C e F_R por F_M .

A força centrípeta da Lua na superfície da Terra, portanto, pode ser determinada pela força que mantém a Lua na sua órbita (F_R) aumentada, primeiro, na proporção de 178,725/177,725, depois, na razão do quadrado da distância entre o centro da Terra e Lua e do raio da Terra. A pertinência desse resultado está diretamente ligada ao “teste da Lua” apresentado na proposição 4 do Livro III. Mas antes de passar a essa proposição, importa enfatizar que o que essa seção revelou é que caso se admita o sistema copernicano (ou seja, que a Terra se movem em torno do Sol e não o contrário) é possível explicar precisamente os 3 graus de precessão do movimento da Lua, mantendo-se a proporção da força centrípeta como proporcional *exatamente* ao inverso do quadrado da distância. É claro que só isso já pesa fortemente em favor dessa hipótese. Mas Newton ainda tem mais a mostrar.

10.4 PROP. 4: A GRAVIDADE COMO CAUSA DA FORÇA CENTRÍPETA DA LUA

A proposição 4 do Livro III é, talvez, a proposição mais conhecida dos *Principia*. É nela que se encontra o famoso experimento de pensamento da “queda da Lua”, ou o “teste da Lua”, como frequentemente é conhecido, uma das mais memoráveis passagens da história da ciência. O objetivo de Newton nessa proposição é demonstrar que a força centrípeta que atua na Lua em direção à Terra é igual à força da gravidade atuando nos corpos terrestres e, portanto, essa última força deve ser a causa da primeira. Vejamos o enunciado de Newton para a proposição 4:

Proposição 4

A Lua gravita em direção à Terra e pela força da gravidade é sempre desviada do seu movimento retilíneo e mantida na sua órbita.⁴³¹

Como fica evidente pela leitura simples do enunciado, nessa proposição Newton continua abordando o caso da Lua, iniciado na proposição 3. Todavia, o fará nesse momento com base em outra perspectiva. Ele considerará a Lua não mais a partir dos fenômenos astronômicos, mas a partir de uma hipótese que supõe que a força centrípeta que desvia esse

⁴³¹ Ibid.

satélite da sua órbita é a mesma força reponsável pela queda dos corpos graves na superfície da Terra. Aqui, vale fazer duas breves observações preliminares. A primeira observação é que a hipótese da proposição 4 não era tão simples de ser admitida no período, como o leitor contemporâneo, imerso num mundo pós-newtoniano, pode ser tentado a pensar. Não custa lembrar novamente que o pensamento da época ainda não havia se desvencilhado totalmente da interpretação aristotélica da queda dos corpos. A “gravidade” ainda era considerada por um número considerável de pensadores do período como uma qualidade tipicamente dos corpos terrestres. E embora não faltassem tentativas de reinterpretação desse fenômeno à luz dos novos parâmetros filosofia mecânica dominante na revolução científica, até aquele momento não havia qualquer proposta que tivesse sepultado definitivamente o entendimento aristotélico.

A segunda observação é sobre a originalidade da hipótese da proposição 4. A hipótese da gravidade ser a causa do movimento da Lua não foi formulada pelo próprio Newton. Conforme foi esclarecido anteriormente, Robert Hooke foi quem primeiramente a sugeriu, impulsionando Newton à investigação que culminou na composição dos *Principia*. Caso fosse possível concluir que a força que mantém a Lua em sua órbita é proporcional ao inverso do quadrado da distância, e que essa força é, além disso, matematicamente compatível com aquela que rege a queda dos corpos na superfície da Terra, então haveria uma contundente evidência a favor da hipótese de Hooke. Resumidamente, é nisso que consiste o “teste da Lua”: comparar com o máximo de precisão possível a força centrípeta que atuaria na Lua próximo à superfície da Terra (supondo que essa força seja proporcional ao inverso do quadrado da distância) com a força da gravidade que atua nos corpos em queda na superfície terrestre, já amplamente estudada e determinada com precisão supreendente à época de Newton.

Mas como Newton procedeu o seu “teste”, exatamente? Em linhas gerais, o “teste da Lua” pode ser estruturado em duas etapas. A primeira etapa é a determinação da força centrípeta que atuaria na Lua numa altura correspondente à superfície da Terra, imaginando que ela fosse privada de todo o seu movimento e se precipitasse, por assim dizer, em direção ao centro da Terra. A segunda etapa é a comparação dessa força com os parâmetros já existentes para a magnitude da força da gravidade na superfície da Terra. Essa segunda etapa não é tão simples como pode parecer à primeira vista. Para efetuar a referida comparação Newton precisaria traduzir os resultados obtidos para a força centrípeta da Lua na superfície da Terra para os mesmos parâmetros comumente empregados para a aferição da força atuando nos corpos graves. No período da composição dos *Principia*, o parâmetro mais preciso para a

aferição da “força da gravidade” era o espaço percorrido por um corpo durante um segundo (1s) de queda. Antes de apresentar propriamente o teste da Lua de Newton será proveitoso acrescentar mais algumas observações sobre mencionado parâmetro de determinação da magnitude da força da gravidade no séc. XVII.

10.4.1 O Pêndulo e o Fenômeno da queda dos corpos

Atualmente o espaço S percorrido por um corpo em queda livre durante um segundo pode ser facilmente determinado pela equação:

$$S = \frac{1}{2} g t^2 \quad [65]$$

onde g é a aceleração da gravidade local e t é o tempo de queda do corpo em segundos. Como se sabe, ao nível do mar $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ e, portanto, o espaço percorrido por um corpo em queda livre no intervalo de tempo de 1s será:

$$S = 4,905 \text{ m.}$$

Um simples cálculo de física elementar. Contudo, à época de Newton essa equação, evidentemente, não havia sido formulada. Conhecia-se apenas a regra de Galileu, que estabelecia a relação de proporcionalidade entre o espaço percorrido e o quadrado dos tempos:

$$S \propto t^2.$$

Comparando essa relação de Galileu com a equação atual [65] é fácil perceber que a constante de proporcionalidade que o matemático italiano desconhecia era o que hoje conhecemos como a aceleração da gravidade (g), ou, mais especificamente $\frac{1}{2}g$, de modo que a equação [65] poderia ser obtida pelo seguinte procedimento:

$$S \propto t^2$$

$$S = kt^2,$$

onde k é uma constante de proporcionalidade. Uma vez determinado que essa constante vale

$$k = 4,905 = \frac{1}{2}g$$

teríamos,

$$S = \frac{1}{2}gt^2.$$

Duas coisas ficam claras no desenvolvimento acima. Primeiro, que o parâmetro atual para a aferição da magnitude da gravidade na superfície da Terra é a medida da *variação da velocidade* de um corpo em queda livre no intervalo de tempo de um segundo, ou o que costumamos chamar de “aceleração da gravidade” (g). No séc. XVII, por outro lado, o parâmetro para a aferição da magnitude da gravidade na superfície da Terra não era a *variação de velocidade* de um corpo em queda livre em um segundo, mas a *distância percorrida* por um corpo em queda livre em um segundo. Um parâmetro que numericamente é a metade do valor do parâmetro atual. Por conveniência chamarei a partir de agora essa distância de S_{1seg} .⁴³²

A segunda coisa que fica claro no desenvolvimento proposto acima é que a constante k (que é equivalente ao S_{1seg}) teve de ser determinada experimentalmente. Harper nos lembra que esse tipo de determinação experimental de constantes é uma das atividades mais árduas do empreendimento científico ao longo da história. E nesse caso não foi diferente.

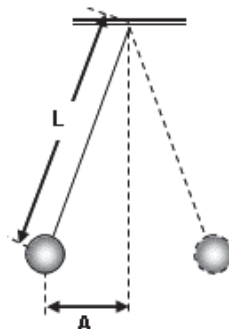
As grandes dificuldades envolvidas na determinação experimental do espaço percorrido por um corpo descendente durante um segundo foram geradas principalmente pela falta de um instrumento suficientemente preciso e próprio para a aferição do tempo de queda.⁴³³ Não é supérfluo lembrar que Galileu usava relógios d’água e as vezes até batimentos cardíacos no objetivo de mensurar um determinado intervalo de tempo. Não é igualmente supérfluo enfatizar a inadequação desses instrumentos para uma medida de tempo com uma exigência maior de precisão. O matemático de Pisa foi um dos primeiros a tentar obter um valor absoluto do espaço percorrido por um corpo descendente durante o intervalo de tempo de um segundo. Usando o seu experimento do plano inclinado e um relógio d’água, Galileu chegou no resultado de $6\frac{1}{2}$ pés parisienses (2,11m) para S_{1seg} .

⁴³² Estou seguindo Harper (2011) aqui.

⁴³³ Harper, 2011, p.196.

Marin Mersene observou que o resultado de Galileu estava muito afastado até mesmo daquilo que a simples experiência cotidiana tornava possível perceber. Por volta de 1636 propôs um experimento usando pêndulos para medir o S_{1seg} .⁴³⁴ Os estudos pioneiros de Galileu sobre os pêndulos haviam estabelecido basicamente quatro leis relacionadas ao período de oscilação desses dispositivos, ou seja, relacionadas ao tempo para as suas massas realizarem uma oscilação completa retornando à posição inicial. Eis as quatro leis:

- i. O período de oscilação é independente do peso dos corpos oscilantes.
- ii. O período de oscilação é independente da amplitude.
- iii. O período varia diretamente com o comprimento do pêndulo. Especificamente, o período varia com a raiz quadrada do comprimento.
- iv. Em qualquer pêndulo, o período das oscilações ocorre em tempos iguais (os pêndulos são isócronos).⁴³⁵



Em síntese, Galileu havia estabelecido que todos os pêndulos são isócronos (o período das oscilações é sempre igual), e a magnitude desse período depende somente do comprimento L do pêndulo, sendo, portanto, independente tanto da massa suspensa M quanto da amplitude de oscilação A .

Mersene procurou determinar o comprimento que deveria possuir um pêndulo para que o tempo de um *swing*, ou seja, de meia oscilação completa, fosse um segundo. (Chamarei esse pêndulo específico de “pêndulo de um segundo” cujo comprimento é L_{1seg}). Após a

⁴³⁴ Veja Mathews, 2000.

⁴³⁵ Para mais detalhes consulte Mathews, 2005.

determinação do comprimento do pêndulo de um segundo, ele idealizou e executou um experimento que consistia em determinar a altura da qual um corpo deveria ser abandonado para que atingisse o solo ao mesmo tempo em que um pêndulo de um segundo percorresse $\frac{1}{2}$ *swing*, ou seja, $\frac{1}{4}$ de uma oscilação completa. O pêndulo foi instalado junto a uma parede, levantado num ângulo de 90 graus, e era abandonado ao mesmo tempo em que um outro corpo era abandonado em queda livre. Quando o som do corpo em queda livre tocando o solo coincidia com o som do pêndulo colidindo com a parede, a metade da distância S_{1seg} era determinada.

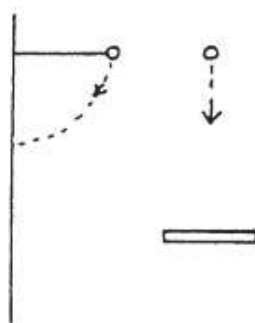


Figura 73 – Experimento imaginado por Mersenne para determinar S_{1seg}
 Fonte: Mathews, 2000, p.117.

O padre francês criticou os resultados de Galileu, pois os valores que ele havia obtido estavam muito distantes dos $6\frac{1}{2}$ pés parisienses do italiano. De acordo com o experimento de Mersenne, o espaço percorrido por um corpo durante um segundo de queda seria cerca de 12 pés parisienses (3,89m).

Embora tenha oferecido um resultado muito mais preciso que o de Galileu, o experimento de Mersenne ainda estava longe de ser um exemplo de exatidão. E ele foi um dos primeiros a observar isso. À parte a óbvia precariedade de ter de se apoiar na percepção auditiva para regular o experimento, ele sabia que a resistência do ar oferecia algumas dificuldades de interpretação. Além disso, e mais importante, ele fez uma descoberta casual que iria, por fim, contribuir para fazê-lo desistir de aperfeiçoar o experimento. Galileu estava errado: o período de oscilação de um pêndulo não era independente da sua amplitude de oscilação. Essa conclusão criava uma situação ainda mais difícil de ser superada. Ao final, Mersenne considerou inviável a construção precisa de um pêndulo de um segundo e, conseqüentemente, uma determinação exata da distância de um segundo de queda. Outros

pensadores, no entanto, conseguiram melhores resultados com o pêndulo que Mersene. Um deles foi o astrônomo jesuíta Giambattista Riccioli.⁴³⁶

De maneira independente de Mersene, em 1645 Riccioli testou as leis do pêndulo de Galileu e concluiu, assim como Mersene, que o período de oscilação de um pêndulo não é independente da amplitude de oscilação. No entanto, ele também constatou que esse período é constante para pequenas amplitudes. Diante dessa constatação Riccioli e seus auxiliares compararam o número de oscilações dos pêndulos com períodos de tempos conhecidos da astronomia, como o dia solar e o dia sideral, por exemplo. Usando esse método, o padre jesuíta foi capaz de determinar com maior precisão o pêndulo de um segundo, e obteve o resultado de $13\frac{2}{3}$ pés parisienses (4,43m) para o S_{1seg} . Ainda que tenha obtido resultados com uma razoável precisão, Riccioli não ficou plenamente satisfeito. Mas as manifestas dificuldades relacionadas à contagem das oscilações durante períodos prolongados de tempo, o levaram a desistir de continuar aperfeiçoando o seu instrumento.

Foi com o trabalho do matemático holandês Christiaan Huygens que a determinação da distância percorrida por um corpo ao longo de um segundo de queda atingiu um nível surpreendente de exatidão. Huygens se envolveu durante décadas na investigação de um pêndulo que seria isócrono para qualquer amplitude de oscilação. No *Horologium Oscillatorium* (1673), Huygens apresentou com maciça fundamentação matemática o projeto do seu pêndulo isócrono. O matemático holandês demonstrou que um pêndulo que seguisse uma trajetória cicloidal não sofreria das mesmas limitações do pêndulo simples de Galileu, que percorria uma trajetória semi-circular. Além de demonstrar geometricamente esse resultado, Huygens também orientou como construir um pêndulo cicloidal por meio de obstáculos com forma definida, e inseridos em posições precisamente determinadas no percurso do fio. Uma das muitas aplicações do tratado de Huygens foi a determinação precisa do comprimento do pêndulo de um segundo e, conseqüente, da constante S_{1seg} . Ele forneceu instruções detalhadas sobre como utilizar o seu pêndulo cicloidal, ou o seu “relógio de pêndulo”, para determinar o comprimento de um pêndulo simples de 1 segundo:

Primeiro, permita que o referido relógio seja regulado por meio de observações das estrelas fixas ao longo de um período de vários dias, usando o método explicado em nossa descrição do relógio. Em seguida, suspenda outro pêndulo simples (...) e o coloque em movimento com um pequeno impulso. Então aumente ou diminua o comprimento do fio até que as suas oscilações, ao longo de um quarto de hora ou meia hora, ocorram em uníssono com o relógio ajustado.⁴³⁷

⁴³⁶ A maior parte dessas informações e das seguintes podem ser encontradas em Harper, 2011.

⁴³⁷ *Horologium* [Blackwell], p.168. Veja também Harper, p.197.

O pêndulo cicloidal de Huygens o permitiu construir um relógio capaz de funcionar durante extensos períodos de tempo, sem perturbação nas oscilações, e dispensando a necessidade do árduo trabalho de permanecer contando as oscilações. Esse relógio poderia ser ajustado usando basicamente o método de Riccioli, comparando-o com os movimentos mais constantes que se tem conhecimento – o movimento dos astros – durante períodos longos de tempo, e sem maiores dificuldades experimentais. Após a regulação desse relógio a determinação do comprimento do pêndulo de um segundo se torna surpreendentemente simples: basta sincronizar as oscilações de um pêndulo simples com as oscilações do relógio, regulando o comprimento do fio, e observar o sincronismo durante cerca de meia hora. Foi determinado, portanto, o comprimento pêndulo de um segundo: $440\frac{1}{2}$ linhas parisienses (0,9935m).

Após determinar o comprimento do pêndulo de um segundo Huygens enuncia, na proposição 26 da parte IV do *Horollogium*, o problema da determinação da distância de um segundo de queda (S_{1seg}):

Proposição 26

Como determinar o espaço que é percorrido por um corpo grave caindo perpendicularmente em um determinado tempo.⁴³⁸

Logo após o enunciado dessa proposição o matemático holandês faz uma breve elucidação das dificuldades conhecidas do antigo problema:

Aqueles que têm previamente estudado esta medição concordam que é necessário consultar os experimentos. Mas os experimentos que tem sido conduzidos até então não fornecem facilmente uma determinação exata dessa medida, por causa da velocidade que os corpos em queda adquirem no fim do seu movimento.⁴³⁹

Huygens, então, segue com a determinação da distância de queda ao longo de 1 segundo. Apresentarei uma versão simplificada para favorecer a compreensão mais imediata do leitor contemporâneo. Desde Galileu já se sabia que o período de oscilação T de um pêndulo simples era proporcional à raiz quadrado do comprimento do fio L . Em símbolos,

$$T \propto \sqrt{L}$$

ou

$$T^2 \propto L$$

⁴³⁸ *Horologium* [Blackwell], p.170-171.

⁴³⁹ Ibid.

ou

$$T^2 = kL \quad [66]$$

onde k é uma constante de proporcionalidade.

Huygens determinou que a constante de proporcionalidade da relação acima poderia ser dada por:

$$k = \frac{\pi^2}{S_{1seg}}.$$

Logo, a equação [66] poderia ser expressa como

$$T^2 = \frac{\pi^2}{S_{1seg}} L \quad [67]$$

Que é equivalente a equação atual que expressa a relação entre o período e o comprimento do fio num pêndulo simples.⁴⁴⁰

É fácil perceber na equação [67] que caso o período de oscilação T seja igual a 2s, portanto 1s para cada *swing*, o comprimento L será igual ao comprimento do “pêndulo de um segundo” (L_{1seg}). Caso o período de oscilação, de outra sorte, seja igual a 1s, portanto $\frac{1}{2}$ s por *swing*, o comprimento do pêndulo será $L_{1seg}/2$. Nesse último caso a equação [67] ficará:

$$1^2 = \frac{\pi^2}{S_{1seg}} \frac{L_{1seg}}{2}.$$

E, portanto,

$$S_{1seg} = \pi^2 \frac{L_{1seg}}{2}.$$

Na forma de uma proporção, a equação acima poderia ser escrita:

⁴⁴⁰ A referida equação atual é geralmente expressa como $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$

$$\frac{S_{1seg}}{L_{1seg}/2} = \frac{\pi^2}{1} \quad [68]$$

que é precisamente a mesma relação citada por Newton no “teste da Lua”, próximo do desfecho da proposição 4 do Livro III. “O espaço que os corpos graves descrevem caindo num tempo de um segundo está para o comprimento desse pêndulo [de um segundo], assim como o quadrado da razão entre a circunferência de um círculo e o seu diâmetro (conforme Huygens mostrou)”. A proporção [68] expressa exatamente o resultado obtido por Huygens a que Newton faz referência na proposição 4, uma vez que π , como se sabe, é igual a razão entre o comprimento de uma circunferência e o seu diâmetro.

Com base na mencionada proporção, Huygens foi capaz de fornecer um resultado para S_{1seg} muito superior, em termos de precisão, do que os seus antecessores. Na proposição 4, Newton informa que “um pêndulo de um segundo⁴⁴¹ na latitude de Paris possui comprimento de 3 pés parisienses e $8\frac{1}{2}$ linhas, como Huygens observou (...)” e, portanto, o espaço percorrido por um corpo caindo em 1 segundo (S_{1seg}) será “15 pés parisienses, 1 polegada e $1\frac{4}{9}$ linhas”, ou 4,9031 metros – o que pode ser confirmado pela aplicação da proporção [68]. A essa altura a tabela abaixo será útil para uma análise comparativa do resultado do matemático holandês com aqueles dos experimentadores anteriores:

⁴⁴¹ Cohen traduziu como “a pendulum beating seconds”.

Tabela 6 - Espaço percorrido em 1s de queda, por vários experimentadores no séc. XVII

Experimentador	Espaço percorrido em 1s de queda na superfície terrestre, em Paris (S_{1seg})	
Galileu (plano inclinado)	6,5 pés parisienses	2,1 metros
Mersene (1636, pêndulo simples)	12 pés parisienses	3,8 metros
Riccioli (1645, pêndulo simples com parâmetros astronômicos)	13,5 pés parisienses	4,4 metros
Huygens (1657, 1672, pêndulo simples e cícloidal, com parâmetros astronômicos)	15,096 pés parisienses	4,9031 metros
Valor atual	-----	4,9047 metros

Fonte: Harper, 2011, p.194-203. Adaptado pelo autor

Para ressaltar ainda mais para o leitor moderno a surpreendente precisão do resultado obtido por Huygens, vale dizer que ao longo dos 140 anos que se seguiram, o comprimento do pêndulo de 1s foi aperfeiçoado de 440,5 linhas parisienses para 440,67 linhas parisienses.⁴⁴² Conforme nos informa George Smith, esse último valor difere daquele obtido por Huygens em somente 0,17 linhas parisienses, o que equivale a uma diferença quatro décimos de milímetro (0,4mm) em nosso sistema de medidas atual. Traduzindo o resultado de S_{1seg} para o nosso parâmetro atual, a aceleração da gravidade em Paris, obtida por Huygens, seria de

$$g = 9,8072 \text{ m/s}^2,$$

enquanto que o valor atual é de

$$g = 9,8094 \text{ m/s}^2,$$

de fato, um resultado de precisão indiscutivelmente admirável.

Acredito que Newton tinha uma boa noção do grau de precisão alcançado por Huygens, e que por isso mesmo seria possível uma comparação conclusiva entre a força

⁴⁴² George Smith, *Huygens's empirical challenge to universal gravity*, 1997 (notas manuscritas), apud Harper, 2011, p.196.

centrípeta atuando na Lua e a força da gravidade na superfície da Terra. Pela mesma razão, uma eventual compatibilidade entre os dois resultados também seria uma robusta evidência em favor da hipótese de Hooke. Não obstante, o grau de precisão que alcançou a aferição da força da gravidade na superfície terrestre com Huygens tornava a possibilidade de congruência entre esses resultados bastante improvável, a não ser que, de fato, a hipótese fosse verdadeira. A seguir, veremos o procedimento de Newton para comparar a força centrípeta responsável por manter a Lua na sua órbita com a força da gravidade na superfície da Terra. O “teste da Lua”.

10.4.2 O teste da Lua

Conforme já mencionado anteriormente, o teste da Lua consistiu num experimento de pensamento em que Newton imaginou a Lua caindo em direção ao centro da Terra pela ação da mesma força responsável por mantê-la anteriormente na sua órbita. Imagine, afirma Newton,

(...) a Lua sendo desprovida de todo o seu movimento e sendo deixada a cair de modo que descenda para a Terra com toda a força pela qual ela é [normalmente] mantida na sua órbita (...).

Diante de tal situação imaginária a questão subentendida na proposição 4 poderia ser explicitada como se segue: sabendo que a força atuando na Lua seja uma força aproximadamente proporcional ao inverso do quadrado da distância, qual seria a magnitude da força centrípeta atuando na Lua nas proximidades da superfície da Terra? Mais especificamente, sabendo que a força centrípeta média atuando na Lua em direção ao centro exatamente proporcional a $D^{-2,016}$, qual seria o valor dessa força na superfície da Terra?

Como vimos na seção 10.3, uma força centrípeta proporcional a $D^{-2,016}$ pode ser expressa como duas forças combinadas, uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância, e outra 178,725 vezes menor que a primeira. E isso independente se de haver ou não uma “ação do Sol” atuando na Lua, como foi suposto na proposição 3. Apenas para facilitar os cálculos matemáticos podemos considerar essas duas forças, em vez de apenas uma proporcional a $D^{-2,016}$. Por conseguinte, podemos usar o corolário único à proposição 3, no qual Newton mostrou que na *sizígia*, a força centrípeta na superfície da Terra poderia ser determinada pela proporção [59]:

$$F_C = F_M \frac{178,725}{177,725} \cdot \frac{r_{TL}^2}{r_T^2}$$

onde F_C é a força centrípeta atuando na Lua na superfície da Terra; F_M é a força centrípeta média da Lua na sua órbita; e r_{LT} e r_T são as distâncias do centro da Terra até o centro da Lua e a o raio da Terra, respectivamente.

Logo no início da proposição 4 Newton apresenta dados de diferentes astrônomos desde Ptolomeu que informam a distância entre a Terra e a Lua na *sizígia*, em termos de raios terrestres. Esses dados podem ser resumidos na tabela abaixo:

Tabela 7 – Distância Terra-Lua por vários astrônomos, informado por Newton nos *Principia*

Astrônomo	Distância Terra-Lua (em raios terrestres)
Ptolomeu	59
Copérnico	$60\frac{1}{3}$
Tycho Brahe	$56\frac{1}{2}$
Vendelin	60
Huygens	60
Street	$60\frac{2}{5}$
Valor adotado	60

Fonte: *Principia*, prop.4, Livro III. Adaptado pelo autor

Naturalmente, Newton precisa de um dado bastante preciso para a distância entre a Terra e a Lua para que o teste proposto seja compatível com a exatidão dos seus pressupostos matemáticos e dos dados obtidos pelo pêndulo de Huygens. Por essa razão ele corrige a distância obtida por Tycho Brahe, que havia utilizado tabelas de refração equivocadamente. “Permita que esse erro seja corrigido”, afirma Newton, “e a distância [obtida por Tycho] se tornará cerca de $60\frac{1}{2}$ semidiâmetros terrestres, próximo dos valores assinalados pelos outros”. Isso justifica o valor de médio de 60 raios terrestres adotado por Newton. Com base nesse valor, a proporção [59] ficará:

$$F_C = \frac{178,725}{177,725} \cdot \frac{60^2}{1^2} F_M$$

Mas o parâmetro que Newton precisa para comparar a força centrípeta com a força da gravidade é o espaço percorrido em queda livre durante um segundo (S_{1seg}). Portanto, ele precisa determinar o espaço percorrido pela Lua em “queda” em direção ao centro da Terra pela ação força centrípeta que ela teria na superfície (F_C). Como o espaço percorrido é proporcional a força, então podemos escrever a proporção [59] em termos desse espaço:

$$S_{sup} = \frac{178,725}{177,725} \cdot \frac{60^2}{1^2} S_{orb} \quad [69]$$

onde S_{sup} é o espaço de queda percorrido pela Lua na superfície da Terra em um determinado intervalo de tempo, pela ação da força centrípeta nessa localidade, e S_{orb} é o espaço de queda percorrido pela Lua a partir da sua órbita, no mesmo intervalo de tempo, pela ação das forças que a impulsionam para o centro da Terra na sua região natural.

Mas como determinar o espaço de queda percorrido pela Lua pela ação de uma certa força centrípeta? Newton cita duas proposições do Livro I que podem ser utilizadas como base para a solução do problema: a proposição 36, e a proposição 4, corolário 9. Por conveniência utilizarei a proposição 4, uma vez que já foi apresentada na seção 7.3 dessa dissertação. Relembremos o enunciado do corolário 9 dessa proposição:

Proposição 4, corolário 9

(...) o arco que um corpo, revolucionando uniformemente num círculo com uma dada força centrípeta, descreve em qualquer tempo é a média proporcional entre o diâmetro do círculo e a distância que um corpo cairia pela ação da mesma força centrípeta, no mesmo tempo.⁴⁴³

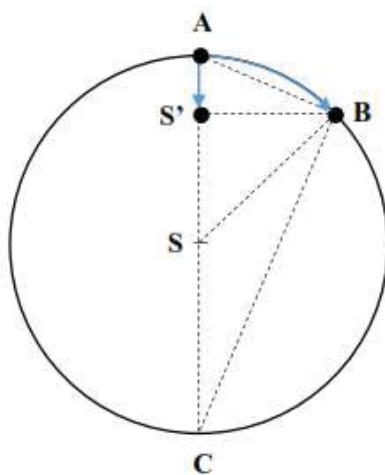


Figura 74 – Diagrama do cor.4, prop.9 do Livro I.

⁴⁴³ CW, p.451.

Fonte: o autor

Utilizando o enunciado e a figura acima como base, a proposição de Newton poderia ser escrita nos termos abaixo:

$$\frac{AC}{\widehat{AB}} = \frac{\widehat{AB}}{AS'}$$

Na seção 7.3 essa mesma proporção foi expressa simplificadamente pela equação [25]:

$$\widehat{AB}^2 = \text{diâmetro} \times S_{queda}$$

Onde S_{queda} é o espaço percorrido pelo corpo caindo em direção ao centro do círculo ao mesmo tempo em que descreveria o arco $\widehat{AB}$, espaço esse que representa o segmento AS' na figura. A equação [25] ainda poderia ser expressa mais convenientemente nesse momento chamando o raio do círculo de R e o espaço percorrido na queda simplesmente de S . Com essas substituições a equação [25] ficaria:

$$\widehat{AB}^2 = 2R \times S$$

ou

$$S = \frac{\widehat{AB}^2}{2R} \quad [70]$$

Como o corolário ora analisado supõe um movimento uniforme, o arco AB da proporção [70] pode ser obtido seguindo a relação elementar da velocidade de um corpo em movimento uniforme ($d = vt$) ⁴⁴⁴, com $d = \widehat{AB}$. Teremos, então:

$$\widehat{AB} = vt \quad [71]$$

onde v é a velocidade do movimento da Lua e t é o intervalo de tempo para percorrer a distância correspondente ao arco $\widehat{AB}$.

⁴⁴⁴ É a conhecida equação da velocidade média, onde v é velocidade, d é distância e t é o tempo.

No entanto, a velocidade de um corpo em movimento circular uniforme pode ser determinada por

$$v = \frac{2\pi R}{T} \quad [72]$$

onde $2\pi R$ é o comprimento da circunferência de um círculo de raio R e T é o tempo para efetuar uma volta completa, ou seja, o período de revolução do movimento. Combinando [71] e [72], teremos:

$$\widehat{AB} = \frac{2\pi R}{T} t ,$$

donde obtemos também

$$\widehat{AB}^2 = \frac{4\pi^2 R^2}{T^2} t^2 \quad [73]$$

Combinando [70] com [73], teremos

$$S = \frac{2\pi^2 R t^2}{T^2} \quad [74]$$

onde S é o espaço percorrido de queda pela ação da mesma força centrípeta que o mantém em movimento circular uniforme.

Pois bem, admitindo a órbita da Lua difere muito pouco de um círculo e seu movimento é aproximadamente uniforme é possível utilizar a relação [74] para determinar o espaço percorrido de queda pela Lua, em direção ao centro da Terra, em um segundo, a partir da sua órbita. Newton, no entanto, aproveitando que a relação [69] é sexagenal, preferiu determinar esse espaço de queda inicialmente em *um minuto*.

Sendo o período de revolução T da Lua com relação as estrelas fixas 27 dias, 7 horas e 43 minutos (ou 39343 minutos), e sendo a circunferência da Terra 123 249 600 pés parisienses “de acordo com as medições feitas pelos franceses”, o espaço percorrido pela queda lunar em *um minuto*, a partir da sua órbita, será:

$$S_{orb} = 15,009 \text{ pés parisienses}$$

Substituindo esse resultado na relação [69], teremos que espaço percorrido de queda da Lua em um minuto na *superfície da Terra* será:

$$S_{sup} = 15,009 \cdot \frac{178,725}{177,725} \cdot 60^2$$

$$S_{sup} = 15,093 \cdot 60^2 \text{ pés parisienses} \quad [75]$$

A partir desse último resultado, o espaço de queda percorrido em *um segundo* pode ser determinado facilmente. Pela equação [74] é possível perceber que, mantendo-se a distância do centro da Terra fixa, o espaço de queda percorrido é proporcional ao quadrado do tempo t .

$$S = \frac{2\pi^2 R}{T^2} t^2$$

$$S = k t^2$$

ou

$$S \propto t^2$$

ou ainda

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2} \quad [76]$$

onde t_1 e t_2 são dois intervalos de tempos distintos.⁴⁴⁵

Assim, a razão entre o espaço de queda percorrido pela Lua na superfície da Terra em um minuto (S_{1min}) e o espaço percorrido em um segundo (S_{1seg}) pode ser dado por:

$$\frac{S_{1min}}{S_{1seg}} = \frac{60^2}{1^2} \quad [77]$$

E, portanto, combinando [75] e [77], o espaço percorrido pela Lua em um segundo de queda na superfície da terrestre será:

⁴⁴⁵ A proporção [48] evidentemente equivale à regra de Galileu para a queda dos corpos na superfície da Terra.

$$S_{1seg} = \frac{S_{1min}}{60^2}$$

$$S_{1seg} = \frac{15,093 \times 60^2}{60^2}$$

$$S_{1seg} = 15,093 \text{ pés parisienses}$$

Esse é o resultado que Newton apresenta na proposição 4. Em suas próprias palavras:

Dessa maneira, uma vez que em sua aproximação da Terra a força é aumentada com o inverso do quadrado da distância, e portanto na superfície da Terra é 60×60 vezes maior que na Lua, segue-se que um corpo caindo com essa força, nessa localidade, no espaço de um minuto, deve descrever $60 \times 60 \times 15 \frac{1}{12}$ pés parisienses, e no intervalo de um segundo 15 pés, 1 polegada, e $1 \frac{4}{9}$ linhas. E os corpos graves realmente descendem para a Terra com essa precisa força. ⁴⁴⁶

Comparando o teste da Lua de Newton com o resultado obtido com o pêndulo de Huygens para a queda dos graves é possível perceber o grau de concordância dos resultados:

Tabela 8 – Comparação entre o espaço percorrido em 1s pelo Pêndulo de Huygens e o teste da Lua

Força	Espaço percorrido em 1 segundo de queda	
Força da gravidade em Paris (Pêndulo de Huygens)	15,096 pés parisienses	4,9031 metros
Força centrípeta da Lua na superfície da Terra (“Teste da Lua”)	15,093 pés parisienses	4,9023 metros

Fonte: o autor

De fato, convergência de resultados é surpreendente. Justifica a última frase de Newton na citação acima: “E os corpos graves realmente descendem para a Terra com essa precisa força”. Ao que parece, a conclusão de Newton a essa altura é que, admitindo que a Lua esteja submetida a ação de uma força centrípeta média proporcional a $D^{-2,016}$ em direção ao centro da Terra, na superfície da Terra essa força praticamente coincidiria com a força da

⁴⁴⁶ CW, p.804.

gravidade. Com efeito, a diferença em valores absolutos seria da ordem de décimos de polegada, ou de milímetros, no nosso sistema atual.⁴⁴⁷

Isso nos leva a pensar sobre o significado da convergência desses resultados. Como foi mencionado no início dessa seção (10.4), o teste da Lua foi idealizado com base numa hipótese específica para a causa do movimento do satélite terrestre. A força da gravidade seria a própria força que mantém a Lua na sua órbita. Qualquer que fosse testar essa hipótese, primeiro deveria demonstrar exatamente sob quais condições um corpo se move numa órbita como a da Lua. Depois, determinadas essas condições, mostrar que elas geram na superfície da Terra um efeito semelhante à queda dos corpos. Com o teste da Lua e as proposições correlatas do Livro I, Newton determinou as condições necessárias para um corpo se mover numa órbita como a Lua (uma *força centrípeta* com determinada proporção matemática); depois, ele mostrou que na superfície da Terra essa proporção é precisamente a mesma que a força da gravidade.

Para fins práticos, nada mais parece ser requerido para uma inferência de que a hipótese inicial, com grande probabilidade, está correta. Essa inferência ocorre, por assim dizer, naturalmente. É intuitiva. A força da gravidade é a força que mantém a Lua na sua órbita. Contudo, para fins de apresentação na forma de uma proposição incorporada a um sistema axiomático, Newton precisa *formalizar* esse resultado nos termos das regras estruturais desse sistema. Em outras palavras, ela precisa apresentar esse resultado de maneira dedutiva, com a explicitação das premissas envolvidas. Ao meu ver, é nesse momento que surge a ocasião para a formulação e aplicação das Regras 1 e 2, apresentadas na seção 9.1. É com essa formalização que Newton vai concluir a proposição 4.

10.4.3 Aplicação das Regras 1 e 2

Na última parte da proposição 4, Newton apresenta a sua conclusão sobre o significado do “teste da Lua”. É possível distinguir dois argumentos. O primeiro argumento

⁴⁴⁷ Sobre o teste da Lua, há a conhecida polêmica sobre o “fudge factor” que Westfall sugeriu que Newton teria empreendido (Westfall, 1973). Newton teria manipulado os dados, ou sendo mais ameno, ele teria ao menos escolhido parâmetros que lhe forneceria um resultado conveniente para o teste da Lua. A análise aqui realizada me permite concluir que Newton realmente escolheu alguns resultados mais convenientes. Por exemplo, os resultados de Huygens usados por Newton não correspondem exatamente aos parâmetros que Newton está usando. Além de obter as suas medidas na latitude de Paris, Huygens provavelmente não efetuou a sua medição na *sizígia*, até porque não poderia imaginar qualquer influência da Lua ou do Sol na aferição. Por outro lado, isso indica que a hipótese de Newton da influência do Sol no movimento da Lua também poderia ser testada com o pêndulo de Huygens. Mas ainda assim considero o teste da Lua como válido pelas razões que abordo na seção 17.1 do volume II.

introduz as Regras 1 e 2, e está relacionado à *formalização* que destacamos no fim da seção anterior; o segundo, é um argumento contrafactual. Vejamos as palavras de Newton:

(...) portanto, a força pela qual a Lua é mantida na sua órbita torna-se, ao descer para a superfície da Terra, igual à força da gravidade aqui na Terra, e dessa forma (pelas Regras I e II) é essa mesma força que geralmente chamamos de gravidade. Porque se a gravidade fosse diferente dessa força, então ao descender os corpos para Terra pela ação das duas forças juntas, cairiam duas vezes mais rápido, e no espaço de um segundo descreveriam $30\frac{1}{6}$ pés parisienses, contrariando totalmente a experiência.⁴⁴⁸

Começemos comentando o primeiro argumento, no qual Newton cita as Regras 1 e 2.

Para ficar mais claro o uso dessas regras será útil destacar três “fenômenos” que figuraram na proposição 4. O primeiro deles é o Fenômeno 6, do movimento orbital da Lua. A Lua descreve uma trajetória aproximadamente circular obedecendo a lei das áreas, e que implica, como já sabemos, que ela está sob ação de uma força em direção ao centro da Terra que varia aproximadamente com o inverso do quadrado da distância até esse centro. Além disso, do referido fenômeno também decorre que essa força em direção ao centro da Terra vale, em termos do espaço percorrido em um segundo de queda na superfície do nosso planeta, aproximadamente 15,09 pés parisienses. O segundo fenômeno (não enumerado por Newton) é o fenômeno da queda dos corpos na superfície da Terra. Os corpos na superfície da Terra estão sob a ação de uma força em direção ao centro da Terra cujo valor absoluto é, em termos do espaço percorrido em um segundo, aproximadamente 15,09 pés parisienses. Podemos chamar esse fenômeno de “fenômeno de Huygens”. Já o terceiro fenômeno é, poderia-se dizer, um “fenômeno de segunda ordem”. Trata-se de um fenômeno que constata que os dois fenômenos anteriores são “efeitos naturais da mesma espécie”. Em outras palavras, o terceiro fenômeno constata que a queda dos corpos na Terra e o movimento orbital da Lua são fenômenos semelhantes, que possuem componentes análogos, ou ainda, são fenômenos da “mesma espécie”.

Não seria difícil listar os “componentes análogos” entre esses dois fenômenos. Em ambos os fenômenos (1) os corpos são acelerados em direção ao centro da Terra; (2) as acelerações são contínuas; (3) sofrem variação com a distância do centro; (4) não há qualquer meio material visível que justifique essa aceleração; (5) tem valores absolutos iguais na superfície da Terra (ou surpreendentemente próximos). Além disso, matematicamente, os dois movimentos genéricos correspondentes (de queda acelerada de um corpo, e de movimento orbital que obedece a lei das áreas) possuem notáveis similaridades, como parte significativa

⁴⁴⁸ Ibid.

do Livro I revela. Portanto, o “terceiro fenômeno” que figura na proposição 4 é aquele que constata as similitudes entre os fenômenos da queda dos graves e do movimento orbital da Lua, dentre os quais se destaca, evidentemente, a igualdade dos espaços percorridos pelos corpos considerados na superfície da Terra. Em razão da importância desse fenômeno no argumento da gravitação universal, e por falta de um termo melhor, chamemo-lo de “fenômeno alfa”.⁴⁴⁹

Tendo destacado os três fenômenos presentes na proposição 4 podemos avançar para a etapa de expressar o argumento dedutivamente, com o auxílio das Regras 1 e 2, de modo a ajustá-lo às exigências do método axiomático. Relembremos, antes, dessas regras no seu conjunto:

Regra 1 e 2

Não se deve admitir mais causas para as coisas naturais além daquelas que sejam, ao mesmo tempo, verdadeiras e suficientes para explicar o seu fenômenos. (...) Portanto, aos efeitos naturais da mesma espécie se deve atribuir, tanto quanto possível, as mesmas causas.⁴⁵⁰

Começemos com a Regra 2: “aos efeitos naturais da mesma espécie se deve atribuir, tanto quanto possível, as mesmas causas”. Essa regra é escrita na forma de uma instrução procedimental, porém o que ela está dizendo, em outras palavras é que na prática da formulação do conhecimento devemos admitir, pragmaticamente – como já fazemos na inferências naturais do pensamento – que todos os efeitos naturais da mesma espécie têm causas da mesma espécie. Efeitos semelhantes, causas semelhantes. Incorporando essa regra ligeiramente modificada no argumento, teremos:

1. Todos efeitos naturais da mesma espécie têm causas da mesma espécie (Regra 2)⁴⁵¹.
2. Os fenômenos da queda dos corpos e do movimento orbital da Lua são efeitos naturais da mesma espécie (“Fenômeno alfa”).
3. Logo, os fenômenos de queda dos corpos e o movimento orbital da Lua tem causas da mesma espécie.

⁴⁴⁹ No escólio à proposição 4, que Newton acrescentou somente nas edições posteriores, ele afirma: “uma vez que ambas as forças” (aquela dos corpos pesados e aquela da Lua) “são [1] direcionadas ao centro da Terra, e [2] similares entre si, e [3] iguais, elas terão (pelas regras 1 e 2) a mesma causa”. Os três pontos destacados são os componentes análogos que formam o que chamei “fenômeno alfa”.

⁴⁵⁰ *Principia*, Livro III. Traduzido do latim.

⁴⁵¹ Na primeira edição dos *Principia* essa regra não possuía a ressalva “tanto quanto possível”. Usá-la na sua versão da primeira edição aqui favorece a compreensão da intenção original de Newton.

Pela aplicação da Regra 2 já se conclui que o movimento orbital da Lua em torno da Terra tem uma causa do mesmo tipo que aquela que produz a queda dos corpos na superfície da Terra. Apliquemos, agora, a Regra 1.

A Regra 1 afirma que “Não se deve admitir mais causas para as coisas naturais além daquela que seja, ao mesmo tempo, verdadeira e suficiente para explicar os seus fenômenos”. Segundo a interpretação que foi a apresentada anteriormente, essa regra estaria preceituando que não se deve multiplicar causas desnecessariamente. Se uma causa é suficiente para explicar um ou mais efeitos, e pode ser considerada verdadeira, não se deve admitir causas adicionais. Em outras palavras, deve-se assumir esta como a verdadeira e única causa dos fenômenos, sem hesitação. Modificando levemente a forma de *instrucional* da regra, o argumento poderia assim ser formulado:

1. Se uma causa é verdadeira e suficiente para explicar dois ou mais fenômenos, então ela é a causa única dos fenômenos (Regra 1).
2. A força da gravidade é uma causa verdadeira e suficiente para explicar os fenômenos da queda dos corpos e do movimento orbital da Terra (Fenômeno 6 e Fenômeno alfa).
3. Logo, a força da gravidade é causa única dos fenômenos da queda dos corpos e do movimento orbital da Terra.

Assim, pode se admitir sem hesitação que o fenômeno da queda dos corpos na superfície da Terra e o fenômeno do movimento orbital da Lua não somente têm “causas da mesma espécie”, mas que nesse caso tem *a mesma causa*, porque apenas uma dessas causas é capaz de explicar os dois fenômenos. Duas causas são supérfluas quando uma é suficiente.

Do que foi exposto acima acredito que ficou claro que Newton estava nesse ponto apenas cumprindo um requisito formal do método axiomático, explicitando em passos dedutivos o raciocínio que nos leva a fazer naturalmente este tipo de inferência diante de situações semelhantes.⁴⁵² Está concluída, portanto, a etapa da *formalização* da proposição 4

⁴⁵² Um exemplo de época pode ser pertinente para reforçar esse ponto. Até o séc. XV, a causa do mecanismo da circulação do sangue era considerada a pulsão dos vasos sanguíneos. No séc. XVI, o inglês William Harvey defendeu a tese que se mantém até a atualidade que a causa da circulação do sangue é o coração, que impulsiona o sangue para todos os vasos do corpo. Ocorre que Harvey estudou na Universidade de Pádua e entrou em contato com os estudos mecânicos de Galileu e Borelli, especialmente alguns estudos hidráulicos desse último. Além disso, tomou conhecimento de várias invenções mecânicas que se aperfeiçoavam, como a bomba d’água de pistão, capaz de impulsionar a água por tubos a vários metros de altura em virtude da pressão exercida pelo pistão. Por analogia, tanto Harvey quanto Borelli concluíram que o coração funciona como uma bomba d’água, e que ele é causa da circulação sanguínea. Não é difícil perceber que o tipo de inferência realizada por Harvey – sem grande preocupação – para a causa da corrente sanguínea é o que Newton tentou explicitar na proposição 4. Mesmo em se tratando de um artefato construído e de um efeito natural do corpo humano, ele poderia

segundo as exigências do método axiomático. Todavia, para concluir essa seção ainda resta apresentar o argumento adicional que Newton oferece ao fim da proposição 4. Esse argumento pode ser expresso à maneira contrafactual:

1. Se a força da gravidade e a força centrípeta que atua na Lua em direção ao centro da Terra fossem duas forças distintas, então os corpos em queda na superfície da Terra deveriam descrever – pelo menos aproximadamente – 30 pés parisienses em um segundo.
2. Os corpos em queda na superfície da Terra não descrevem 30 pés parisienses em um segundo (nem mesmo aproximadamente).
3. Logo, a força da gravidade e a força centrípeta não são duas forças distintas.

A força da gravidade e a força centrípeta da Lua são uma e a mesma força. E supor que elas seriam forças diferentes levaria a uma conclusão que “contrariaria totalmente a experiência”.⁴⁵³ Portanto, está estabelecido que a causa da força que atua na Lua em direção ao centro da Terra, e que é responsável pelo seu movimento orbital, é a força popularmente conhecida como *gravidade*. Diante dessa conclusão – no mínimo surpreendente a aquela época – Newton pôde construir o enunciado que abriu essa seção: “A Lua gravita para a Terra, e pela força da gravidade é continuamente desviada do seu movimento retilíneo e mantida na sua órbita”. Está justificada a proposição 4 do Livro III.⁴⁵⁴

10.5 PROP. 5: GRAVIDADE EM DIREÇÃO A JÚPITER, SATURNO E SOL

A proposição 5 talvez seja a proposição mais problemática dentre todas que compõem o argumento da gravitação universal no Livro III. Pela leitura simples do seu enunciado, ela seria apenas uma extensão da proposição 4. Todavia, observando com mais cautela os três corolários que lhe são oferecidos, percebe-se que eles extrapolam os limites do conteúdo da própria proposição. Vejamos, primeiramente, o seu enunciado:

argumentar: *tanto a circulação da água pelos canos quanto do sangue pelos vasos sanguíneos são efeitos da mesma espécie. Logo, devem possuir causas da mesma espécie, senão a mesma causa.* A circulação do sangue, e a pulsação dos vasos, tem causas da mesma espécie, a saber, a ação de uma bomba que produz uma pressão que impulsiona a água ou o sangue.

⁴⁵³ CW, p.804.

⁴⁵⁴ A proposição 4 ainda apresenta um interessante escólio, mas que não tratarei aqui.

Os planetas circunjoviais [satélites de Júpiter] gravitam em direção à Júpiter; os circunsaturnianos [satélites de Saturno] gravitam em direção à Saturno; e os circunsolares [ou primários] gravitam em direção ao Sol; e pela força da gravidade são sempre desviados dos movimentos retilíneos e mantidos em suas órbitas curvilíneas.⁴⁵⁵

Manifestamente, o enunciado da proposição 5 se limita a estender o resultado da causa da força centrípeta da Lua para os satélites de Júpiter, Saturno e aos planetas primários. Newton apela para a Regra 2 para justificar essa ampliação. Ele afirma que as revoluções dos satélites de Júpiter em torno de Júpiter, dos satélites de Saturno em torno de Saturno, e dos planetas primários em torno do Sol são “fenômenos da mesma espécie da revolução da Lua em torno da Terra e, portanto (pela Regra 2), depende de causas da mesma espécie”.

Se havia qualquer incerteza quanto à Regra 2 estar realmente instruindo acerca de se considerar que efeitos da mesma espécie têm causas da *mesma espécie*, e não necessariamente a *mesma causa* (como o enunciado da regra pode dar a entender), agora já deve estar claro. Nessa paráfrase da regra, Newton usa explicitamente as palavras “causas de mesma espécie”, em vez de “mesmas causas”. Em outras palavras, a Regra 2 visa diminuir as *espécies* de causas, enquanto que a Regra 1 visa diminuir o *número* de causas.

Voltando à proposição, deve haver poucas dúvidas que as revoluções dos satélites de Júpiter e Saturno, além dos planetas primários, em tornos dos respectivos astros centrais são “fenômenos da mesma espécie” que a revolução da Lua em torno da Terra. Segundo as próprias palavras de Newton na sequência, “já foi provado que as forças das quais essas revoluções dependem são direcionadas para os centros de Júpiter, Saturno e do Sol, e decrescem de acordo com a mesma razão e lei (...)”. Evidentemente, Newton é econômico em relacionar todos os componentes análogos entre esses fenômenos, e aqui creio que também seja desnecessário fazê-lo (diferente da comparação entre a queda dos corpos e o movimento orbital da Lua, em que as semelhanças eram menos óbvias). Nesse caso, as comparações entre movimentos orbitais desses astros contêm, de fato, reduzidas diferenças. Por conseguinte, formalizando o argumento de maneira semelhante ao que foi empregado no fim da seção anterior, é possível chegar facilmente à conclusão que o movimento orbital dos satélites de Júpiter em torno desse planeta, dos satélites de Saturno em torno desse planeta, e dos planetas primários em torno do Sol são efeitos da mesma espécie que o movimento orbital da Lua em torno da Terra, possuindo, portanto, a mesma espécie de causas. Com efeito, a espécie de causa que produz o movimento orbital da Lua é uma força da gravidade em direção ao centro da Terra. Logo, a causa do movimento orbital dos satélites de Júpiter e Saturno em torno

⁴⁵⁵ CW, p.805.

desses planetas, e dos planetas primários em torno do Sol, é uma força da gravidade em direção ao centro de Júpiter, Saturno e do Sol, semelhante a aquela que há em direção à Terra.⁴⁵⁶ Como estabelece o enunciado da proposição, portanto, “os planetas circumjoviais *gravitam* para Júpiter, os planetas circumsaturnianos *gravitam* para Saturno, e os planetas circumsolares *gravitam* para o Sol (...)”.⁴⁵⁷ Há, também, gravidade em direção a Júpiter, Saturno e o Sol. Está justificada a proposição 5 do Livro III.

10.5.1 Cor. 1: a gravidade em direção a todos os planetas

Após justificar a proposição 5, Newton oferece três breves corolários que possuem muitas implicações. Como mencionei há pouco, são nesses corolários que se encontram as controvérsias. Pela importância do primeiro corolário será oportuno citá-lo na íntegra:

Corolário 1

Portanto, há gravidade em direção a todos os planetas universalmente. Porque ninguém duvida que Vênus, Mercúrio, e o resto [dos planetas, primários ou secundários] são corpos da mesma espécie que Júpiter e Saturno. E uma vez que, pela terceira lei do movimento, toda atração é mútua, Júpiter gravitará em direção aos seus satélites, Saturno em direção aos seus satélites, e a Terra gravitará em direção à Lua, e o Sol em direção a todos os planetas primários.⁴⁵⁸

Há muitas informações inéditas nesse corolário. Especificamente, quero destacar três elementos que foram introduzidos nesse corolário, supostamente como consequência da proposição 5. O primeiro elemento é a generalização da conclusão obtida especificamente para Júpiter, Saturno, Terra e o Sol para todos os demais planetas, primários e secundários. O segundo elemento é a referência a uma “atração” entre os planetas. E o terceiro elemento é a introdução da terceira lei do movimento no argumento. Ao longo da discussão que se seguirá nesta e nas próximas seções, cada um desses elementos será examinado. Nessa seção

⁴⁵⁶ Escrevendo o argumento como foi feito nas outras proposições, teríamos:

1. Todos efeitos naturais da mesma espécie têm causas da mesma espécie (Regra 2).
2. Os movimentos orbitais dos satélites de Júpiter e Saturno em torno desses planetas, e dos planetas em torno do Sol, são efeitos da mesma espécie que o movimento orbital da Lua em torno da Terra (Fenômeno).
3. Logo, os movimentos orbitais de Júpiter e Saturno em torno desses planetas, e dos planetas primários em torno do Sol têm causas da mesma espécie que o movimento da Lua em torno da Terra.
4. Ora, a espécie de causa do movimento orbital da Lua em torno da Terra é uma força da gravidade em direção ao centro da Terra (Prop. 4).
5. Logo, a espécie de causas do movimento orbital de Júpiter, Saturno em torno desses planetas, e dos planetas primários em torno do Sol é uma força da gravidade em direção ao centro desses astros (Prop.5).

⁴⁵⁷ CW, p.806. Grifos meus.

⁴⁵⁸ Ibid..

comentarei apenas sobre o primeiro elemento. Na seção 10.5.3 voltarei a atenção para os demais.

Sobre o primeiro elemento – a *generalização* – Newton afirma: “portanto, há gravidade em direção a todos os planetas universalmente”. Ele generalizou a conclusão de que há gravidade em direção à Júpiter, Saturno, Terra e Sol, para os demais planetas conhecidos, nomeadamente, Mercúrio e Vênus e Marte, e também para a Lua e os satélites de Júpiter e Saturno. Há gravidade em direção não apenas a aqueles primeiros astros, mas também a estes últimos. Essa generalização é, no entanto, problemática.

A partir de uma rápida leitura dessa proposição e seus corolários o leitor poderia até mesmo se perguntar porque Newton estendeu a gravidade em direção à Terra somente para Júpiter, Saturno e o Sol, em vez de fazê-lo logo de início para todos os planetas. A resposta é simples: não havia satélites em Mercúrio, Vênus e Marte.⁴⁵⁹ Perceba que a inferência inicial da qual se derivou a proposição 5 não era estritamente uma generalização com a proposta nesse corolário. Newton usou a Regra 2: efeitos da mesma espécie tem causas da mesma espécie. Que “efeitos da mesma espécie” eram esses? O movimento orbital dos satélites. O movimento orbital dos satélites de Júpiter, Saturno e dos planetas primários em torno dos seus respectivos astros são efeitos semelhantes ao movimento orbital da Lua e, portanto, têm a mesma espécie de causa, a saber, uma força da gravidade em direção aos respectivos astros. Porém, não se tinha notícia de satélites orbitando Mercúrio, Vênus e Marte. Desse modo, nenhuma evidência havia da ação de uma força centrípeta em direção ao centro desses planetas. Nenhuma evidência havia de uma possível gravidade atuando em direção a esses corpos celestes. Por essa razão é somente numa etapa posterior, no corolário 1, que Newton generaliza a conclusão obtida para Júpiter, Saturno, Terra e Sol para os demais planetas do Sistema Solar: “há gravidade em direção a todos os planetas universalmente”. Isso se confirma na sentença seguinte: “porque ninguém duvida que Vênus, Mercúrio, e o resto [dos planetas, primários e secundários] são *corpos da mesma espécie* que Jupiter e Saturno”.⁴⁶⁰

Newton não usa a Regra 2 para justificar a sua inferência. Tanto não a usa que não a cita. A Regra 2 discorre sobre “*efeitos da mesma espécie*” (como o movimento orbital dos satélites), mas aqui Newton se refere a “*corpos da mesma espécie*”. De face, não podemos tomar *corpos* e *efeitos* como sinônimos aqui. Além disso, o objetivo da Regra 2 é fazer uma inferência sobre as *causas* a partir dos *efeitos*, enquanto que o objetivo do presente corolário é generalizar a causa já conhecida de alguns fenômenos para outros fenômenos; ou melhor, não

⁴⁵⁹ Os dois satélites naturais de Marte foram descobertos cerca duzentos anos depois, em 1877.

⁴⁶⁰ Ibid. Grifos meus.

para *outros fenômenos*, mas para *outros corpos*, o que revela a aparente extravagância do raciocínio. Newton estava falando até o momento de *efeitos* e *causas*, mas simplesmente não há qualquer *efeito* (ou *fenômeno*) para ser observado em Mercúrio, Vênus e Marte. O que estava em pauta eram os *efeitos* dos satélites e planetas primários descreverem órbitas em tornos de Júpiter, Saturno e Sol, o que implicava na ocorrência de *causa*, que seria uma força semelhante à gravidade em direção à Terra, mas cuja origem não foi mencionada em momento algum. No entanto, ao dizer que também há gravidade em direção Mercúrio, Vênus e Marte (além dos satélites), sem que haja qualquer *efeito* que justifique essa inferência, e ao justificar essa declaração afirmando que há essa força porque eles são “corpos da mesma espécie” que Júpiter e Saturno, Newton está assumindo implicitamente que a gravidade é um tipo de propriedade proveniente *dos planetas*. Não é apenas um tipo de efeito *em direção aos planetas*, mas uma *propriedade dos planetas* ou, ao menos, um efeito gerado *pelos planetas*.⁴⁶¹

Newton usa um procedimento *indutivo* nesse corolário. Se percebemos que inúmeras amostras de corpos de certa espécie (metais, por exemplo) são duras, ou seja, que a amostra 1 é dura, a amostra 2 é dura, a amostra 3 é dura, e assim por diante, concluímos por indução que todos os metais são duros. Em outros termos, todos os “corpos da mesma espécie” dos metais tem a propriedade da dureza. O que Newton propõe aqui é uma simples generalização indutiva, à maneira desse exemplo dos metais: uma vez que “ninguém duvida” que os demais planetas são “corpos da mesma espécie” que Júpiter e Saturno, então também deve haver gravidade em direção a eles.

O uso da indução para justificar esse corolário gerou, no entanto, dois problemas, que foram notados inclusive pelos contemporâneos de Newton.⁴⁶² Primeiro, tendo em vista que ele apresentava a sua teoria nos moldes do método axiomático, ele não explicitou esse pressuposto no seu sistema. Embora os termos utilizados (“corpos da mesma espécie”) se assemelhem muito aos termos da Regra 2 (“efeitos da mesma espécie”), não há indícios claros de que Newton tenha utilizado essa regra no corolário, e à primeira vista nem poderia. Aparentemente por essa razão, na terceira edição dos *Principia*, 39 anos depois da primeira edição, Newton introduziu a Regra 4 na estrutura do Livro III (que discorre precisamente sobre a indução), e a incluiu num escólio ao final da proposição 5, no qual afirma que “a

⁴⁶¹ Esse “efeito gerado pelos planetas” pode ser entendido como um efeito que surge de algumas propriedades que estão especificamente ligadas à corpos da espécie dos planetas.

⁴⁶² Um deles foi Huygens, como se mostrará a seguir.

causa da força centrípeta pela qual a Lua é mantida na sua órbita deve ser estendida a *todos os planetas*, pelas Regras 1, 2, e 4”.⁴⁶³

O segundo problema gerado pelo uso da indução nesse corolário é, no entanto, mais sutil e complexo. Refere-se à própria possibilidade de aplicar um procedimento indutivo nesse caso concreto. Aparentemente, sequer seria permitido empregar uma indução nessa situação. Se a gravidade fosse claramente uma *propriedade dos planetas*, ou derivada de uma propriedade especificamente ligada aos planetas, a generalização de Newton seria perfeitamente justificável. Não estaríamos mais falando genericamente da *causa* de um *efeito*. Estaríamos falando da propriedade de um corpo (ou de um efeito de uma propriedade). Se Júpiter, Saturno, Terra e Sol possuem uma propriedade qualquer, ou um *poder*, que leva os corpos circunvizinhos em direção ao seu centro, então não haveria maiores dificuldades em compreender que essa propriedade, ou poder, por indução, fosse generalizado para os demais planetas, uma vez que são corpos da mesma espécie que Júpiter e Saturno.⁴⁶⁴ Contudo, em momento algum nas proposições anteriores do Livro III se estabeleceu – ou ao menos se sugeriu – que a gravidade era uma propriedade dos planetas ou, ao menos, estava ligada de algum modo à natureza dos planetas. Pelo contrário, tudo o que se mostrou é que há um efeito do movimento orbital da Lua, que é gerado necessariamente pela ação de uma força centrípeta em direção ao centro da Terra; e que essa força centrípeta, por sua vez, é gerada pela mesma gravidade que provoca a queda dos corpos na superfície da Terra. Mas nada foi esclarecido acerca da natureza dessa força da gravidade, qual a sua origem, o que ela é, o que a produz, e assim por diante. E mesmo apelando para a concepção tradicional de gravidade (i.e., a concepção aristotélica) não se atribuía essa propriedade à Terra, mas aos corpos graves. As próprias expressões utilizadas por Newton até esse ponto reforçam uma abordagem tradicional da gravidade, ou pelo menos neutra. Ele se refere à gravidade como um tipo de efeito *em direção a* um determinado centro. A proposição 5 afirma que os satélites de Júpiter e Saturno e os planetas primários “gravitam *em direção a*” esses planetas e ao Sol. Portanto, simplesmente assumir a gravidade como uma propriedade dos planetas, ou ligada à natureza dos planetas, nessa etapa – sendo por essa razão passível de generalização por indução – é uma conclusão, para dizer o mínimo, precipitada.

Aparentemente foi essa assunção de Newton que provocou alguns protestos de seus contemporâneos, dentre os quais o respeitado matemático Christiaan Huygens. Ao que parece,

⁴⁶³ No capítulo 12 as Regras 3 e 4 serão apresentadas. Por ora basta saber que a Regra 4 aborda a indução. O grifo na citação é meu.

⁴⁶⁴ Aparentemente Newton não cita a Terra e o Sol porque eles, eventualmente, poderiam ser considerados corpos de uma espécie diferente.

Huygens pôde seguir Newton até a primeira parte da proposição 5. A partir daí as conclusões o deixaram desconfortável. E creio que não apenas pelos seus compromissos metafísicos com o mecanicismo cartesiano, mas principalmente porque o corolário 1 da proposição 5 efetivamente não justifica a afirmação que faz. Por exemplo, no seu *Discurso sobre a Causa da Gravidade*, Huygens afirma que mesmo que “não houvesse Terra, os corpos não cessariam de tender em direção ao centro em virtude daquilo que chamamos de suas gravidades”.⁴⁶⁵ Em outras palavras, nada haveria até esse ponto da argumentação que descartasse a possibilidade dos corpos tenderem para um centro sem que isso necessariamente estivesse vinculado a alguma qualidade ligada aos próprios planetas. Poderia ser resultado de uma propriedade do espaço, ou de uma matéria no espaço. Certamente Huygens poderia argumentar que se a gravidade é gerada pela ação de vórtices, isso explicaria sem dificuldades porque a posição da Terra, Júpiter e Saturno coincidiria com o centro para o qual os corpos circunvizinhos tendem e, no entanto, esse centro nada teria a ver com a natureza dos planetas em si mesmos. Mesmo que eles lá não estivessem, o vórtice (ou algo similar) permaneceria produzindo uma ação sobre os corpos em direção a ele (ao menos durante algum tempo)⁴⁶⁶. E sendo isso verdade, a ausência de corpos orbitando Mercúrio, Vênus e Marte seria precisamente uma evidência de que poderia não haver gravidade em direção a eles, embora também não excluísse definitivamente essa possibilidade.

De todo modo, o ponto aqui é que não seria permitido proceder uma generalização indutiva nesse caso, uma vez que não haveria até a presente proposição qualquer apresentação de evidências de que a gravidade surge dos próprios planetas, e não de qualquer outro meio que lhes seja subjacente. Muito menos ainda se poderia propor que a gravidade fosse uma propriedade dos planetas que ensejasse algum tipo de “atração”, como se diz na continuação do corolário 1, o que gerou igualmente protestos de Huygens, que afirmou que não poderia conceder essa suposição porque acreditava perceber claramente que a causa dessa *atração* não era explicável “nem por qualquer princípio mecânico, e nem pelas leis do movimento”.⁴⁶⁷ A despeito do seu compromisso com a filosofia mecânica a queixa de Huygens parece aqui justificável, uma vez que antes da proposição 5, Newton em momento algum havia introduzido uma tese sobre uma “atração” dos planetas, e tampouco o próprio enunciado da proposição 5 faz qualquer sugestão a esse respeito.

⁴⁶⁵ Huygens, *Discours de la Cause de la Peanteur* (1692), apud Harper, 2011, p.204.

⁴⁶⁶ Uma das ideias era que os vórtices seriam gerados pela rotação dos planetas. Mesmo que os planetas fossem retirados da sua posição a matéria continuaria em revolução até que perdesse totalmente o seu movimento.

⁴⁶⁷ *Idid*.

Vale destacar que o termo “atração”, ou alguma outra de suas variações, aparece uma única vez nas três primeiras seções do Livro I, que fundamentam essas primeiras inferências do argumento da gravitação. E mesmo quando torna a aparecer na seção 9, e principalmente na seção 11 do mesmo livro, Newton adverte o leitor para que não entenda o termo como se estivesse se referindo a alguma causa física.⁴⁶⁸ Todavia, ao entrar na filosofia natural no Livro III ele tampouco faz qualquer consideração a respeito; simplesmente introduz sorrateiramente a noção se furtando de oferecer qualquer justificativa, como se essa conclusão fosse autoevidente a aquela altura.⁴⁶⁹ Por essas razões, Huygens tinha motivos para protestar contra essa noção de *atração*, introduzida um tanto abruptamente no corolário de uma proposição da qual sequer ela poderia ser inferida.

Esse é o problema do corolário 1 da proposição 5 do Livro III dos *Principia*. Newton introduz um corolário com informações da mais alta importância para as suas conclusões seguintes, mas esse corolário dificilmente pode ser deduzido da proposição que lhe deu origem, ou mesmo de qualquer outra proposição anterior do Livro III. Ele assume que a gravidade é está ligada de algum modo aos planetas, e que ela pode ser resumida numa espécie de “atração”. E as únicas considerações que se faz sobre essa noção nos *Principia* é no sentido de pedir que leitor que não se preocupe com o termo, que está sendo utilizado apenas como uma “linguagem familiar” para discutir problemas, na verdade, “puramente matemáticos”.

Estando claro que Newton introduziu alguns elementos estranhos à proposição 5 (o que justificaria as críticas que ele sofreu aqui), se procurará apresentar no que se segue um possível caminho que oferece motivos para acreditar que Newton tinha razões mais sólidas para incluir o conteúdo do corolário 1 nesse ponto, ainda que o possa tê-lo feito de forma um tanto prematura ou apressada. Esse caminho envolve estudos do Livro II e da seção 11 do Livro I, empreendidos possivelmente para investigar e testar algumas hipóteses acerca da causa da gravidade. Tudo indica que essas investigações conduziram Newton a adotar a

⁴⁶⁸ No escólio das definições ele também faz a mesma advertência: “I likewise call attractions and impulses, in the same sense, accelerative, and motive; and use the words attraction, impulse, or propensity of any sort towards a centre, promiscuously, and indifferently, one for another; considering those forces not physically, but mathematically: wherefore the reader is not to imagine that by those words I anywhere take upon me to define the kind, or the manner of any action, the causes or the physical reason thereof, or that I attribute forces, in a true and physical sense, to certain centres (which are only mathematical points); when at any time I happen to speak of centres as attracting, or as endued with attractive powers”.

⁴⁶⁹ Conforme Cohen esclarece, as explicações que recorreriam a algum tipo de propriedade como a “atração” haviam sido banidas da filosofia natural, por se entender que apelavam para as *qualidades ocultas* da filosofia escolástica (Cohen, 1999, p. 148-155). Newton se esquivou de explicações sobre essa noção no Livro I, afirmando que isso seria necessário apenas quando se discutisse o problema físico, porém no Livro III, quando entra na investigação física, simplesmente introduz a noção sem qualquer justificção.

hipótese inicial da gravidade como uma *atração interplanetária* semelhante ao magnetismo, o que permitiria a generalização dos seus efeitos para todos os demais planetas.

10.5.2 Hipóteses para a causa da gravidade

Conforme já foi mencionado anteriormente, os *Principia* foi construído a partir da hipótese de Hooke. O movimento planetário poderia ser entendido como a composição de dois movimentos, um inercial, em linha reta, e outro continuamente direcionado para o centro do planeta ou do Sol. No entanto, duas pressuposições estavam incorporadas nessa hipótese, e é bastante provável que Newton tivesse plena consciência disso. (1) Que há um vácuo no intercurso planetário ou, se há algum meio, ele deve ser não-resistente ou de resistência extremamente sutil, de modo que não retardasse o movimento inercial dos planetas; (2) que há alguma força responsável pela componente do movimento em direção ao centro dos planetas que não depende da postulação de um meio resistente, como, por exemplo, uma força de natureza magnética.

Naturalmente, no *De Motu* Newton testou as consequências *matemáticas* da hipótese de Hooke e percebeu o seu potencial. Todavia, certamente isso não significa que ele estava totalmente convencido ou confortável com os pressupostos *físicos* envolvidos nessa hipótese. Não faltam evidências manuscripticas de que as filiações de Newton nessa matéria estavam muito mais próximas a teses contrárias às de Hooke. Teses que concebiam a existência de um meio entre os planetas, e que os planetas eram arrastados pela revolução desse meio pela ação de vórtices.⁴⁷⁰ Aparentemente, a proposição 5 representa o momento em que Newton se depara com a necessidade de se definir pela adesão – ou não – dos pressupostos da hipótese de Hooke. E isso porque caso ele se decidisse pela adesão de uma noção de uma força semelhante à magnética sendo exercida pelos planetas, então poderia generalizar esse poder para todos os demais corpos celestes, mesmo aqueles que não possuíam satélites; no entanto, caso percebesse qualquer outra explicação possível para o movimento planetário que não recorresse a essa noção de força magnética (ou coisa semelhante), então deveria agir com mais cautela e evitar a referida generalização. Em outras palavras, para avançar na sua investigação, Newton precisaria enfrentar a questão da causa física da gravidade ou, ao menos, efetuar uma delineação mais precisa acerca de que tipo de força é – ou poderia ser – a gravidade.

⁴⁷⁰ Veja, por exemplo, *De Gravitatione*. Newton, 2004, p.12-39.

As proposições 1, 2 e 3 do Livro III mostraram que a causa dos movimentos orbitais dos satélites de Júpiter e Saturno, dos planetas primários e da Lua é uma força centrípeta em direção a um determinado centro. Considerações físicas sobre a natureza dessa força, por consequência, não entraram em questão. A proposição 4 e a primeira parte da proposição 5 mostraram que a causa da força centrípeta da Lua e dos outros satélites e planetas referidos é a mesma força que conhecemos como gravidade. Newton relacionou a força centrípeta com um efeito físico que tem características semelhantes. Transferiu, por assim dizer, a questão da causa física da força centrípeta para a causa da gravidade. Agora, a questão não mais era a causa da força centrípeta, mas a causa da gravidade. Qual a causa desse fenômeno que não apenas impele os corpos na superfície da Terra em direção ao seu centro, como antes se pensava, mas também corpos a grandes distâncias como a Lua e outros satélites? O que seria essa força? De onde surgiria? Essa é a questão ensejada pela proposição 4 e a primeira parte da proposição 5. Embora seja verdade que Newton buscou essa resposta ao longo de todo o restante da sua vida, parece também verossímil que nesse ponto dos *Principia* ele é solicitado a se comprometer ao menos com uma determinada noção sobre a origem física da gravidade.

Certamente Newton já conhecia várias hipóteses para a causa da gravidade. Vale a pena mencionar três delas nesse ponto. A hipótese cartesiana dos vórtices de matéria, bem como algumas de suas variações propostas por Leibniz, Huygens, entre outros; a hipótese da força magnética de Kepler, Gilbert e Hooke, independente de qual fosse a explicação atribuída para o próprio magnetismo; e a hipótese *vibratória* de Hooke, que visava subsumir também a própria explicação do magnetismo.⁴⁷¹ Com efeito, uma vez que a hipótese da força magnética não informava o *mecanismo* de ação dessa força, ela ainda permanecia reticente quanto a causa última da gravidade. Apesar disso, ela pode ser considerada como uma genuína hipótese à parte, pois antes de se perguntar sobre qual é a causa do magnetismo, ainda assim seria legítimo se perguntar se a gravidade poderia ser explicada pelos conhecidos efeitos magnéticos (transferindo mais uma vez, a outro fenômeno físico, a questão da causa da força centrípeta). Portanto, podemos considerar que as três hipóteses citadas eram três hipóteses distintas. Sem dúvida, Newton conhecia a hipótese dos vórtices e a hipótese magnética, e é bastante provável que também conhecesse a hipótese vibratória de Hooke.⁴⁷² E não apenas as

⁴⁷¹ Sem dúvida, a hipótese mais conhecida para a causa da gravidade era a *aristotélica*, que entendia a gravidade como uma qualidade dos corpos graves em retornar ao seu lugar natural no centro da Terra. No entanto, o fundamento dessa explicação da gravidade apelava para aquilo que os modernos chamavam de “qualidades ocultas” e, portanto, estava certamente excluída dentre as possibilidades que tanto Newton quanto os seus contemporâneos consideravam seriamente.

⁴⁷² A hipótese da vibração, de Hooke, foi apresentada publicamente à *Royal Society* em 1682. Veja o APÊNDICE C.

conhecia. Há fartas evidências nos *Principia* que revelam que Newton teria efetivamente *testado* cada uma dessas hipóteses ao longo das investigações que culminaram na composição do seu tratado. Os testes efetuados para a causa da gravidade estariam concentrados principalmente no Livro II dos *Principia* e na seção 11 do Livro I. No Livro II, Newton teria testado a hipótese vibratória e dos vórtices; na seção 11 do Livro I ele teria testado a hipótese de uma atração semelhante ao magnetismo. Os apêndices B e C se aprofundam mais cada uma dessas partes do *Principia*. Nessa seção ficarei limitado a apresentar um resumo das conclusões desses apêndices, mas o leitor que pretender se inteirar dos detalhes dos argumentos de Newton poderão consulta-los separadamente.

No Livro II, boa parte dos estudos oferecidos teriam surgido do objetivo de se testar matematicamente algumas hipóteses relacionadas aos movimentos planetários e à gravidade.⁴⁷³ Pode-se argumentar que ao longo desse livro Newton mostrou que (1) dadas as leis do movimento, não é possível matematicamente que a vibração de um corpo imerso num fluido (mesmo muito sutil, como a suposição do éter) gere uma força como a gravidade, ou gere um movimento semelhante a revolução dos planetas, conforme a Hooke havia suposto; (2) dadas as leis do movimento, não é possível matematicamente que vórtices de matéria fluida gerem órbitas estáveis e auto-sustentadas, além de um movimento compatível com os fenômenos astronômicos, ou seja que obedece a lei das áreas e dos períodos de Kepler; e (3) dadas as leis do movimento, não é possível haver uma órbita planetária estável com a conjugação de uma força centrípeta e meio resistente no espaço interplanetário.⁴⁷⁴ Newton se convenceu, portanto, de que não havia possibilidade de se sustentar, do ponto de vista dos fenômenos matematizados, a hipótese vibratória de Hooke e a hipótese dos vórtices de Descartes. Sobre a hipótese dos vórtices, em especial, vale a pena lembrar a conclusão que encerra o Livro II: “Portanto, a hipótese dos vórtices de modo algum pode ser reconciliada com os fenômenos astronômicos e serve menos para clarificar os movimentos celestes do que para obscurecê-los”.⁴⁷⁵

Newton considerou seriamente a hipótese dos vórtices e a hipótese vibratória de Hooke como possíveis causas para o fenômeno da gravidade mas, ao final, concluiu pela incompatibilidade de ambas em relação aos fenômenos. Afastadas essas hipóteses, restava testar agora hipótese magnética. Segundo a leitura aqui oferecida, os estudos relacionados a

⁴⁷³ Veja mais informações sobre isso no APÊNDICE C.

⁴⁷⁴ Veja com mais detalhes no APÊNDICE C.

⁴⁷⁵ CW, p.790.

esse teste teriam se estruturado principalmente na seção 11 do Livro I. Mas não unicamente nessa seção.

Ao supor uma possível ação de natureza magnética como causa da gravidade, Newton evidentemente deveria ingressar numa investigação sobre os fenômenos que possuem essa mesma natureza. Não faltam evidências nos *Principia* de que ele realmente fez isso. Em vários momentos no tratado se evidencia que foram realizadas experiências com ímãs e outros corpos atrativos⁴⁷⁶. Porém os resultados dessas experiências estão um tanto espalhados pela obra. Não será conveniente fazer uma análise detalhada de cada uma das passagens que aborda esse tema nos *Principia* nesse momento. Em vez disso, para os propósitos desse trabalho nos será útil ao menos um resumo das conclusões que Newton muito provavelmente deve ter obtido dos seus experimentos com ímãs e corpos magnéticos, da perspectiva do magnetismo como possível causa da gravidade. Que conclusões Newton deve ter obtido certamente, e sem muitas dificuldades, a partir da investigação dos fenômenos magnéticos?

Em primeiro lugar, Newton deve ter concluído sem dificuldades que os fenômenos magnéticos correspondem a um tipo de *ação atrativa* cujo mecanismo pelo qual um corpo age sobre o outro é desconhecido. Embora pudesse haver muita especulação sobre o mecanismo dessa ação, o fato é que não se tinha uma notícia segura sobre a sua causa. Em segundo lugar, Newton deve ter concluído que a ação magnética é produzida entre *corpos*; e corpos que detêm certas propriedades, como o ímã e o ferro. Alguns corpos não são influenciados pela ação magnética, e outros não apresentam a propriedade de exercerem influência magnética. Em outras palavras, o magnetismo é uma ação entre *corpos*, porém somente entre *corpos de uma determinada espécie*. Em terceiro lugar, Newton concluiu que a ação da atração magnética de um corpo sobre outro gera um efeito mútuo; ou seja, que assim como as ações entre dois corpos que colidem são mútuas, também a ação magnética atrativa entre dois corpos é mútua. Essa mutualidade, evidentemente, está relacionada à terceira lei do movimento. Sobre essa conclusão, portanto, não há qualquer dúvida de que Newton realmente a obteve. Ela está expressamente estabelecida comentário à terceira lei do movimento e evidenciada no escólio das leis do movimento. Nesse escólio, Newton apresenta uma discussão detalhada sobre a validade da terceira lei nas *atrações*, tendo como principal referência os fenômenos magnéticos. Devido a importância dessa conclusão, esse ponto merece um comentário mais elaborado.

⁴⁷⁶ Provavelmente esses “outros corpos atrativos” são corpos que apresentam natureza elétrica. Em vários de seus escritos Hooke menciona as experiências de Newton com corpos elétricos. Veja Hooke, 1705.

Há razões sólidas para acreditar que a terceira lei do movimento adquiriu um papel relevante nos estudos de Newton somente quando ele se interessou em investigar o magnetismo como uma possível causa da gravidade. Mesmo uma modesta inspeção nas várias versões do tratado *De Motu* (o precursor dos *Principia* submetido à *Royal Society* em 1684)⁴⁷⁷ revela que somente na última versão de 1685 a terceira lei do movimento foi efetivamente incorporada.⁴⁷⁸ E não sem razão. É também nessa última versão que Newton aborda os conteúdos que seriam equivalentes a aqueles que estariam para além das fronteiras da proposição 5 do Livro III. Nessa versão do *De Motu*, Newton chega mesmo a apresentar um esboço do princípio da atração universal e do sistema do mundo, este último muito próximo ao que é apresentado na proposição 12 do Livro III dos *Principia*.⁴⁷⁹

As primeiras versões do *De Motu*, inclusive aquela que foi entregue à *Royal Society* em 1684, avançavam até as discussões que seriam equivalentes à proposição 4 do Livro III, que corresponde ao teste da Lua. Conforme já foi mencionado, a proposição 5 e as indagações sobre a causa da gravidade surgem exatamente das conclusões decorrentes da proposição 4.⁴⁸⁰ Portanto, deve haver poucas dúvidas que foram as reflexões suscitadas sobre a causa da gravidade na etapa equivalente à proposição 5 do Livro III que levaram Newton a investigar fenômeno do magnetismo e, por conseguinte, a perceber a ocorrência de “ações mútuas” não apenas nas colisões, mas também nas atrações magnéticas. Eventualmente, pode-se até imaginar se essa teria sido a ocasião em que Newton percebeu a importância do próprio princípio da ação e reação, e a elevou ao estatuto de uma das leis do movimento. De todo modo, quer Newton já estivesse ciente da importância dessa lei ou não, esse deve ter sido o momento no qual ele percebeu que as ações mútuas também ocorriam nos corpos magnéticos, e que por essa razão essa lei também teria rigorosamente validade para os fenômenos dessa natureza.

Mas retornando a questão proposta: que outras conclusões Newton deve ter obtido sem muitas dificuldades a partir da investigação dos fenômenos magnéticos?

Em quarto lugar, das experiências e investigações utilizando imãs e corpos magnéticos, Newton deve ter concluído que há dois tipos distintos de “ação” (ou *interação*, como diríamos hoje) entre os corpos. Uma ação “impulsiva” e outra “atrativa”. E aqui não estou sendo anacrônico.

⁴⁷⁷ Publicado em Herivel, 1965 e no *MP*, vol.7.

⁴⁷⁸ A terceira versão na classificação de Herivel. Herivel, 1965.

⁴⁷⁹ Veja o escólio ao teorema 4 na terceira versão do *De Motu* em Herivel, p. 301-302. Ou no *MP*, v.7, p.78-80.

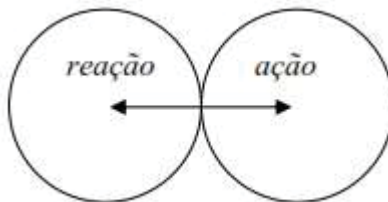
⁴⁸⁰ As versões do tratado *De Motu* não são estritamente equivalentes ao Livro I dos *Principia*. Vários elementos do Livro III estão ali presentes.

A partir da consolidação das ações mútuas entre os corpos como terceira lei do movimento, e da constatação de que essas ações mútuas também ocorrem nas atrações magnéticas, é possível se convencer que há um tipo de ação que tem natureza “impulsiva” e outro tipo ação de natureza “atrativa”. E antes de citar algumas passagens que fundamentam essa distinção, será conveniente expressar primeiramente o porquê. Nas ações entre os corpos conhecidas como “percussões” ou “colisões” a força que atua é instantânea. Na ação magnética a força não é instantânea, mas atua aparentemente de um modo contínuo. É claro que o objetivo de boa parte filósofos mecanicistas do séc. XVII (e talvez do próprio Newton até aquele momento) era explicar a força magnética por meio de ações *impulsivas* sucessivas procedentes da colisão dos corpos com uma matéria fluida não aparente, de modo a reduzir as ações magnéticas atrativas a aquelas impulsivas. No entanto, as investigações sobre as ações mútuas nos fenômenos magnéticos devem tê-lo mostrado que não era possível fazer tal redução, mesmo que se supusesse um meio fluido capaz de agir continuamente. A razão é singela. A *ação e reação* nas percussões e colisões simplesmente opera de modo distinto da *ação e reação* nos fenômenos magnéticos.

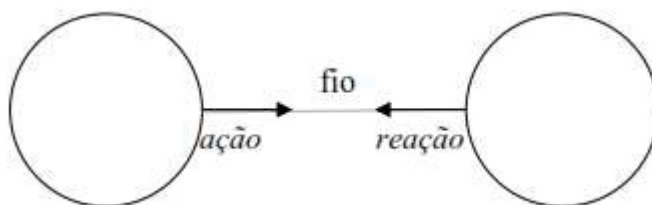
Isso é importante. Nas percussões, a terceira lei do movimento atua no sentido do *afastamento* dos corpos, como se um corpo *empurrasse* o outro, como de fato empurra. Nas ações magnéticas, a terceira lei atua no sentido da *aproximação* dos corpos, como se um deles *puxasse* o outro. *Empurrar* e *puxar* são ações que geram uma configuração distinta na manifestação da terceira lei. As ações magnéticas poderiam ser mais convenientemente comparadas a uma ação de um corpo sobre outro por meio de um *fio* que a ambos conecta e os *puxa*, ainda que a própria ação magnética da mesma maneira não possa ser reduzida perfeitamente a esse mecanismo.⁴⁸¹ A figura abaixo pode contribuir para uma compreensão mais precisa desse quadro:

⁴⁸¹ No caso de um fio pode haver uma ação contínua impedindo os corpos de se afastarem, porém não pode haver uma ação contínua impelindo os corpos a se aproximarem, como é caso da ação da magnética. Para gerar esse efeito o fio deveria ser um elástico distendido.

(i) ação e reação nas percussões



(ii) ação e reação num fio



(iii) ação e reação nas atrações

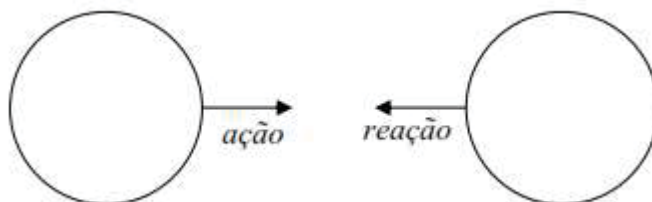


Figura 75 – Ação e Reação em diferentes situações.

Fonte: o autor

Refletindo sobre interação entre os corpos ilustradas acima se percebe que não é possível reduzir o fenômeno da atração magnética a uma ação impulsiva gerada por percussões. Ainda que a ação magnética de um ímã fosse gerada pela ação impulsiva de uma matéria fluida que o circunscreve, a força de reação deveria ocorrer na própria matéria do fluido, no sentido oposto ao impulso que imprime. Mas, definitivamente, não é isso que se observa. A força de reação é percebida no próprio corpo do ímã, impelido-o em direção ao corpo atraído. Sem dúvida, essa não é uma ação semelhante a percussão entre corpos. Com efeito, não há qualquer ação de contato conhecida que se assemelhe a esse comportamento. A análise da terceira lei nas colisões e nos fenômenos magnéticos conduz à conclusão, por

estranho que possa parecer, que há dois tipos distintos de ações entre os corpos: as ações “impulsivas” e as ações “atrativas”, e a terceira lei do movimento se constitui como critério para distingui-las. Ao que tudo indica, Newton estava consciente desse fato, embora por vezes tenha demonstrado um certo desconforto com ele, e tenha procurado dissimulá-lo.

De fato, os *Principia* são construídos com base na distinção entre esses dois tipos de ação. É interessante perceber que já no Prefácio, Newton afirma que no tratado serão investigadas várias espécies de forças, elásticas, de resistência, de pressão, de percussão e assim por diante, porém ele as classifica dentro duas grandes categorias: “quer sejam atrativas” ou sejam “impulsivas”.⁴⁸² Na Definição 4, Newton estabelece que há “diferentes origens de forças impressas tais como percussão, pressão e força centrípeta”. Em seguida, fornece como exemplos de forças centrípetas a gravidade, a força magnética e a força de um fio por meio da qual um corpo se mantém girando em sua órbita. É interessante notar que ele não apresenta qualquer exemplo de força centrípeta que poderia ser gerada por meio de colisões ou pressão.⁴⁸³ No escólio das leis do movimento, como já foi mencionado, Newton analisa a terceira lei do movimento separadamente para duas espécies de forças: nas “percussões” e nas “atrações”, afirmando que a lei vale para ambos os casos. E embora tanto na Definição 8 quanto na seção 11 Newton enfatiza que está usado os termos “impulso” e “atração” indiscriminadamente, porque, na verdade, não estaria lidando com as “espécies de forças”, ou as suas “qualidades físicas”, mas apenas com as “quantidades e proporções matemáticas”, é difícil negar que na transição das primeiras versões do *De Motu* para a última versão, Newton tenha se posicionado a favor de uma distinção clara entre as ações atrativas e impulsivas, um posicionamento que aparentemente não existia antes. Para perceber isso basta observar as ocorrências do termo “atração” no Livro I dos *Principia*. Da seção 1 a seção 9, o termo surge uma única vez; nas últimas quatro seções que se seguem a partir da seção 11 o termo aparece 414 vezes! Ao que parece, antes de efetuar os estudos que o levaram a afastar as hipóteses de um meio resistente ser responsável pela força centrípeta, Newton concebia que uma ação impulsiva poderia ser responsável por esta força; no entanto, após eliminar essas

⁴⁸² *Prefácio (1ed)*. “Entretanto, a minha preocupação aqui não é com as artes, mas com a filosofia; e escrevo não concernente a poderes manuais, mas a poderes naturais, concentrando-me principalmente em aspectos relacionados à gravidade, levidade, força elástica, resistência dos fluidos, e forças semelhantes a essas, quer atrativas, quer impulsivas” (tradução minha, do latim). Na tradução do Motte-Cajori: “But I consider philosophy rather than arts and write not concerning manual but natural powers, and consider chiefly those things which relate to gravity, levity, elastic force, the resistance of fluids, and the like forces, whether attractive or impulsive”.

⁴⁸³ Na verdade, ele apresenta um exemplo de força centrípeta que poderia ser gerada por uma força impulsiva, ou colisão, no escólio da proposição 4. Um corpo se chocando contra as paredes de um cilindro circular. No entanto a reação dessa força jamais deveria aparecer num corpo no centro do cilindro.

hipóteses e investigar os efeitos da ação magnética, ele passou a considerar nitidamente os “impulsos” e “atrações” como duas ações físicas de natureza distintas.

Há poucas dúvidas, portanto, que para Newton há pelo menos duas grandes categorias de forças na natureza. Forças que atuam *empurrando* os corpos, como a “percussão” e a “pressão”; e forças que atuam *puxando* os corpos, como a “atração” e a força de tração num fio. As duas grandes categorias de força identificadas no Prefácio, por conseguinte, seriam distinguidas não apenas por uma conveniência didática ou semântica, como alguém poderia supor, mas por uma necessidade decorrente de dois tipos de interação diferentes na natureza, o que produziria uma alteração objetiva na manifestação da terceira lei do movimento nesses corpos. Essa é a quarta conclusão que Newton deve ter obtido das suas investigações e experimentos com fenômenos magnéticos, tendo em vista o magnetismo como possível causa da gravidade.

A quinta e última conclusão decorre, na verdade, de todas as anteriores. Seria perfeitamente possível testar matematicamente a hipótese do magnetismo como causa da gravidade. Mais do que isso. Mesmo que a gravidade não fosse uma ação magnética, ainda assim, pelas últimas conclusões dos seus experimentos, haveria a possibilidade de se investigar a ocorrência de outros fenômenos cujo *tipo de interação* fosse semelhante ao magnetismo e, eventualmente, testar se a gravidade poderia ser um desses fenômenos. Dos estudos do Livro II já se havia estabelecido que a gravidade não poderia ser gerada por tipo algum de “pressão” ou movimento de fluidos, mesmo os mais exoticamente imaginados, o que introduzia uma interrogação sobre a possibilidade de ela ser resultado de uma *ação impulsiva*. Restava, agora, saber se a gravidade poderia ser um tipo de *ação atrativa* análoga ao magnetismo, se não a própria manifestação de um fenômeno magnético. Mas exatamente como Newton poderia proceder esse teste?

Caso a gravidade tivesse uma origem magnética (ou fosse uma *ação atrativa* semelhante ao magnetismo), não seria possível haver centros de força imóveis, pois como já foi mencionado, a atração magnética é sempre entre *corpos*, e como as ações são mútuas, o corpo atrativo sofreria uma força de reação do atraído. À vista disso, não sendo os centros de força imóveis, Newton poderia estudar as consequências matemáticas dessa nova condição, e investigar se haveria alguma maneira de “salvar” os fenômenos astronômicos ou, em outras palavras, se haveria alguma possibilidade dessa nova condição de “ações mútuas” permitir a ocorrência de um movimento semelhante a aquele observado pelos movimentos planetários. Ao meu ver é precisamente esse o objetivo, ainda que velado, da seção 11 do Livro I. Testar a hipótese da atração magnética. Ou mais genericamente, testar a hipótese da gravidade como

um *fenômeno atrativo entre corpos*. As palavras de abertura da seção 11 são muito esclarecedoras nesse sentido:

Até esse ponto eu estive estabelecendo os movimentos dos corpos atraídos em direção ao um centro imóvel; entretanto, dificilmente uma tal situação existe no mundo natural. Porque as atrações são sempre direcionadas para corpos, e – pela terceira lei – as ações dos corpos atrativos e atraídos são sempre mútuas e iguais; de maneira que se há dois corpos, nem o corpo atrativo nem o corpo atraído podem estar em repouso, mas ambos (pelo corolário 4 das leis), sujeitos à atração mútua, revolvem em torno do centro de gravidade comum (...). Por essa razão, estabelecerei agora os movimentos dos corpos que atraem um ao outro, considerando as forças centrípetas como atrações (...).⁴⁸⁴

Newton supõem ser a gravidade um fenômeno atrativo entre corpos análogo ao magnetismo e investiga as consequências dessa suposição. Os estudos dessa seção sob a ótica do teste da hipótese magnética são oferecidos em mais detalhes no APÊNDICE B. Aqui, será conveniente oferecer apenas um resumo das conclusões desse apêndice: (1) dois corpos massivos se atraindo mutuamente podem perfeitamente se mover em órbitas fechadas estáveis, em torno do centro de gravidade comum dos dois corpos, num meio não resistente⁴⁸⁵; (2) se a força de atração entre os dois corpos for proporcional ao inverso do quadrado da distância entre eles, o movimento numa órbita fechada descrito pelos corpos será exatamente um círculo ou uma elipse com o centro de gravidade comum sobre o centro do círculo ou sobre foco da elipse, obedecendo a lei das áreas; e da mesma forma se os corpos forem considerados um em relação ao outro; (3) se fossem considerados mais do que dois corpos que se atraem mutuamente, admitindo uma configuração entre eles semelhante aos planetas primários e o Sol, eles se moveriam aproximadamente em elipses com um Sol em um dos focos obedecendo aproximadamente a lei das áreas, e a perturbação das órbitas sofridas pelas atrações mútuas seria “menor que qualquer valor assinalável”; (4) se fossem considerados três corpos que se atraem mutuamente gerando perturbações sensíveis nas órbitas (com configuração semelhante ao Sol, Terra e Lua) a distorção das órbitas dos dois primeiros seria muito pequena, e do último produziria uma distorção semelhante à observada efetivamente na órbita da Lua.⁴⁸⁶

Portanto, a hipótese da gravidade ser causada por um fenômeno de atração entre os planetas semelhante a atração entre os corpos magnéticos apresenta uma surpreendente

⁴⁸⁴ CW, p.561.

⁴⁸⁵ Ao falar em “centro de gravidade comum” Newton, evidentemente, está considerando corpos massivos e não partículas ou corpos de massas unitárias. Portanto, nesse ponto ele passa a utilizar o conceito de *força motriz* entre os corpos, e não mais as *forças acelerativas*.

⁴⁸⁶ Ou seja, a atração do Sol sobre a Lua geraria uma força 178 vezes menor que a atração da Terra sobre a Lua. Precisamente o estabelecido pela proposição 3 para gerar a precessão de 3 graus na órbita da Lua.

concordância com os fenômenos de Kepler. Em contrapartida, as hipóteses rivais se demonstraram incompatíveis matematicamente com os fenômenos e as leis do movimento. Desse modo, haviam razões contundentes para Newton adotar um posicionamento específico sobre a espécie de força que era a gravidade, embora não pudesse explicitar especificamente o modo mecânico pelo qual essa força agia. A gravidade surge de uma atração entre os planetas; atração ao menos análoga ao magnetismo. E como a atração magnética é gerada por propriedades de corpos de certa natureza, ou de certa *espécie*, também a atração exercida pelos planetas deve ser considerada como gerada por propriedades de uma determinada espécie de corpos. Essas conclusões justificam a inferência indutiva que Newton fez no corolário 1 da proposição 5 do Livro III, e agora podemos voltar à essa proposição e prosseguir a apresentação dos demais corolários.

10.5.3 Cor.1-3: a gravidade como atração mútua entre os planetas

Na seção 10.5.1 foram mencionados três elementos presentes no corolário 1 da proposição 5 que seriam examinados. O primeiro elemento era a *generalização* da gravidade para todos os planetas; o segundo era a referência à “atração” entre os planetas; e o terceiro era a introdução da “terceira lei do movimento” no argumento. Vale a pena relembrar o corolário:

Portanto, há gravidade em direção a todos os planetas universalmente. Porque ninguém duvida que Vênus, Mercúrio, e o resto [dos planetas, primários ou secundários] são corpos da mesma espécie que Júpiter e Saturno. E uma vez que, pela terceira lei do movimento, toda atração é mútua, Júpiter gravitará em direção aos seus satélites, Saturno em direção aos seus satélites, e a Terra gravitará em direção à Lua, e o Sol em direção a todos os planetas primários.⁴⁸⁷

Nas seções anteriores se discutiu o aspecto problemático da generalização oferecida nesse corolário e um possível caminho interpretativo para legitimá-la. Conforme já foi mencionado, essa generalização não poderia ser realizada sem que se assumisse a gravidade como um efeito que surge de alguma propriedade ligada à natureza específica dos *planetas*. Mas não havia qualquer evidência sequer sugerida nas proposições anteriores em favor dessa hipótese. No entanto, procurei mostrar que após se estabelecer que a gravidade era a causa do movimento orbital tanto da Lua quanto dos satélites de Júpiter e Saturno e dos planetas primários, o próximo passo da investigação foi testar as hipóteses para a causa da própria

⁴⁸⁷ CW, p.806.

força da gravidade. E procedendo esses testes Newton se convenceu que a causa da força da gravidade era uma *atração entre os planetas* semelhante aos fenômenos magnéticos, o que sugeria fortemente que a gravidade fosse surgia de alguma propriedade específica dos planetas. Essa conclusão tornava possível estender, por indução, a gravidade para os demais planetas do sistema solar, especificamente, Mercúrio, Vênus e Marte, independentes desses planetas não apresentarem qualquer efeito que pudesse sugerir uma força em direção aos seus centros. E não apenas a esses planetas. Essa conclusão tornava possível estender a gravidade igualmente para os planetas secundários, que até então eram apenas corpos impelidos para os centros de Júpiter e Saturno, mas que a partir de agora passariam a ser considerados como possuindo uma propriedade semelhante a aquela que gerava os seus próprios movimentos.

O elemento da “generalização” estaria, portanto, justificado. E com a adoção de uma propriedade de atração entre os planetas semelhante ao magnetismo, a justificação dos outros dois elementos mencionados presentes no corolário 1 também se seguem de imediato. Conforme já foi discutido, de maneira semelhante às atrações magnéticas, a atração entre os planetas produz forças mútuas entre os planetas, em virtude da operação da terceira lei do movimento, e assim não apenas os satélites de Júpiter, Saturno e da Terra gravitarão em direção a esses planetas, e os planetas primários em direção ao Sol, mas igualmente “Júpiter gravitará em direção aos seus satélites, Saturno em direção aos seus satélites, e a Terra gravitará em direção à Lua, e o Sol em direção a todos os planetas primários”. Perceba que o que se afirma nesse corolário é precisamente o contrário do que se afirma na proposição 5. De fato não seria possível retirar essa consequência do seu enunciado sem a inclusão da hipótese da atração interplanetária e dos estudos da seção 11.

Os corolários 2 e 3 também se seguem imediatamente da hipótese da atração interplanetária. O corolário 2 afirma: “a gravidade em direção a cada planeta é inversamente proporcional ao quadrado da distância a partir do centro do planeta”. Esse corolário visa estender a proporção da variação da gravidade em relação à distância para os planetas e satélites que não apresentam os fenômenos de corpos orbitais que permitiam fazer essa inferência. Até o momento, a lei do inverso quadrado havia sido demonstrada por meio de um movimento orbital que obedecia a regra das áreas e dos períodos de Kepler. Ao se concluir que a gravidade está ligada aos próprios planetas, não há mais necessidade de recorrer ao movimento orbital para inferir aquela lei.

O corolário 3 apresenta o restante das conclusões que se obtiveram nos estudos da seção 11 do Livro I. Newton afirma: “Todos os planetas gravitam em direção uns aos outros pelos corolários 1 e 2. E portanto Júpiter e Saturno perto da conjunção, atraindo-se

mutuamente, perturba sensivelmente o movimento um do outro; o Sol perturba os movimento lunares, e o Sol e a Lua perturbam o nosso mar, conforme será explicado no que se segue”.

Na seção 11 do Livro I Newton mostra que da hipótese da atração interplanetária análoga ao magnetismo é compatível com os fenômenos astronômicos de Kepler, com grande precisão.⁴⁸⁸ No entanto, essa hipótese não apenas é compatível com esses fenômenos. Ela explica fenômenos até então não explicados. Por exemplo, as irregularidades do movimento da Lua e o fenômeno das marés. Não haviam mais do que vagas especulações sobre as causas desses fenômenos. Todavia, pela hipótese da atração mútua entre os planetas, as desigualdades do movimento da Lua foram explicadas. Elas decorrem naturalmente da “força estranha” do Sol, ou agora mais especificamente falando, da perturbação da sua órbita gerada pela atração proveniente do Sol. É possível mostrar que a atração do Sol será, em virtude da sua distância maior em relação à Terra, cerca de 178 vezes menor que a atração da Terra, gerando, portanto, um movimento de precessão de três graus e três minutos, conforme demonstrado na prop. 45 do Livro I. Completa-se, assim, o argumento da prop.3 do Livro III que havia ficado em aberto: a força centrípeta que atua na Lua em direção a Terra de fato é *exatamente* proporcional ao inverso do quadrado da distância a partir desse desse centro, e a pequena diferença observada decorre da perturbação gerada pela atração do Sol.⁴⁸⁹

Da mesma maneira, pela hipótese da atração mútua entre os planetas o fenômeno das marés é explicado. Havendo corpos fluidos na superfície terrestre sendo atraídos por uma força inversamente proporcional ao quadrado da distância até o centro da Terra e, ao mesmo tempo, sendo atraídos por uma força semelhante para a Lua e Sol, eles descreverão um movimento que “avançará e retrocederá”, semelhante ao movimento do mar.⁴⁹⁰ Na sequência do Livro III, Newton analisa em mais detalhes a matemática envolvida nessa atração, mas não será o caso do presente trabalho.

A perturbação da órbita de Júpiter e Saturno, por sua vez, não era um fenômeno sem explicação. Isso porque esse efeito sequer era um fenômeno. Como alguns comentadores já mostraram, à época da primeira edição dos *Principia* não se tinha qualquer notícia de uma perturbação na órbita desses planetas. Essa observação se trata de uma genuína predição de um novo fenômeno da hipótese de atração interplanetária. E como se sabe, essa “predição” de fato foi observada alguns anos depois.⁴⁹¹ Mais adiante voltaremos a esse “fenômeno”.

⁴⁸⁸ Veja os detalhes no APÊNDICE C.

⁴⁸⁹ A justificação da prop.3, portanto, depende da admissão da hipótese de atração interplanetária.

⁴⁹⁰ Veja os corolários 18-21 da proposição 66 do Livro I. Veja também o APÊNDICE C desse trabalho.

⁴⁹¹ A primeira edição não continha o corolário 3, que menciona a perturbação na órbita de Saturno.

10.5.4 O problema da demonstração da atração mútua entre os planetas

Apresentados os três corolários da proposição 5 do Livro III, cabe agora tentar submeter os seus conteúdos ao rigor adotado nas proposições anteriores. Certamente as teses presentes nos corolários deveriam ser expressas numa proposição individual, em vez de incluí-las de forma camuflada na proposição 5, mas após a tentativa de formulá-las como uma proposição individual se compreende porque Newton talvez tenha hesitado em fazê-lo. Uma possível maneira de *formalizar* os conteúdos dos três corolários da referida proposição seria:

Premissas universais:

1. Todo sistema de corpos que descrevem trajetórias fechadas que obedecem a lei das áreas e dos períodos em relação a um ponto interno da órbita, num meio não resistente, estão necessariamente sujeitos a uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância a partir desse centro. Além disso, as trajetórias descritas serão necessariamente circulares ou elípticas (seção 2 e 3 do Livro I, ou situação 6 e 11 da tab. 6).
2. Todo sistema de dois corpos massivos que descrevem trajetórias elípticas em torno do seu centro de gravidade comum sobre o foco da elipse, obedecendo a lei das áreas em relação a esse foco, num meio não resistente, estão necessariamente sob a ação de uma *força de atração mútua* proporcional ao inverso do quadrado da distância entre os centros desses corpos.⁴⁹² Se um dos corpos for muito maior do que o outro, o centro de gravidade comum desviará muito pouco do centro do corpo maior, e o menor descreverá uma trajetória que obedece *aproximadamente* a lei das áreas em relação ao centro do maior. Se vários corpos revolvem em torno do maior, eles descreverão trajetórias *aproximadamente* circulares ou elípticas que obedecem *aproximadamente* a lei das áreas e dos períodos (Seção 11 do Livro I).⁴⁹³
3. Nenhum sistema de corpos pode descrever trajetórias fechadas estáveis que obedecem a lei das áreas e dos períodos na presença de um meio resistente, seja pela ação de ondas produzidas por esse meio, seja pelo movimento do próprio meio, ou seja pela ação de uma força atrativa na presença desse meio (Livro II).

⁴⁹² Essa força de “atração mútua” aqui pode assumir três formas. Na primeira forma, somente o corpo maior atrai os menores. Nesse caso a mutualidade surge da ação e reação. Na segunda forma, somente os corpos menores atraem os maiores; nesse caso a mutualidade também surge da ação e reação. Na terceira forma tanto o maior quanto o menor se atraem.

⁴⁹³ Para se compreender mais claramente o que se apresenta nessa premissa o leitor precisa estudar o APÊNDICE C.

Premissa particular (Fenômenos):

4. Com o máximo de precisão que as observações astronômicas permitem determinar, no sistema solar os satélites de Júpiter e Saturno descrevem órbitas circulares (exatamente ou aproximadamente) que obedecem a lei das áreas e dos períodos em relação ao centro desses planetas (exatamente ou aproximadamente). Além disso, os planetas primários descrevem órbitas que obedecem a lei das áreas e dos períodos em relação ao centro do Sol (exatamente ou aproximadamente). E a Lua descreve uma órbita que obedece *aproximadamente* a lei das áreas em torno da Terra (Fen. 1 a 6).

Conclusão:

5. Logo, ou há uma força centrípeta atuando nos planetas primários e nos satélites de Júpiter e Saturno em direção ao centro do Sol e desses planetas (considerando-se esse centro *fixo* em relação aos corpos orbitais) proporcional ao inverso do quadrado da distância até esses centros; ou, há uma força de atração *mútua* entre os planetas e satélites proporcional ao inverso do quadrado da distância entre os seus centros.

Conforme se percebe acima, o resultado do argumento anterior não leva a uma conclusão definitiva. O nível de precisão matemática dos fenômenos astronômicos é suficiente para descartar a premissa universal 3 (da existência de um meio resistente), porém não é suficiente para permitir uma definição entre as premissas universais 1 e 2. Resta, então, se perguntar se haveria algum fenômeno que poderia servir como critério de escolha entre 1 e 2. Alguém poderia sugerir as “perturbações” nas órbitas planetárias. Elas seriam uma evidência de que haveria uma atração mútua entre os planetas. A suposição de uma atração mútua interplanetária inevitavelmente levaria à perturbação nas órbitas de um planeta sobre o outro que poderiam ser detectadas sob algumas circunstâncias, por exemplo, quando a distância fosse suficientemente próxima e a massa dos corpos suficientemente grande para produzir esses efeitos. Da mesma forma, assumindo-se uma atração interplanetária os corpos fluidos nos planetas, e particularmente na Terra, poderiam sofrer a ação dessas atrações diversas, tornando possível identificá-las e estudá-las. E de fato, como já vimos, essas situações não deixaram de ser notadas por Newton. A Lua seria um caso de uma órbita que seria perturbada devido o tamanho e a proximidade do Sol. Um outro caso seria Saturno, cuja órbita seria perturbada pelo tamanho e proximidade de Júpiter. E, igualmente, Newton mostrou que a força de atração da Lua também era capaz de explicar os movimentos do mar.

No entanto, no caso de Júpiter e Saturno esse fenômeno não era conhecido entre os astrônomos, ao menos à época da primeira edição dos *Principia*. Já no que se refere aos outros dois fenômenos, nenhum deles poderia ser considerado decisivo.

Embora a hipótese vibratória de Hooke tenha sido estudada no Livro II ela não foi explicitamente descartada por Newton. Daqueles estudos apenas se sugeriu que num meio elástico e ou não elástico não poderia haver uma força em direção ao corpo vibratório tal como Hooke propusera. No entanto, as propriedades do éter eram desconhecidas. E Newton não conseguiu uma abundância de evidências contrárias à hipótese vibratória de Hooke da mesma maneira que conseguiu contra a hipótese dos vórtices. De fato, poderia ser concebido como possível algum tipo de ação do Sol e dos planetas que gerasse um efeito desconhecido no éter que impulsionava os corpos em direção a esses astros. Em outras palavras, seria possível conceber que uma força centrípeta em direção aos planetas e ao Sol sem se precisar assumir que essa força surgisse de uma atração como aquela do magnetismo. As forças, portanto, não seriam mútuas. A ação dos planetas sobre os corpos à sua volta ocorreria por meio do éter. Não haveria de se considerar uma força de reação atuando no corpo central. E ao mesmo tempo as perturbações estariam explicadas. A Lua, por exemplo, sofreria a pressão do meio em direção à Terra mas também em direção ao Sol sem, no entanto, admitir qualquer força de reação nesses corpos. Embora um tal mecanismo desconhecido que produzisse esses efeitos fosse altamente improvável pelos estudos do Livro II, não era, com efeito, impossível. Portanto, o simples fato de haverem perturbações nas órbitas não poderia ser considerado como um fenômeno decisivo na escolha entre as premissas universais 1 e 2 do argumento acima.

Mas que fenômeno poderia ser decisivo para essa escolha? Haveria algum fenômeno que poderia assumir esse papel? Acredito que o único fenômeno que poderia assumir essa função seria aquele que pudesse mostrar inequivocamente que os grandes corpos centrais (Sol, Júpiter, Saturno ou Terra) para os quais os corpos menores tendem são, também, atraídos em direção a esses menores. Teria de ser possível detectar o movimento dos corpos maiores em torno de algum centro (o centro de gravidade), e ainda mostrar que esse centro pode ser determinado em termos da atração dos corpos menores. De imediato é possível perceber a alta dificuldade envolvida em se detectar um fenômeno como esse.

Há evidências significativas nos *Principia* de que Newton efetivamente se debruçou sobre essa questão. Trata-se do famoso “problema dos três corpos”, desenvolvido na

proposição 66 e 67 do Livro I, aqui apresentado simplificado na seção 10.3.1⁴⁹⁴ Newton colocou os seus maiores esforços na tentativa de determinar exatamente como seria o movimento de um sistema de três corpos análogos ao Sol, Terra e Lua em torno do centro de gravidade comum do sistema. Todavia ele não conseguiu chegar numa solução exata desse problema. Por outro lado, ele desenvolveu o problema de modo suficiente para buscar um fenômeno pelo qual fosse possível decidir entre as premissas 1 e 2. No enunciado das proposições 66 e 67 ele apresenta as suas conclusões que servem de parâmetro para o seu objetivo. A proposição 67, em particular, afirma que, dados três corpos de tamanhos diferentes, o movimento de um corpo maior (o Sol, por exemplo) em torno de um corpo intermediário (a Terra) descreverá uma trajetória mais próxima de uma elipse, e obedecerá mais precisamente a lei das áreas se for considerado em torno do centro de gravidade comum do corpo intermediário e do corpo menor (Terra e Lua), em vez de ser considerado em torno do centro do corpo intermediário.⁴⁹⁵ Portanto, os estudos das proposições 66 e 67 do Livro I fornecem uma sustentação matemática para uma possível conclusão definitiva entre as premissas 1 e 2 do argumento formulado anteriormente. Essa “sustentação” a que me refiro pode ser melhor percebida pela construção do argumento abaixo:

1. Se quaisquer três corpos massivos de tamanhos diferentes e suficientemente próximos um do outro (com configurações de massa e posição semelhantes ao Sol, Lua e Terra) se atraem mutuamente com uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância entre os seus centros, então a órbita relativa do corpo maior em torno dos dois corpos menores será mais próxima da forma de uma elipse e mais exatamente de acordo com a lei das áreas se o ponto de referência for o centro de gravidade comum dos dois corpos menores, do que se for o centro do corpo de tamanho intermediário (prop. 66 e 67 do Livro I).
2. O movimento relativo do Sol em torno da Terra é mais próximo da forma de uma elipse e mais exatamente de acordo com a lei das áreas tomando como referência o centro de gravidade comum da Terra e a Lua, do que tomando o centro da Terra (possível fenômeno).
3. Logo, o Sol, a Terra e a Lua atraem-se mutuamente com uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância entre os seus centros.

⁴⁹⁴ Veja também o APÊNDICE C.

⁴⁹⁵ Veja mais detalhes no APÊNDICE C. Lembre que o fenômeno da lei das áreas era válido tanto para a Terra em torno do Sol quanto para o Sol em torno da Terra.

Evidentemente, para que a atração mútua entre os planetas pudesse ser proposta formalmente numa proposição específica bastaria que se mostrasse que o fenômeno suposto na premissa 2 acima realmente ocorre. Todavia, a determinação de um fenômeno como esse era extremamente difícil de se evidenciar. Para determinar o centro de gravidade comum da Terra e Lua seriam necessários dados suficientemente precisos das massas ou pesos relativos da Terra e Lua. Todavia, o problema é que esses dados simplesmente inexistiam na época de Newton. Mais do que isso. Antes dos *Principia* determinar massas de planetas era simplesmente impensável. O conceito de “peso” aplicado para a Terra ou outros corpos celestes sequer fazia sentido. Ele teria que encontrar um meio de determinar esses valores. Além disso, mesmo que fizesse tal determinação, o nível de precisão na aferição da lei das áreas e dos períodos aplicada para a órbita do Sol em torno da Terra certamente não permitiria distinguir uma possível exatidão maior se essa órbita fosse considerada em torno do centro de gravidade comum da Terra e Lua.⁴⁹⁶ Provavelmente, essas dificuldades inviabilizaram detectar o fenômeno suposto e, conseqüentemente, inviabilizaram o projeto de validar as atrações mútuas entre os planetas por meio das conclusões matemáticas das proposições 66 e 67, e assim satisfazer as exigências de rigor do método axiomático até então seguidas.

É muito provável que a ausência dessa conclusão inequívoca, aos olhos de Newton, impediu-o de formular explicitamente uma proposição específica para os conteúdos que introduziu nos corolários da proposição 5 na primeira edição dos *Principia*. Mas isso de modo algum significa que não houvessem outras evidências das atrações mútuas. Pelo contrário. Como se mostrará na sequência desse trabalho, as evidências a favor dessa hipótese continuaram aumentando, e foram de fato suficientes para que não apenas ele, mas muitos outros de seus contemporâneos se convencessem da coerência dessa suposição em relação aos fenômenos. De todo modo, Newton não conseguiu produzir um meio de satisfazer as exigências do seu ideal de demonstração via sistema axiomatizado dos *Principia* para os conteúdos dos corolários da proposição 5. Talvez seja essa uma das razões pelas quais ele permaneceu cauteloso quanto a assumir abertamente essa ideia de atração mútua nos *Principia*, embora aqui já tenha ficado claro, como Huygens também percebera, que as conclusões de Newton estavam intimamente comprometidas com essa hipótese.

⁴⁹⁶ Por exemplo, se usarmos os dados atuais para a distância entre a Terra e a Lua e para a massa desses dois corpos é possível concluir que o centro de gravidade comum estaria cerca de 3000 Km deslocado do centro da Terra (o raio da Terra é cerca de 6300 Km). A diferença entre o centro da Terra e o centro de gravidade comum está para o raio médio da órbita do Sol em torno da Terra (144 milhões de quilômetros) como 1 está para 48 mil, muito fora dos limites de precisão possíveis de se constatar pelas observações astronômicas da época.

Na proposição 6, Newton passa a analisar a *quantidade motriz* da força da gravidade. Essa análise é importante por duas razões. Primeiro, porque sendo a gravidade uma força de atração mútua entre os planetas a posição do centro de gravidade depende da quantidade de matéria de cada planeta, como mostraram os estudos da seção 11. Mas em segundo lugar porque os estudos da seção 11 não informam a natureza exata da mutualidade da atração entre os planetas. Os mesmos resultados da seção 11 poderiam ser obtidos tanto para o corpo maior (com maior quantidade de matéria) atraindo o menor, quanto para o corpo menor atraindo o maior, e ainda para ambos se atraindo simultaneamente. Isso porque pela terceira lei do movimento, em qualquer dos casos as forças de atração serão mútuas e iguais. Uma investigação sobre a dependência entre a gravidade e a quantidade de matéria pode fornecer informações importantes para a definição do caso preciso de mutualidade de atração que ocorre entre os planetas e corpos. Como se mostrará, a única possibilidade que pode se ajustar totalmente aos fenômenos é aquela de que ambos os corpos exercem uma ação atrativa um sobre o outro.

10.6 PROP. 6: A QUANTIDADE MOTRIZ DA FORÇA DA GRAVIDADE

10.6.1 A proporcionalidade entre a gravidade e a quantidade de matéria

A proposição 6 pode ser enunciada como se segue:

Proposição 6. Todos os corpos gravitam em direção a cada um dos planetas, e para uma determinada distância a partir do centro de cada planeta a [quantidade motriz da] gravidade de qualquer corpo que seja em direção a esse planeta é proporcional à quantidade de matéria que o corpo contém.⁴⁹⁷

A prop.6 pode ser subdividida em duas partes: (1) que todos os corpos gravitam para cada um dos planetas; (2) que a gravidade em direção a cada dos planetas é proporcional à quantidade de matéria dos corpos que tendem para eles.

A primeira parte parece evidente. Na proposição 4, Newton mostrou que o movimento orbital da Lua é gerado pela mesma força responsável pela gravidade nos corpos na Terra. Na proposição 5, ele mostrou que uma força da mesma natureza é responsável pelos movimentos orbitais dos Satélites de Júpiter e Saturno e dos planetas primários em torno do Sol, e após, que há gravidade em direção a todos os planetas universalmente. Logo, em todos os planetas deve haver um efeito na superfície semelhante à queda dos graves na Terra. Na proposição 6,

⁴⁹⁷ CW, p.806.

Newton justifica afirmando que “não há dúvida que a natureza da gravidade em direção aos planetas é a mesma que em direção à Terra”. Parece evidente, portanto, que não apenas os satélites de Júpiter e Saturno gravitem para esses planetas, mas também todo e qualquer corpo nas suas proximidades; da mesma maneira que não apenas os planetas primários gravitem para o Sol mas também todo e qualquer corpo nas suas proximidades; e o mesmo para qualquer outro planeta primário e secundário.

Mas acima usei a expressão “parece evidente” porque na verdade há uma questão que precisa ser enfrentada antes de prosseguir com essa conclusão. Não são “todos os corpos” – rigorosamente – que gravitam para a Terra. Aliás esse fato está embutido no próprio conceito originário de corpo “grave”. Há corpos “graves” porque há outros que são “leves”. Há corpos que sofrem um efeito oposto à gravidade, qual seja, tendem a se afastar do centro da Terra, razão pela qual Aristóteles (ou outros antes dele) criou essa distinção. Ao estender a gravidade para Júpiter, Saturno, o Sol, e todos os planetas, Newton rompe completamente com as noções aristotélicas de corpos pesados e leves, cada qual tendendo aos seus locais naturais, mas por outro lado deixa “os corpos leves” carecendo de uma explicação ulterior. Sem essa explicação ele não pode afirmar que “todos os corpos” são impelidos para o centro da Terra; muito menos poderá dizer que todos os corpos são impelidos para cada um dos planetas. No máximo poderia dizer que *alguns corpos* (os *corpos pesados*) sofrem uma força em direção ao centro dos planetas. De todo modo, a questão *por que os corpos chamados leves não sofrem a ação dessa força e ainda sofreriam uma força contrária* ficaria em aberto.

Todavia, Newton não se preocupa em desenvolver essa problemática. Isso porque a primeira parte da proposição 6 é um corolário da segunda parte – que a gravidade em direção Terra (e conseqüentemente em direção a todos os planetas) é proporcional à quantidade de matéria dos corpos para os quais eles são impelidos. Com efeito, a maior parte da longa proposição 6 se dedica a essa questão. Como o leitor perceberá, a problemática referente aos corpos leves se explicará naturalmente a partir da justificativa dessa segunda parte. Portanto, devemos começar por ela. A referida segunda parte afirma exatamente: “(...) para uma determinada distância a partir do centro de cada planeta a [quantidade motriz da] gravidade de qualquer corpo que seja em direção a esse planeta é proporcional à quantidade de matéria que o corpo contém”.

Essa proposição contém uma diferença significativa em relação as anteriores. Até a proposição 5 se estava considerando a *quantidade acelerativa* da força da gravidade, e nessa proposição Newton considera a sua *quantidade motriz*. Embora isso não esteja explícito no enunciado da proposição 6, a variação da força com a massa é o que passa a ser investigado, e

é precisamente isso o que caracteriza a quantidade motriz da força.⁴⁹⁸ Ademais, isso também está subentendido no enunciado da proposição quando ele afirma que se propõe a proporcionalidade entre a gravidade e a massa “para uma determinada distância a partir do centro de cada planeta”. Ou seja, aqui não se está mais considerando a força *em função* a distância a partir de um centro (que é a definição de *força acelerativa*), mas, estando fixa essa distância, considera-se agora a força *em função* da massa do corpo sobre o qual é aplicada.⁴⁹⁹

Antes de discutir o caso de todos os planetas é preciso comentar o caso da Terra. E antes de demonstrar que a gravidade é proporcional à quantidade de matéria para “qualquer corpo que seja”, comecemos falando somente dos corpos *pesados*. É certo afirmar que a força que impulsiona todos os corpos *pesados* para o centro da Terra (i.e., a gravidade) é proporcional à sua quantidade de matéria?

Newton apresenta três evidências para defender que sim. A primeira é o resultado conhecido de Galileu para a queda dos corpos. Desprezando a resistência do ar, todos os corpos pesados descrevem espaços iguais em tempos iguais, ou seja, todos os corpos possuem a mesma aceleração. Pela segunda lei do movimento isso significa que a força que acelera os corpos em direção ao centro da Terra (i.e., a gravidade) é proporcional à quantidade de matéria dos corpos. A segunda lei pode ser expressa como $F \propto \Delta mv$, e como para um mesmo intervalo de tempo $\Delta v = \text{constante}$, então:

$$F \propto m$$

A segunda evidência surge dos experimentos com pêndulos. A respeito do resultado de Galileu para a queda dos corpos, Newton afirma que “a igualdade dos tempos pode ser discernida em um alto grau de exatidão por meio da utilização de pêndulos”. Como foi mostrado anteriormente o pêndulo de Huygens permitiu determinar o espaço percorrido por um corpo num determinado tempo com um nível de exatidão surpreendente. Newton descreve, então, os detalhes dos seus experimentos com pêndulos usando vários materiais diferentes, como “ouro, prata, chumbo, vidro, areia, sal comum, madeira, água, e trigo”. Em todos os casos os pêndulos permaneceram oscilando sincronizados “com iguais oscilações por um longo tempo”. Portanto, os experimentos com pêndulos fornecem uma sustentação ainda mais robusta para as conclusões de Galileu. A terceira evidência que Newton apresenta é o

⁴⁹⁸ Veja a seção 5.3.2.

⁴⁹⁹ O conceito de função não existia à época de Newton, mas é notório que ele trabalha com uma noção similar na sua distinção entre força acelerativa, motriz e absoluta.

teste da Lua. Como vimos, Newton demonstrou que também esse satélite cairia na superfície da Terra com a mesma aceleração que todos os demais corpos pesados. Assim, a força que atua em todos os corpos pesados em direção a Terra é rigorosamente proporcional à quantidade de matéria de cada corpo, de modo a gerar uma aceleração sempre constante.

Em relação à Júpiter e Saturno, Newton argumenta que a proporcionalidade entre a gravidade e a quantidade de matéria decorre imediatamente da lei harmônica. Uma vez os satélites têm supostamente quantidades de matéria diferentes, e ainda assim se observa a lei harmônica de Kepler, então todos eles estão submetidos a uma força acelerativa proporcional ao inverso do quadrado que, por sua vez, faz que eles descrevam espaços iguais em tempos iguais em direção aos centros desses planetas. Em símbolos:

$$F_{acel} \propto \frac{1}{D^2}$$

$$F_{mot} \propto \frac{m}{D^2}$$

Se a distância for considerada fixa,

$$F_{mot} \propto m .$$

No caso dos planetas em torno do Sol, Newton afirma que é possível perceber que a gravidade motriz é proporcional à quantidade de matéria em virtude do “movimento extremamente regular dos satélites de Júpiter e Saturno”. Se a gravidade em direção ao Sol não fosse proporcional à quantidade de matéria, haveria uma diferença significativa na força acelerativa (ou aceleração) em direção ao Sol de Júpiter e de cada um dos seus satélites. Essa diferença nas forças acelerativas não permitiria que os dois planetas considerados e seus satélites mantivessem suas posições relativas constantes. Ora, não é isso que ocorre. Todos eles circundam o Sol e mantêm perfeitamente as suas posições relativas, revelando que todos sofrem iguais forças acelerativas em direção ao Sol. Portanto, tanto a gravidade em direção à Terra, quanto a gravidade em direção à Júpiter, Saturno, e ao Sol são proporcionais à quantidade de matéria dos corpos pesados que para eles tendem.

Da proporcionalidade entre gravidade e a quantidade de matéria decorre a explicação da *levidade* e, conseqüentemente, a universalidade da gravidade dos corpos em direção a cada

planeta. No APÊNDICE D ofereço uma discussão sobre o conceito de quantidade de matéria dos *Principia*, e lá é esclarecido em mais detalhes porque a *levidade* decorre da proporcionalidade entre a gravidade e a quantidade de matéria. Aqui apresentarei apenas um breve resumo desse apêndice. Na filosofia aristotélica a gravidade era uma qualidade dos corpos definida pela proporção dos elementos graves e leves na matéria do corpo. Na modernidade, a filosofia mecânica introduziu significativas reformulações conceituais dentre as quais a rejeição dos quatro elementos aristotélicos, do movimento *natural* e *violento*, e a adoção de alguma forma de atomismo que admitia ser a matéria formada por corpúsculos ou partículas iguais. O peso dos corpos, portanto, passou a ser considerado como o efeito de uma força, e esse efeito definido não pela proporção de elementos leves e graves, mas tão somente pela “densidade de matéria” presente nos corpos. Dessa perspectiva, se um corpo tiver uma densidade de matéria menor que o meio fluido no qual está imerso, esse meio gravitará mais do que o corpo, cederá, e tenderá a ocupar o espaço do corpo, que será movido para uma camada superior; a camada superior repetirá o processo impulsionando o corpo cada vez mais para cima. Portanto, todos os corpos gravitam em direção a Terra na proporção da sua quantidade de matéria; numa situação envolvendo um meio fluido, o corpo que gravita mais por unidade de volume ocupará o espaço inferior, impulsionando o outro para cima. De todo modo, o corpo que apresenta um movimento ascendente, não apresenta esse movimento porque não gravita; apresenta esse movimento porque gravita menos que o meio fluido que o circunda. É precisamente isso que se observa quando um corpo apresenta um movimento ascendente na água ou no ar.⁵⁰⁰

Das observações do parágrafo anterior se obtém como corolário a primeira parte da prop.6: “Todos os corpos gravitam para cada um dos planetas”. Porque todos os corpos, quaisquer que sejam, fluidos ou sólidos, até mesmo a grandes distâncias como a Lua, gravitam para a Terra. Esse é um efeito que é percebido em todos os corpos no alcance dos experimentos e, portanto, pela Regra 3, deve-se admitir para todos os corpos universalmente. Todos os corpos universalmente gravitam para a Terra. Mas já sabemos que a gravidade surge uma propriedade de atração mútua que envolve os planetas em um dos polos, então podemos estender esse resultado aos demais planetas. Portanto, *todos os corpos* gravitam para cada um dos planetas na proporção da quantidade de matéria em cada corpo. Está justificado o enunciado da proposição 6. Passemos agora aos seus corolários.⁵⁰¹

⁵⁰⁰ Newton discute tais situações no Livro II, aqui analisado no APÊNDICE B.

⁵⁰¹ Formalizando a primeira parte da inferência da proposição 6 teríamos:

10.6.2 A gravidade como atração mútua entre os planetas e todos os corpos

Naturalmente, é possível retirar várias importantes conclusões da proposição 6. A primeira conclusão é evidente: não são apenas planetas são atraídos pelos planetas. Todos os outros corpos na superfície também. Na verdade, todos os corpos universalmente também são. A segunda conclusão decorre imediatamente da primeira: é possível que a propriedade de atração dos planetas não seja de natureza magnética, uma vez que todos os corpos indiscriminadamente são atraídos e não apenas os *ferrosos* ou com propriedades magnéticas. Uma terceira possível conclusão preliminar seria: os *planetas* correspondem a uma espécie de corpos de natureza específica que possuem uma propriedade semelhante à atração magnética, porém mais ampla, exercendo uma força em todo tipo de corpo. Poderia eventualmente estar de algum modo ligada às propriedades elétricas, que também se manifestam em corpos comuns. No entanto, essa última conclusão se mostra falsa em virtude da proporcionalidade entre a quantidade motriz da força de atração e a quantidade de matéria dos corpos.

Se os planetas atraíssem os corpos como um ímã atrai o ferro, a mudança de movimento dos corpos em direção aos planetas (ou seja, a aceleração descendente dos corpos), pela segunda lei do movimento, não poderia ser igual para todos. Naturalmente, os corpos com maior quantidade de matéria deveriam sofrer uma aceleração menor, enquanto que os corpos com menor quantidade de matéria deveriam sofrer uma aceleração maior. Mas não é isso que ocorre. Cada corpo sofre uma força de atração exatamente proporcional à sua própria quantidade de matéria. E caso essa força de atração fosse proveniente somente do planeta, não seria razoável que assim ocorresse, do mesmo modo que não seria razoável que a força de atração exercida por um grande ímã sobre um pedaço de ferro dependesse não das características do ímã, mas das características do pedaço de ferro. A bem da verdade essa conclusão já era evidente dos estudos da seção 11 do Livro I, mas foram confirmados definitivamente na proposição 6. Desse modo, restam apenas duas alternativas para esse problema: ou são os corpos que atraem os planetas, e não os planetas que atraem os corpos, ou tanto os planetas quanto os corpos se atraem mutuamente.

-
1. As propriedades presentes em todos os corpos no alcance dos experimentos são propriedades de todos os corpos universalmente (Regra 3).
 2. A propriedade de gravitar em direção à Terra está presente em todos os corpos no alcance dos experimentos (Fenômenos).
 3. Logo, a propriedade de gravitar em direção à Terra é uma qualidade de todos os corpos universalmente.

É fácil perceber que a primeira opção é problemática. Primeiro, os corpos deveriam atrair apenas planetas e não os demais corpos. Segundo, os satélites deveriam atrair os planetas assim como os corpos, pois também sofrem forças motrizes proporcionais à sua quantidade de matéria. Mas no caso de Júpiter se observaria que ao mesmo tempo ele atrairia ao Sol e seria atraído pelos seus satélites, contrariando a hipótese de que são os corpos que atraem os planetas. E mesmo que se admitisse que os planetas atraem somente os planetas (o que justificaria a proporcionalidade com a massa) e os corpos na superfície atraem somente o planeta, ainda assim se teria que admitir que um planeta atrai somente o outro planeta (ou satélite) e não os corpos na superfície deste, e assim os movimentos relativos de um planeta com os corpos na sua superfície não se manteriam, o que contrariaria os fenômenos. Desse modo, há fortes indícios de que tanto os corpos quanto os planetas se atraem mutuamente.

Ora, a admissão da atração mutua entre os planetas e os corpos leva a inevitável consequência que a atração não é uma propriedade exclusiva dos planetas. Todos planetas atraem todos os corpos, e todos os corpos atraem os planetas. Há uma atração mútua entre todos os corpos e planetas. Isso explicaria porque a quantidade motriz da gravidade que atua nos corpos é proporcional à quantidade de matéria dos próprios corpos, conduzindo às conclusões equivocadas dos antigos de que esse fenômeno não era gerado por uma força, mas por uma qualidade intrínseca desses corpos. Sendo a atração entre o corpo e a Terra o resultado da composição da força do próprio corpo e da Terra, pela terceira lei movimento, naturalmente o corpo sofreria sobre si a própria força que exerce, proporcional à sua própria quantidade de matéria.

Nesse ponto Newton tem a ocasião para descartar definitivamente a hipótese do magnetismo como causa da gravidade. No último corolário (corolário 5) da proposição 6 ele afirma:

Corolário 5. A força da gravidade é de uma natureza diferente da força magnética. Porque a atração magnética não é proporcional à matéria atraída. Alguns corpos são mais atraídos [por um ímã], outros são menos atraídos, outros não são atraídos de modo algum. E a força magnética no mesmo e único corpo pode ser intensificada e remitida e é por vezes muito maior na proporção da quantidade de matéria do que a força da gravidade; e se afastando do ímã ela decresce não na proporção do quadrado, mas quase do cubo da distância, tal como pude perceber de algumas observações grosseiras.⁵⁰²

A hipótese da atração magnética, portanto, está descartada. A atração exercida pelos ímãs e corpos magnéticos não é proporcional à massa, não atrai todo tipo de corpos, não é

⁵⁰² CW, p.810.

proporcional ao quadrado da distância, e não é invariável como aparenta ser a gravidade, ou seja, pode ser intensificada ou enfraquecida por variados processos, ou mesmo perdida. A força da gravidade é uma força de atração; é uma força de atração entre os planetas e todos os demais corpos; porém não é uma força de natureza magnética. Estamos prontos, agora, para o último passo do argumento da gravitação universal. Não apenas todos os corpos gravitam para todos os planetas; todos os corpos, universalmente, gravitam em direção uns dos outros. Há uma atração mútua entre todos os corpos universalmente.

10.7 PROP. 7: A GRAVIDADE COMO ATRAÇÃO MÚTUA ENTRE TODOS OS CORPOS

Antes de apresentar a prop. 7 – que é a última proposição da etapa da *análise* – será oportuno nesse momento resumir simplificadamente tudo o que foi demonstrado desde o início do Livro III até aqui. *Primeiro*. Newton demonstrou que uma vez estabelecidos os princípios matemático-mecânicos (i.e., a geometria mecânica de forças análoga à natureza) os fenômenos astronômicos relacionados aos movimentos orbitais dos satélites de Júpiter e Saturno implicam necessariamente na ação de uma força centrípeta sobre esses satélites, direcionada aos centros dos respectivos planetas e proporcional ao inverso do quadrado da distância a partir desse centro (Prop.1).

Segundo. Pelos mesmos princípios matemático-mecânicos, demonstrou-se que os fenômenos astronômicos relacionados aos movimentos orbitais dos planetas primários em torno do Sol implicam necessariamente na ação de uma força centrípeta sobre esses planetas, direcionada ao centro do Sol, e proporcional ao inverso do quadrado da distância a partir desse centro (Prop.2).

Terceiro. Pelos mesmos princípios matemático-mecânicos, demonstrou-se que os fenômenos astronômicos relacionados ao movimento orbital da Lua em torno da Terra implicam na ação de uma força centrípeta sobre a Lua, direcionada ao centro da Terra, e aproximadamente proporcional ao inverso do quadrado da distância a partir desse centro (Prop.3).

Quarto. Pelas Regras 1 e 2, demonstrou-se que o fenômeno da queda dos corpos na superfície da Terra e o fenômeno do movimento orbital da Lua em torno da Terra (e as deduções matemáticas daí decorrentes, como a determinação da força centrípeta da Lua na superfície da Terra) implicam que a força centrípeta responsável pelo segundo fenômeno e a

força da gravidade responsável pelo primeiro são uma e a mesma força. Em outras palavras, a gravidade é a causa do movimento orbital da Lua em torno da Terra (Prop.4).

Quinto. Pela Regra 2, demonstrou-se que os fenômenos do movimento orbital dos satélites de Júpiter e Saturno em torno desses planetas, e dos planetas primários em torno do Sol possuem a mesma espécie de causa do movimento orbital da Lua em torno da Terra, a saber uma força semelhante à gravidade, porém que atua em direção ao centro desses planetas e do Sol. Em outras palavras, demonstrou-se que há gravidade em direção a Júpiter, Saturno e o Sol, e essa a gravidade é a causa dos movimentos orbitais em cada um desses casos (Prop.5a).

Sexto. A partir desse ponto Newton passou a investigar a causa da gravidade. Pelos princípios matemático-mecânicos, demonstrou-se a impossibilidade matemática de um fluido gerar os movimentos orbitais considerados e, portanto, ser a causa da força da gravidade para a Terra, Júpiter, Saturno e o Sol. Pelos mesmos princípios matemático-mecânicos, demonstrou-se a possibilidade matemática de uma atração interplanetária análoga a atração magnética gerar os movimentos orbitais considerados e, portanto, ser a causa da gravidade (Livro II e Seção 11, Livro I).

Sétimo. Pelos princípios matemático-mecânicos (a geometria mecânica de forças agora ajustada aos novos parâmetros de uma atração mútua entre corpos análoga ao magnetismo), demonstrou-se que uma força de atração mútua entre corpos e uma força direcionada a um centro imóvel são equivalentes e redutíveis uma a outra. Além disso, demonstrou-se que considerando os tamanhos e distâncias dos planetas e satélites no Sistema Solar, todos os fenômenos astronômicos são mantidos, e as irregularidades do movimento da Lua são explicadas (Seção 11, Livro I).

Oitavo. Dos dois passos anteriores se concluiu que a causa da gravidade é uma atração mútua entre os planetas semelhante à atração magnética, ou, de outro modo, que os planetas gravitam um em direção ao outro de modo semelhante às atrações magnéticas. Ou, ainda, que a força da gravidade surge de propriedades ligadas à natureza dos planetas do mesmo modo que a força magnética surge de propriedades ligadas à natureza dos ímãs e corpos magnéticos (Escólio à Seção 11 do Livro I).

Nono. Pela Regra 4, e pela conclusão anterior, demonstrou-se que a gravidade em direção à Terra, Júpiter, Saturno e Sol deve ser estendida por indução para todos os planetas universalmente (primários e secundários). Portanto, todos os planetas se atraem mutuamente, ou gravitam um em direção ao outro. De outro modo, a gravidade é uma propriedade de

atração mútua entre todos os planetas ou, ao menos, surge de uma das propriedades dos planetas em geral (Prop.5b).

Décimo. Pela Regra 3 e pelos fenômenos da queda dos corpos e do movimento orbital dos planetas e satélites, demonstrou-se que a quantidade motriz da gravidade é proporcional à quantidade de matéria dos corpos, e disso se segue que todos os corpos universalmente gravitam para cada um dos planetas. De outro modo, demonstrou-se que a atração mútua não é um efeito que ocorre entre planetas apenas, mas entre planetas e corpos em geral (Prop.6).

Mas a proporcionalidade entre a quantidade motriz da força da gravidade atuando nos corpos e a sua quantidade de matéria necessariamente leva a outra consequência que não pode deixar de ser enunciada. No parágrafo final da discussão da proposição 6, Newton apresenta um último argumento a favor da proporcionalidade entre a gravidade e a quantidade de massa que terá consequências mais profundas. Ele afirma:

Os pesos [ou gravidades] das partes individuais de cada planeta em direção a qualquer outro planeta estão entre si como as [quantidades de] matérias nas partes individuais. Porque se algumas partes gravitassem mais, e outras menos, do que na proporção da sua quantidade de matéria, o planeta todo, de acordo com as partes que nele mais abundam, gravitariam mais ou menos do que na proporção da quantidade de matéria do todo. E não importa se essas partes são externas ou internas.⁵⁰³

Newton está dizendo que se a gravidade é proporcional à quantidade de matéria dos planetas, então cada parte de um planeta deve gravitar em direção ao outro na proporção exata da quantidade de matéria da parte, pois se assim não fosse o planeta como um todo não gravitaria na proporção da sua quantidade de matéria. Portanto, todas as partes dos planetas, externas ou internas, gravitam um em direção ao outro na proporção exata da sua quantidade de matéria.

A conclusão acima tem uma importante consequência expressa nos corolários 1 e 2 da proposição 6. No corolário 1 Newton declara: “Portanto, a gravidade dos corpos não depende das suas formas e texturas”. Com isso Newton parece querer dizer que a gravidade depende somente da *matéria* e não da maneira de organização, qualquer que seja, dessa matéria. Isso fica mais claro no seu comentário ao corolário 2. Ele afirma que conforme a opinião de Aristóteles, Descartes e outros, os corpos se distinguem entre si somente pela “forma da sua matéria”, ou seja, não pela *própria matéria*, que seria igual em todos os corpos. E uma vez que a gravidade em todos os corpos é proporcional somente à sua quantidade de matéria, disso decorre que ela só depende da *matéria* e não do seu arranjo particular.⁵⁰⁴ Porque

⁵⁰³ CW, p.808-809.

⁵⁰⁴ À primeira vista Newton estaria evocando a doutrina aristotélica da matéria e forma. Os corpos, bem como toda a realidade, se distinguiriam apenas pela matéria e forma. No entanto, ao mencionar Descartes, percebe-se

imagine que “o éter ou qualquer outro corpo fosse inteiramente desprovido de gravidade ou gravitasse menos do que na proporção da sua quantidade de matéria”, então, uma vez que os corpos se distinguem apenas pela “forma da sua matéria”, numa eventual alteração da sua “forma”, esse corpo (o éter ou outro qualquer sem gravidade) poderia se “transmutar gradativamente” num corpo que gravita na proporção da sua quantidade de matéria; por outro lado, “os corpos mais pesados”, também pela alteração da “forma da sua matéria” poderiam “gradativamente perder a sua gravidade”. Mas é claro que não se tem notícia de corpo algum que tenha perdido a sua gravidade, sendo essa hipótese totalmente contrária à experiência. Portanto, a gravidade depende somente da *matéria* e não da *forma* de organização dessa matéria. Ora, isso é importante porque implica que a gravidade de um corpo surge e é composta da gravidade das suas partes mínimas de matéria.⁵⁰⁵

No entanto, como a força da gravidade que atua no corpo é (1) ou a combinação da atração que ele próprio exerce no planeta e da força do planeta; ou (2) simplesmente a reação da atração que ele próprio exerce no planeta; então a força de atração que o corpo exerce, ou que o corpo e o planeta exercem simultaneamente, surge e é composta das forças de cada uma das suas partículas individuais. E a Regra 3 afirma que toda propriedade universal também é uma propriedade das mínimas partes individuais da matéria, e toda propriedade que surge das mínimas partes individuais da matéria é também uma propriedade universal. Portanto, pela Regra 3, a atração mútua entre os corpos e os planetas é, na verdade, uma atração mútua entre todos os corpos universalmente. Mais do que isso. É uma atração entre todas as partículas dos corpos universalmente.⁵⁰⁶

Portanto, a proposição 7 é um corolário da proposição 6. Afirma Newton na famosa proposição conclusiva do argumento da gravitação universal:

Proposição 7

A gravidade existe em todos os corpos universalmente, e é proporcional à quantidade de matéria em cada um.⁵⁰⁷

que o que Newton tem em vista já é a reinterpretação moderna dessa doutrina de Aristóteles. Para Boyle, por exemplo, a “forma da matéria” parece significar o arranjo específico que os corpúsculos de matéria estão organizados. Uma vez que tudo é feito da mesma matéria a diferença de natureza entre os corpos surgiria não da própria matéria, mas da sua “forma”, ou seja, da forma de organização dessa matéria. Veja a seção 12.1.2 e o APÊNDICE D.

⁵⁰⁵ Ora, essa consequência, com efeito, deveria ser esperada de qualquer propriedade que seja proporcional à quantidade de matéria dos corpos. Isso foi mostrado na seção 5.3.2 para o caso da força motriz. A quantidade motriz da força atuando num corpo surge da soma da quantidade acelerativa da força atuando sobre cada partícula do corpo. Isso é o mesmo que dizer que a gravidade motriz do todo surge da gravidade das partes.

⁵⁰⁶ As regras 3 e 4 serão abordadas em mais detalhes no capítulo 12.

⁵⁰⁷ CW, p.810.

Embora não cite expressamente a Regra 3, a justificativa de Newton segue o raciocínio iniciado da proposição anterior.⁵⁰⁸ Ele afirma:

“(...) uma vez que todas as partes do planeta A são pesadas [ou gravitam] em direção ao planeta B, e uma vez que a gravidade de cada parte está para a gravidade do todo assim como a [quantidade de] matéria das partes está para a [quantidade de] matéria do todo, e uma vez que para toda ação (pela terceira lei do movimento) há uma igual reação, segue-se que o planeta B gravitará por sua vez para todas as partes do planeta A, e a sua gravidade em direção a cada parte estará para a sua gravidade em direção ao todo do planeta como a [quantidade de] matéria dessa parte estará para a [quantidade de] matéria do todo. Q.E.D.⁵⁰⁹

Resumidamente, todas as partes do planeta A gravitam para B na proporção da quantidade de matéria de cada parte; e pela terceira lei do movimento B gravita para todas as partes de A na proporção da quantidade de cada parte de A. E embora Newton não o diga, subentende-se que o contrário também ocorre. Todas as partes do planeta B gravitam para A na proporção da quantidade de matéria de cada parte de B; e pela terceira lei do movimento A gravita para todas as partes de B na proporção da quantidade de matéria de cada parte de B.

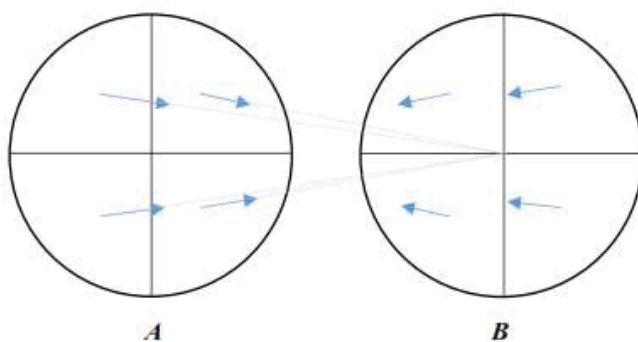


Figura 76 – Atração das partes de A em direção a B e das partes de B em direção a A.
Fonte: o autor

Mas dizer que todas as partes do planeta A gravitam para o planeta B e todas as partes do planeta B gravitam para o planeta A é o mesmo que dizer que cada parte do planeta A gravita para todas as partes de B, e cada parte de A gravita para todas as partes de B.⁵¹⁰

⁵⁰⁸ Lembre que a Regra 3 foi acrescentada somente na segunda edição. Newton demonstrou uma certa resistência na segunda edição e terceira edição em alterar o texto e as proposições originais. Ele preferiu incluir escólios e apêndices sempre que possível. No caso da aplicação da Regra 3, para chegar à conclusão da gravitação universal a sua menção explícita foi incluída nos comentários da própria Regra 3, que será apresentado na próxima seção.

⁵⁰⁹ Ibid, p.810-811.

⁵¹⁰ Essa conclusão é mostrada a partir da seção 12 do Livro I dos *Principia*.

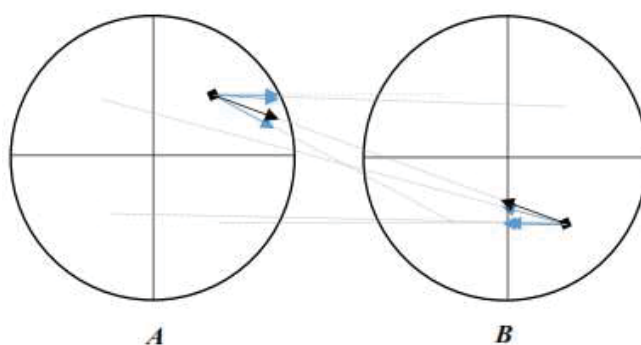


Figura 77 – Atração de cada parte de A em direção a cada parte de B, e vice-versa.
Fonte: o autor

Portanto, cada parte do planeta A gravita para cada parte do planeta B. E naturalmente, isso significa que toda matéria gravita em direção a toda matéria, ou todos os corpos gravitam para todos os corpos na proporção da quantidade de matéria de cada um. Ou ainda, expressando em termos de *atração*, isso significa que há uma atração mútua não apenas entre todos os corpos, mas entre toda a matéria. *Conforme queríamos demonstrar.*

Está demonstrado, portanto, o argumento da gravidade universal. Os movimentos orbitais dos planetas e satélites são gerados por uma força centrípeta; essa força centrípeta é gerada pela força da gravidade, que também existe nos outros planetas; essa força da gravidade é gerada por uma força de atração mútua entre os planetas e entre os planetas e os corpos; essa força de atração mútua entre os planetas e os corpos é gerada por uma força de atração mútua entre todos os corpos; e, por fim, essa força de atração mútua entre todos os corpos é gerada por uma força de atração mútua entre todas as partículas de matéria dos corpos. Chegamos à conclusão de um dos argumentos mais fabulosos da história da ciência.

Mas, evidentemente, Newton não pára nesse ponto. Antes de prosseguir em direção à demonstração do sistema do mundo ele ainda oferece alguns complementos adicionais à essa conclusão que merecem ser comentados. Esses comentários se encontram principalmente nos corolários da proposição 7 e na discussão oferecida à Regra 3, que foi omitida propositalmente na seção aqui oferecida sobre as “Regras para Filosofar”. Eles serão úteis para reforçar a validade da conclusão acerca da gravitação universal, e também para aprofundar a compreensão do significado desse princípio. Começemos com os complementos na própria proposição 7.

10.7.1 A quantidade absoluta da força da gravidade

Além do que foi apresentado na seção anterior, na proposição 7 Newton ainda fornece um complemento da prova da gravidade universal com base na proposição 69 do Livro I, além de dois corolários. No corolário 1, ele supõe uma possível objeção à conclusão da atração mútua entre todos os corpos. Certamente alguém poderia argumentar que uma atração como essa entre todos os corpos “de modo algum é detectada pelos nossos sentidos”. De fato, não observamos uma atração entre pedras, pessoas, árvores, ou outro qualquer objeto, mesmo colocados numa superfície com pouquíssimo atrito, como flutuando na água. Então, como acreditar que há uma atração mútua entre todos os corpos? Newton responde que a gravidade mútua entre dois corpos quaisquer na superfície da Terra “é muito menor do que os nossos sentidos poderiam detectar, uma vez que tal gravidade está para a gravidade em direção a toda a Terra assim como [a quantidade de matéria de cada um de] esses corpos estão para [a quantidade de matéria de] toda a Terra”. Para que a resposta de Newton fique mais clara convém antes lançar mão da determinação da “quantidade absoluta” da força da gravidade, levada à efeito na proposição 69 do Livro I.

Conforme foi destacado na seção 5.3.2, Newton distinguiu três *quantidades* que expressam a força centrípeta. A “quantidade acelerativa”, “motriz” e “absoluta”. Como foi argumentado naquela seção, a principal diferença entre as três quantidades está em que a força *acelerativa* e *motriz* referem-se à proporção matemática de uma causa obtida exclusivamente a partir dos seus “efeitos motrizes”, ou seja, a partir dos seus efeitos em termos de movimento nos corpos sobre os quais essa causa atua. A *quantidade absoluta* não é a proporção da causa pelos seus efeitos, mas a proporção da causa a partir da sua origem, ou das características do corpo que produz os efeitos. Ao longo de todo o Livro I, e até a proposição 5 do Livro III, foram consideradas somente as quantidades *acelerativas* e *motrizes* da força.⁵¹¹ Em outras palavras, até a proposição 5 se considerou apenas a ação de uma força de origem desconhecida pelos *efeitos motrizes* gerados nos corpos sobre os quais atua. Esses *efeitos motrizes* poderiam ser resumidos no movimento centrípeto dos planetas e satélites em direção a um determinado centro e no movimento de queda dos corpos em direção ao centro da Terra. Além disso, os referidos efeitos motrizes dos corpos foram investigados de duas maneiras:

⁵¹¹ A análise da proporcionalidade entre a gravidade e quantidade de matéria apresentada na proposição 6 poderia ser realizada sem assumir a posição sobre a causa da gravidade que levou à generalização proposta do corolário 1 da proposição 5. Na verdade, acredito que a referida proporcionalidade já pode ser obtida como um corolário da proposição 4.

primeiro, somente *em função* distância a partir do ponto para o qual eles são impelidos, ignorando a quantidade de matéria dos corpos impelidos (essa é a *força acelerativa*); e segundo, fixando a distância e considerando a força *em função* da quantidade de matéria (essa é *força motriz*). Ambas as investigações forneceram informações decisivas a respeito da causa desconhecida procurada.

Em primeiro lugar, qualquer que fosse a causa investigada ela deveria gerar uma *força acelerativa* nos corpos que varia com a distância na proporção do inverso do quadrado da distância. Em segundo lugar, qualquer que fosse a causa investigada ela deveria gerar uma *força motriz* nos corpos proporcional à própria massa do corpo sobre o qual atua. Em outras palavras, qualquer que fosse a causa investigada, dos efeitos dessa causa sobre os corpos foi possível determinar que a sua quantidade matemática era proporcional à massa dos corpos sobre os quais atua, e proporcional ao inverso da distância desses corpos até um determinado ponto fixo (ou aproximadamente fixo). Considerando-se a Lua como exemplo, os seus *efeitos motrizes* poderiam ser considerados matematicamente pela sua força acelerativa (F_{acel}) e pela sua força motriz (F_{mot}). Assim, seria possível expressar matematicamente a proporção da força de origem desconhecida (F) que atua sobre a Lua:

$$F \propto F_{acel} \propto \frac{1}{D^2}$$

$$F \propto F_{mot} \propto m$$

E, portanto,

$$F \propto \frac{m}{D^2},$$

onde m é a quantidade de matéria da Lua e D é a sua distância a partir do ponto fixo para o qual a força é direcionada.

A proporção acima, no entanto, não se trata ainda de uma caracterização matemática completa dessa força de origem desconhecida. Isso porque não se conhece a dependência dessa força com as características da “fonte” a partir da qual se irradia. Evidentemente, isso apenas seria possível após determinação da própria fonte desconhecida. Pois bem, por meio da proporção encontrada acima e por meio dos estudos do Livro II e da seção 11 do Livro I, Newton determinou que essa “fonte desconhecida” eram os próprios corpos centrais (no

exemplo acima, a Terra). Ou melhor, Newton determinou que a causa dos efeitos considerados era uma *ação atrativa* empreendida pelos corpos envolvidos (evidenciada pela manifestação da terceira lei do movimento). Todavia, com base na Regra 3 e nos estudos das seções 12 a 14 do Livro I, concluiu-se definitivamente que essa *ação atrativa* não partia de apenas um dos corpos envolvidos na atração, mas de ambos, porque, com efeito, ela surgia da atração mútua entre todas as partículas de matéria dos corpos. Foi determinado, portanto, a “origem” dos efeitos antes estudados. A movimento de queda dos corpos e o movimento centrípeto dos planetas e satélites era gerado pela igual atração de todas as partículas de matéria dos corpos para os quais eles eram impelidos. E descoberta a “fonte” dos efeitos estudados se poderia avaliar, então, a *quantidade absoluta* da força que produzia aqueles efeitos, observando a variação dessa quantidade com a variação da fonte. Ora, uma vez que a atração mútua entre os corpos surge da atração entre todas as partículas, e depende apenas da matéria e não de qualquer outra característica (que está vinculada à forma de organização da matéria), então a *quantidade absoluta* da força da gravidade varia somente com a quantidade de matéria da fonte a partir da qual se irradia. Voltando ao exemplo da Lua, a origem da força que provoca o seu movimento centrípeto é o próprio corpo central que ela circunda, a Terra. E a quantidade absoluta dessa força varia somente com a massa da Terra (é proporcional a massa da Terra). Assim, teríamos uma caracterização matemática completa da força entre a Terra e a Lua. Sendo m_A e m_B as massas da Terra e da Lua respectivamente, e sendo D a distância entre a Terra e a Lua, teremos que:

$$F \propto F_{acel} \propto \frac{1}{D^2}$$

$$F \propto F_{mot} \propto m_B$$

$$F \propto F_{abs} \propto m_A$$

E, portanto,

$$F \propto \frac{m_A \cdot m_B}{D^2} \quad [78]$$

A quantidade da força antes de origem desconhecida que a atua na Lua é proporcional às quantidades de matéria da Lua e da Terra e ao inverso do quadrado da distância entre esses dois corpos. Naturalmente, esse resultado é válido não somente para a Terra e a Lua, mas para qualquer par de corpos que se imagine. Essa é a formulação completa quantidade matemática relativa à força que costumamos chamar de gravidade. Com efeito, a proporção [78] é a formulação mais completa da gravitação universal que se pode obter nos *Principia*. É oportuno lembrar, agora, o famoso enunciado atual geralmente vinculado a lei da gravitação universal em livros didáticos: *matéria atrai matéria na razão direta das suas massas e não razão inversa do quadrado da distância que as separa*.

A partir da formulação completa acima é mais fácil compreender a possível objeção levantada por Newton no cor. 1 da proposição 7. Ele afirma que a atração entre dois corpos na superfície da Terra não é observada porque a força envolvida entre eles seria muito menor do que qualquer quantidade que poderia ser detectada pelos nossos sentidos. De posse da proporção anterior, considere dois corpos com a mesma densidade média da Terra (d_T) com volume de 1 pé parisiense cúbico cada, e posicionados numa distância de 1 pé parisiense um do outro. A força da gravidade (F_1) entre eles será:

$$F_1 \propto \frac{(1d_T)^2 \cdot (1d_T)^2}{1^2}$$

$$F_1 \propto d_T^2.$$

Considere agora que o raio da Terra é da ordem de 10 milhões de pés parisienses. O volume do planeta será da ordem de 10 milhões elevado ao cubo, ou 10^{21} , e a sua quantidade de matéria $10^{21}d_T$. Então, a força da gravidade entre a Terra e um dos corpos anteriormente considerados, a uma distância igual ao raio da Terra, será proporcional a:

$$F_2 \propto 10^{15}d_T^2.$$

Assim, grosso modo, a proporção entre força da gravidade atuando em dois corpos na superfície da Terra e a força da gravidade entre um deles e o planeta será:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{1}{10^{15}} \quad [79]$$

A força da gravidade entre dois corpos na superfície da Terra está para a força entre um dos corpos e o planeta assim como 1 está para 1 quadrilhão. Como Newton alertou, a primeira força é, de longe, “muito menor do que os nossos sentidos poderiam detectar”, e isso para qualquer massa de corpos que se considere na superfície da Terra. Portanto, há de fato uma força de atração mútua entre todos os corpos e toda a matéria, mesmo que em certas circunstâncias ela não seja detectável.

10.7.2 A gravidade como interação fundamental

Da análise da seção anterior o leitor deve ter notado uma pequena discrepância em relação à discussão sobre força absoluta da Terra. Na verdade não se pode dizer, rigorosamente, que a Terra é a “fonte” da força que atua sobre a Lua assim como ímã é a fonte da força que atrai um pedaço de ferro. Não se pode admitir esse raciocínio porque a Lua também atrai a Terra proporcionalmente à sua quantidade de matéria e, pela terceira lei movimento, ela também sofre o *efeito motriz* da sua própria atração. Assim, a *fonte* da força que gera o movimento centrípeto da Lua em direção à Terra não é apenas a Terra, mas a própria Lua. Isso significa que rigorosamente deveríamos mencionar duas *quantidades absolutas* de forças atuando, uma proveniente da origem que é a Lua e outra da origem que é a Terra, cada qual produzindo a sua própria força de reação sobre si mesma.

Para tornar mais claro o raciocínio, chamemos a atração entre duas partículas de matéria de *atração fundamental*. Naturalmente, a força dessa atração fundamental é igual para qualquer par de partículas numa mesma distância entre elas. Assim, se chamarmos a força da *atração fundamental* de F_i , a força absoluta da Terra seria a soma da *atração fundamental* exercida por cada partícula individual de matéria da Terra sobre cada partícula de matéria da Lua. E a força absoluta da Lua seria a soma da atração exercida por cada partícula individual de matéria da Lua sobre cada partícula individual de matéria da Terra. A figura abaixo pode favorecer a compreensão.

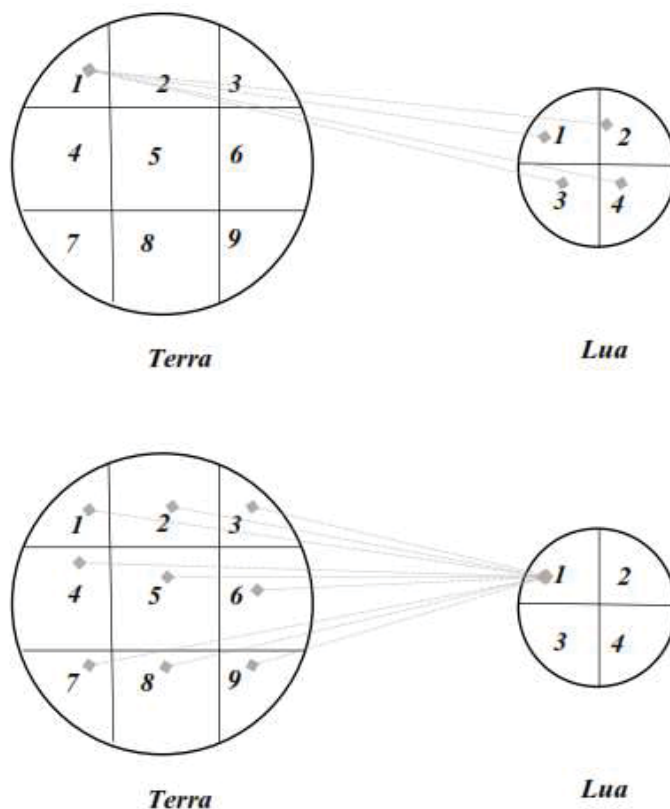


Figura 78 – Atração entre as partes da Terra e da Lua hipoteticamente imaginadas com 9 e 4 partes respectivamente. Cada parte da Terra atrai todas as partes da Lua. E cada parte da Lua atrai todas as partes da Terra. Fonte: o autor

Pela figura simplificada acima, a força absoluta da Terra seria $F_{abs T} = 9 \cdot 4 \cdot F_i$; e a força absoluta da Lua seria $F_{abs L} = 4 \cdot 9 \cdot F_i$; e genericamente, dados dois corpos A e B , a força absoluta de A será $F_{abs A} = m_A \cdot m_B \cdot F_i$, e a força absoluta de B será $F_{abs B} = m_B \cdot m_A \cdot F_i$. A força absoluta exercida pelo corpo A em B é rigorosamente igual à força absoluta exercida pelo corpo B em A . Portanto, a partir dessa análise, a força absoluta total que atua em cada corpo será a soma dessas duas forças conforme pode ser percebido pela figura abaixo:

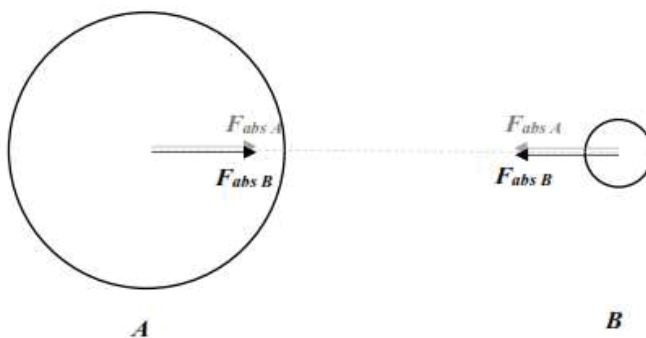


Figura 79 – Força absoluta entre A e B.
Fonte: o autor

A força absoluta total (F_{abs}) que atua tanto no corpo A quanto no corpo B será:

$$F_{abs} = F_{abs A} + F_{abs B}$$

$$F_{abs} = m_A m_B F_i + m_B m_A F_i$$

$$F_{abs} = 2F_i m_A m_B ,$$

o dobro da força absoluta de cada fonte individual. Então, a uma distância fixa, a força da gravidade absoluta entre os corpos A e B a pode ser escrita pela proporção:

$$F_{abs} \propto m_A m_B$$

Como Newton está trabalhando com proporções, os resultados anteriores admitem que se interprete a força absoluta da gravidade tanto como a soma das forças absolutas provenientes de duas fontes distintas, quanto uma única força absoluta de interação entre dois corpos, que não poderia ser concebida sem a presença de ambos os corpos. Em outras palavras, a atração entre os corpos poderia ser considerada como duas operações distintas que se somam, ou como uma única operação de atração entre dois corpos. A questão também poderia ser entendida da seguinte forma: na figura abaixo, há uma operação de atração entre 1 e 2 e outra entre 2 e 1, ou há uma única operação entre 1 e 2?

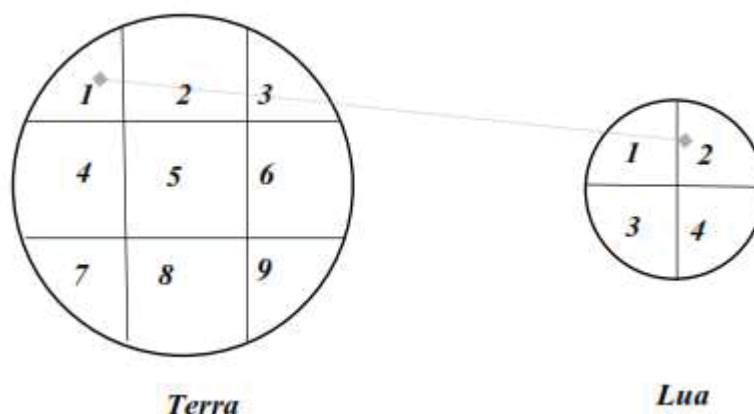


Figura 80 – Força entre a parte ‘1’ da Terra e a parte ‘2’ da Lua.
Fonte: o autor

É difícil responder. Em qualquer situação, a proporção da força absoluta seria a mesma, conforme se mostrou acima. No entanto, Newton aparentemente optou pela segunda opção. No *De Mundi Systemate*, enquanto discorria sobre a analogia entre a atração dos planetas e dos corpos atrativos terrestres (como ímãs), ele declara enfaticamente:

Embora as ações mútuas de dois planetas possam ser distinguidas e consideradas como duas (...) uma vez que essas ações ocorrem em ambos, *elas não produzem duas, mas uma operação entre dois termos*. Dois corpos podem atrair um ao outro pela contração de uma corda interposta. Há uma dupla causa da ação, a saber, a disposição de ambos os corpos, assim como há uma dupla ação na medida em que a ação é considerada sobre dois corpos; mas considerada entre os corpos, *há somente uma única ação*. (...) Não é por meio de uma ação que o Sol atrai Júpiter, e por meio de outra que Júpiter atrai o Sol; mas é por meio de uma ação que o Sol e Júpiter são impelidos a se aproximar um do outro. Pela ação com a qual o Sol atrai Júpiter, Júpiter e o Sol tendem a se aproximar (pela terceira lei do movimento); e pela ação com a qual Júpiter atrai o Sol, do mesmo modo, Júpiter e o Sol tendem a se aproximar. Mas o Sol não é atraído em direção a Júpiter por uma ação dupla, nem Júpiter em direção ao Sol por uma ação dupla; *trata-se de uma única ação intermediária* por meio da qual ambos são levados a se aproximar.⁵¹²

Está claro, portanto, que para Newton a força da gravidade se trata de “uma [única] operação entre dois termos”. Não haveria uma força entre 1 e 2 e outra entre 2 e 1, mas uma única operação entre essas duas partes. E isso é importante. Considerar que 1 age sobre 2 e 2 age sobre 1, uma vez que estamos falando de partículas fundamentais de matéria, leva à conclusão que a gravidade é uma *propriedade essencial* da matéria. Considerar que há apenas uma única operação entre duas partículas leva à conclusão que a gravidade é uma *operação fundamental* entre duas partículas, ou melhor, que a gravidade é uma *interação* entre duas partículas, à exemplo de um choque entre duas partículas. Em outras palavras, devido certas propriedades mais essenciais que eventualmente podemos desconhecer, quando duas partículas se aproximam uma da outra elas percebem uma ação atrativa mútua, mas não necessariamente porque cada partícula tenha um poder de atrair. Desse modo, a gravidade aristotélica que era uma *qualidade essencial* dos corpos e passa a ser considerada o *efeito de uma força* na modernidade, quase volta a ser considerada uma *qualidade essencial* pela análise de Newton, a menos desse detalhe muito sutil. Não é possível concluir que a gravidade é uma propriedade essencial que já está presente em um único elemento de matéria. Das investigações que culminaram na proposição 7 dos *Principia* é possível saber apenas que duas partículas próximas uma da outra são impelidas a se aproximarem mutuamente. De fato, dessa constatação não é possível concluir que a gravidade é uma *propriedade essencial* da matéria, embora seja tentador fazê-lo. No máximo, seria possível concluir que ela é uma *operação*

⁵¹² MC, p.568-569. Grifos meus.

fundamental da matéria, ou uma interação fundamental como, aliás, os sucessores de Newton assim consideraram. É com base nisso, aparentemente, que a gravidade passou a ser considerada abertamente na geração seguinte como uma legítima *ação* – ou *interação* – entre corpos, de maneira semelhante ao *contato*, a despeito do próprio Newton ter hesitado em assumir essa possibilidade.

De todo modo, a recusa de Newton em admitir a gravidade como uma “qualidade essencial” dos corpos surge somente na segunda edição dos *Principia*, nos comentários da Regra 3. Do que foi exposto nos parágrafos anteriores é possível perceber que haviam motivos mais sólidos para essa posição além daqueles que visavam afastar às críticas à sua teoria. Dos comentários de Newton à Regra 3 também é possível chegar às mesmas conclusões. Além disso, é possível notar que os últimos passos para chegar na gravitação universal repousam amplamente na Regra 3. Portanto, será imprescindível analisar os comentários e justificativas que Newton oferece para considerar a aplicação dessa regra como válida no seu argumento. Isso será feito no capítulo 12. Por ora, concedamos que a conclusão da gravidade universal obtida na proposição 7, mesmo sem a análise da Regra 3, seja válida, e avancemos à demonstração do sistema do mundo.

11 O SISTEMA DO MUNDO

No capítulo 10 foram apresentados os passos demonstrativos da etapa da *análise*: a determinação da *causa* dos movimentos dos corpos celestes a partir dos seus *efeitos* – os fenômenos astronômicos. Conforme Newton adiantou no Prefácio, essa etapa foi desenvolvida “por meio de proposições matemáticas” demonstradas nos Livro I e II, ou, como tenho afirmado até aqui, por meio da sua geometria mecânica análoga à natureza. Com o auxílio dessa geometria ele pôde partir dos movimentos planetários e chegar à causa desses movimentos, a saber, uma força de atração mútua entre todos os corpos, e mais precisamente, entre todas as partículas da matéria – a gravitação universal. Resta, agora, a etapa da *síntese*: deduzir os *efeitos* (ou os movimentos) partir dessa causa recém descoberta. É isso que se seguirá a partir da proposição 8 do Livro III.

Nesta altura vale a pena enfatizar o objetivo dessa etapa da *síntese*. Alguém poderia se perguntar sobre a diferença entre os “efeitos” na etapa da *síntese* e os “efeitos” na etapa da *análise*. À primeira vista a dedução dos efeitos na *síntese* pode parecer despropositados. Afinal, já os conhecemos. Mas não é caso. Na etapa da *análise* os efeitos considerados são aqueles obtidos e formulados a partir dos *fenômenos*, isto é, a partir da *experiência*. Na etapa da *síntese* os efeitos são obtidos por meio da dedução *a priori* a partir das suas causas. Portanto, independentemente da experiência. Efeitos análogos considerados nas etapas da análise e síntese, por conseguinte, não serão necessariamente correspondentes, e esse é precisamente o propósito dessa última etapa: avançar para além da experiência. Sendo as causas encontradas verdadeiras será possível (1) deduzir efeitos que não foram – ou não são – detectados pela experiência; e (2) deduzir os *verdadeiros* efeitos, pois os nossos sentidos são limitados para captar a realidade das coisas. É possível perceber essa distinção entre os efeitos na advertência de Newton na abertura da proposição 13: “Nós já discutimos esses movimentos a partir dos fenômenos. Agora que os princípios dos movimentos foram encontrados, deduziremos os movimentos celestes *a priori*”.

As observações do parágrafo anterior sobre o propósito da *síntese* suscita as considerações do primeiro escólio dos *Principia*, o *Escólio das Definições*. Nele, Newton distingue os “movimentos aparentes” dos “movimentos verdadeiros”, e afirma que o principal objetivo dos *Principia* é mostrar como determinar esses últimos movimentos a partir dos primeiros. “(...) Este é o propósito para o qual eu compus o presente tratado”, afirma a última frase do escólio. É tentador associar imediatamente essas observações com o método da análise e síntese. Mas aqui é necessário certa cautela. Aparentemente, o pano de fundo mais

imediatos dos comentários de Newton nesse escólio não é a filosofia natural, mas a astronomia. Como já foi destacado antes, desde Copérnico que a astronomia passara a flertar com a possibilidade de expressar um modelo nos quais os verdadeiros movimentos planetários fossem representados. Antes do astrônomo polonês, os modelos planetários construídos e considerados eram reconhecidamente arbitrários. E não somente pelas razões que já abordei anteriormente. Cabe, agora, mencionar que havia uma grande dificuldade – e talvez até uma impossibilidade – na determinação dos verdadeiros movimentos planetários em razão do observador não estar em qualquer ponto privilegiado do sistema, mas inserido em um dos astros pertencentes ao sistema cujos movimentos se pretendia analisar. Provavelmente esse foi o fato gerador da maior parte dos enigmas desde os astrônomos antigos, passando pelos pitagóricos, Aristarco de Samos, até chegar em Ptolomeu, que embora tivesse adotado a teoria aristotélica de que a Terra imóvel se encontra numa posição privilegiada no centro do Universo, ainda assim não nutriu qualquer pretensão de expressar os verdadeiros movimentos planetários, uma vez que bem sabia que os movimentos retrógrados dos planetas não eram compatíveis com hipótese de Aristóteles. Simplesmente não haviam esperanças em se determinar pelas observações os verdadeiros movimentos planetários e o verdadeiro sistema do mundo.

No capítulo 5 do aclamado *Da Revolução das Esferas Celestes*, Copérnico introduziu o tema da relatividade do movimento. Dois corpos movendo-se com a mesma velocidade na mesma direção perceberão cada um o outro em repouso em relação a si mesmo.⁵¹³ Em outros termos, os movimentos que percebemos não são necessariamente os movimentos *verdadeiros*. Os movimentos que percebemos são movimentos *aparentes* ou *relativos*. A Terra bem pode estar em movimento em torno do seu eixo, e esse movimento produziria as mesmas aparências que percebemos no céu. “De acordo com Cícero, essa opinião de fato foi sustentada por Heraclides, Ecfanto, os Pitagóricos, e por Eficetas de Siracusa”, afirma o célebre astrônomo. A obra de Copérnico, como vimos, abalou as estruturas do longo sistema ptolomaico, mas introduziu um problema difícil de resolver. Dada a relatividade do movimento, e a ausência de qualquer ponto de referência fixo que pudesse servir como parâmetro para avaliar os movimentos dos planetas em nossa região do céu, não é possível decidir, pelas observações astronômicas, entre o sistema copernicano e o sistema tychoniano. Consequentemente, não é possível chegar a uma conclusão sobre os verdadeiros movimentos

⁵¹³ “Toda mudança de lugar observada é causada pelo movimento tanto do objeto observado quanto do observador ou, é claro, por um deslocamento desigual de cada um deles. Porque quando as coisas se movem com iguais velocidade na mesma direção, o movimento não é percebido (...)”. Copernicus, 1992.

planetários. Por exemplo, pelo sistema copernicano o movimento de Vênus é um círculo ou uma oval em torno do Sol. Pelo sistema tychoniano, o movimento de Vênus se aparenta a uma curva helicoidal em torno da Terra. Dada a relatividade do movimento, não é possível conhecer os verdadeiros movimentos planetários a partir das observações. As observações astronômicas haviam alcançado o seu limite nesse particular. Elas determinaram que os planetas primários circundavam o Sol, que a Lua girava em torno da Terra, e que a Terra girava em torno do seu eixo. Mas uma vez que o ponto de referência das observações é a própria Terra, e o movimento tanto do Sol em relação a Terra quanto da Terra em relação ao Sol eram iguais, não seria possível chegar em qualquer conclusão definitiva sobre os verdadeiros movimentos planetários.

É nesse contexto que Newton fala sobre os “movimentos aparentes” ou “relativos”, e sobre os “movimentos verdadeiros” no *Escólio das Definições*. O objetivo dos *Principia* é levar a cabo o projeto de Kepler: sair do impasse sobre os verdadeiros movimentos planetários pelo recurso às causas físicas desses movimentos. E por essa razão a proposta que vemos nos *Principia* não é apenas introduzir a matemática no método da análise e síntese; é introduzir o método da análise e síntese na matemática, ou melhor, na astronomia. Partir dos “movimentos aparentes” para os “movimentos verdadeiros” não me parece exatamente uma descrição alternativa do método da análise e síntese. Parece-me, sim, uma ousada aplicação do método da análise e síntese para resolver o problema central da astronomia moderna. Não é possível determinar empiricamente os movimentos verdadeiros pela ausência de um ponto de referência fixo em nossa região do céu. Resta, portanto, deduzir esses movimentos *a priori*. Resta ir além da experiência. E o método da análise e síntese pode ser utilizado para esse fim. Por meio da *análise* se partiu dos fenômenos astronômicos – os “movimentos aparentes” – e se determinou as causas físicas desses fenômenos. Por meio da *síntese*, os “movimentos verdadeiros” dos planetas serão determinados *a priori* a partir das suas causas. Trata-se de uma autêntica fusão entre a astronomia e a filosofia natural. Para reforçar a sugestão fornecida acima apresentarei um breve sumário do *Escólio das Definições* e em seguida voltarei para a etapa da *síntese* no Livro III, apresentando a concretização do projeto de Kepler e Newton para a determinação dos verdadeiros movimentos planetários.

11.1 O ESCÓLIO DAS DEFINIÇÕES

Depois do *Escólio Geral*, talvez o *Escólio das Definições* seja o mais conhecido e debatido dentre todos os escólios de Newton nos *Principia*. É nesse breve trecho de cerca de

seis páginas que se apresentam as famosas definições de “espaço absoluto” e “tempo absoluto”, acerca das quais tanto se escreveu e discutiu nos últimos três séculos. Embora não seja o meu objetivo adentrar nos meadros das várias polêmicas relacionadas com esse escólio, acredito que ao menos parte das dificuldades envolvendo esse texto surge da posição específica que ele se encontra nos *Principia*: logo no início da obra. Uma tentativa de interpretar essas palavras antes de ingressar num estudo de todo o tratado pode ser desastrosa. Por essa razão escolhi incluir a discussão do escólio a essa altura do trabalho. Depois de acompanhar toda a apresentação e desenvolvimento dos *Principia* corremos um menor risco de *errar o ponto* das considerações de Newton nesse celebrado texto.⁵¹⁴ Newton inicia o Escólio das Definições afirmando que após definir os sentidos de alguns termos menos familiares ao longo da seção das “Definições” ele irá definir, agora, o sentido de alguns termos bastante familiares, mas que por isso mesmo precisam ser esclarecidos. Segundo Newton, concepções prévias, ou “populares”, poderiam trazer certo embaraço para a correta compreensão dos assuntos desenvolvidos no tratado. Esses termos mais familiares a que ele se refere são “tempo”, “espaço”, “lugar” e “movimento”. Nas palavras de Newton:

Embora tempo, espaço, lugar e movimento são bastante familiares para todos, deve-se notar que essas quantidades são popularmente concebidas principalmente com referência aos objetos da percepção sensível. E esta é a fonte de certas preconceções; para eliminá-las será útil distinguir as quantidades em absolutas e relativas, verdadeiras e aparentes, matemáticas e comuns.⁵¹⁵

Newton enumera quatro distinções nesse escólio. (1) A distinção entre “tempo absoluto, verdadeiro ou matemático” e “tempo relativo, aparente ou comum”; (2) a distinção entre “espaço absoluto, verdadeiro ou matemático” e “espaço relativo, aparente ou comum”; (3) a distinção entre “lugar absoluto” e “lugar relativo”; (4) e a distinção entre “movimento absoluto” e “movimento relativo”. Na segunda metade do escólio ficará claro que o seu interesse principal está na distinção entre o “movimento absoluto”, ou “verdadeiro”, e “movimento relativo” ou “aparente”, e especialmente, no esclarecimento de uma maneira de determinar os “movimentos verdadeiros” planetários. Embora as definições de espaço e tempo absoluto têm frequentemente chamado a atenção da maior parte dos comentadores, não me parece que sejam o interesse primário de Newton, a não ser como conceitos necessários

⁵¹⁴ Nos parágrafos seguintes procuro apenas colocar o leitor a par das observações de Newton nesse escólio, sem levantar qualquer problema. No APÊNDICE E levanto algumas questões e ofereço uma síntese levemente alterada, mas conservando o teor que considero principal nessas observações. Para o leitor que quiser se aprofundar, ou ter contato com uma formulação alternativa desse escólio, o apêndice referido pode ser útil.

⁵¹⁵ CW, p.408.

para a posterior distinção entre movimento absoluto e relativo, o seu foco principal. Mas precisamente por essa razão devemos começar por aqueles conceitos.⁵¹⁶

Tempo absoluto e relativo. O “tempo absoluto” é definido no escólio como um tempo que flui de modo perfeitamente uniforme “sem referência a nada externo”, que também pode ser chamado de “duração”. O “tempo relativo” seria uma mensuração “sensível e externa” da duração “por meio de movimento”. Um corpo com um movimento constante (ou admitido como constante) pode ser um adequado parâmetro para a mensuração do tempo. Newton não entra em detalhes aqui, mas por certo ele tem em vista os movimentos periódicos dos astros. Esses movimentos, entretanto, não podem ser admitidos como *perfeitamente* constantes. Portanto, as indicações de tempo daí decorrentes não podem ser confundidas com o “tempo absoluto”, embora o vulgo possa assim a considerar.

Espaço absoluto e relativo. No caso do “espaço absoluto” as considerações de Newton não são muito distintas daquelas oferecidas para o tempo. O “espaço absoluto” é o espaço “imóvel”, enquanto que o “espaço relativo” é uma mensuração móvel desse espaço. Nas palavras de Newton:

O espaço absoluto, pela sua própria natureza sem relação com qualquer coisa externa, mantém-se sempre homogêneo e imóvel. O espaço relativo é qualquer medida ou dimensão móvel do espaço absoluto definida pelos nossos sentidos com respeito à posição de corpos, e admitida como espaço imóvel (...).⁵¹⁷

O exemplo apresentado em seguida é a Terra. O “espaço sob a Terra” (espaço subterrâneo), ou o espaço “do nosso ar” (acima da superfície), ou o “espaço do céu” (o espaço interplanetário em torno da Terra) são todos espaços *relativos*, pois são definidos com respeito a um determinado corpo, no caso, a Terra. O espaço do “nosso ar”, por exemplo, move-se junto com a Terra e, portanto, não pode ser admitido como absoluto e imóvel; no entanto, popularmente é assim considerado.⁵¹⁸

Lugar absoluto e relativo. O “lugar” é a “parte do espaço que um corpo ocupa”, que pode ser “absoluto”, se o espaço considerado for o espaço absoluto, ou “relativo”, se o espaço considerado for um espaço relativo.⁵¹⁹ Para Newton, o conceito de “lugar” guarda uma semelhança com o conceito de “posição”, embora o lugar seja uma “quantidade” e a posição

⁵¹⁶ Ofereço considerações mais específicas sobre o espaço e tempo absolutos na seção 19.3 do volume II.

⁵¹⁷ Op.cit.

⁵¹⁸ Sem dúvida as palavras e também o exemplo de Newton não favorecem uma fácil compreensão. Mas deixei a cargo do APÊNDICE E as considerações adicionais que teria sobre isso.

⁵¹⁹ CW, p.409.

não. A *posição* é um atributo do *lugar*. Cada partícula de um corpo ocupa um *lugar* do espaço ao qual se pode atribuir uma determinada posição.

Movimento absoluto e relativo. O conceito de *movimento* absoluto e relativo e o conceito de *repouso* absoluto e relativo são complementares e, portanto, são apresentados conjuntamente. O “movimento absoluto é a mudança de posição de um corpo de lugar absoluto para outro; o movimento relativo é a mudança de posição de um lugar relativo para outro”. O exemplo do navio apresentado na sequência é bastante elucidador. O espaço do interior, da superfície e do entorno do navio – até onde os nossos sentidos conseguem captar – é um “espaço relativo” que o observador no navio (se não soubesse que está num navio) tomaria inicialmente como absoluto. Uma determinada região do convés do navio, por exemplo, é um “lugar relativo”. Se um corpo (por exemplo, um marinheiro) ocupa esse lugar, e permanece nele, estará em “repouso relativo” (repouso em relação ao navio). O “repouso absoluto” seria a permanência de um corpo num mesmo lugar absoluto do espaço imóvel. Agora suponha que o marinheiro se mova com uma velocidade de 1 unidade na direção leste sobre o convés do navio, e que o navio se mova com uma velocidade de 10 unidades na direção oeste. Se a Terra estiver em repouso absoluto, o *movimento absoluto* do marinheiro será de 9 unidades na direção oeste. No entanto, se a Terra não estiver em repouso mas se mover com velocidade de 10010 unidades na direção leste, o movimento absoluto do marinheiro será de 10001 unidades na direção leste, e assim por diante. Esse exemplo é importante porque ilustra algo que Newton afirmou acerca do espaço absoluto e relativo. O espaço absoluto e relativo tem algo em comum, de modo que o movimento absoluto pode ser obtido pela composição de todos os movimentos relativos.⁵²⁰

Após definir os conceitos de tempo, espaço, lugar e movimento, Newton passa para a segunda parte do escólio. Discutir se é possível – e caso seja possível, *como* seria possível – determinar o tempo e o espaço absoluto e, por consequência, os lugares e os movimentos absolutos. Começamos discutindo a possibilidade de determinar o *tempo absoluto*. Para determinar o tempo absoluto seria necessário que houvesse um corpo que se movesse com um movimento perfeitamente uniforme e que esse movimento pudesse ser perfeitamente aferido. Mas há um corpo que se move desse modo? A resposta de Newton sugere que não. “É possível que não haja movimento uniforme por meio do qual o tempo pode ter uma medida

⁵²⁰ Exatamente, ele diz que os espaços absoluto e relativo são iguais “em espécie e magnitude”, mas não “numericamente”. É difícil saber precisamente o que ele quer dizer com isso, mas o exemplo do navio pode fornecer uma ideia, como a que sugeri acima.

exata. Todos os movimentos podem ser acelerados ou retardados (...).⁵²¹ Mas embora talvez não seja possível uma “medida exata” do tempo absoluto, ainda assim temos uma medida bastante razoável, que não deve gerar muitos prejuízos numa eventual determinação dos movimentos verdadeiros. Essa medida bastante razoável está relacionada, segundo Newton, à “equação do tempo comum”.

A aferição do tempo pelo movimento de rotação da Terra tem duas dificuldades. A primeira é saber se o movimento de rotação da Terra é perfeitamente uniforme. A segunda é saber se o ponto de referência utilizado para medir uma rotação completa altera a sua posição em relação à Terra durante a rotação. A segunda situação é mais problemática. Mesmo que a velocidade da rotação da Terra seja perfeitamente constante, ainda assim precisamos de um ponto de referência que esteja em perfeito repouso em relação à Terra para medir uma volta completa. Geralmente o ponto de referência adotado é o Sol, mas é temerário admitir que esse astro esteja perfeitamente em repouso em relação à Terra. Esse problema é resolvido com a “equação do tempo comum”, que é o ajuste da medição de tempo da rotação da Terra em relação ao Sol (o tempo comum) comparado com a rotação da Terra em relação às “estrelas fixas”. Mesmo que as chamadas “estrelas fixas” estejam, na verdade, em movimento em relação à Terra, em razão das imensas distâncias entre o nosso planeta e essas estrelas elas sempre aparecerão em repouso pela observação a partir da Terra.

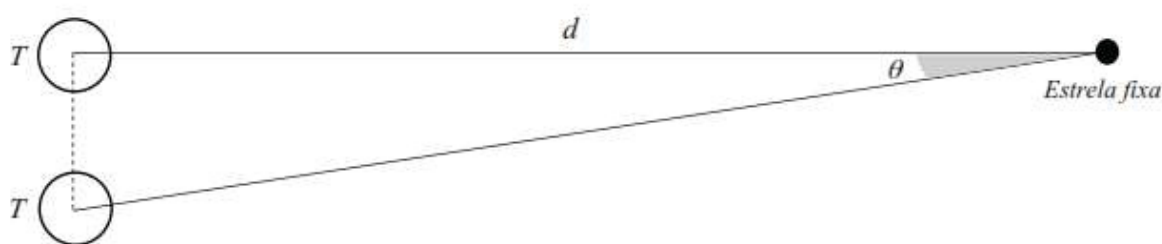


Figura 81 – Deslocamento da Terra em relação a uma estrela fixa muito afastada. A figura está fora de escala.
Fonte: o autor

Na figura acima não é difícil perceber que se a distância d for muito grande, o ângulo θ para um deslocamento relativo entre a Terra e a estrela num tempo correspondente a uma rotação completa da Terra será menor do que qualquer quantidade mensurável. Em outros termos, as “estrelas fixas” sempre estarão em repouso em relação à Terra. Portanto, o tempo de rotação da Terra aferido em relação a essas estrelas pode ser considerado como uma medida bastante razoável do tempo absoluto, assumindo que o movimento da Terra seja

⁵²¹ CW, p.408.

uniforme.⁵²² Por essa razão, Newton afirma que “na astronomia, o tempo absoluto é distinguido do tempo relativo pela a equação do tempo comum”. Podemos conceder, então, que possuímos um razoável parâmetro para o tempo absoluto.

Mas e quanto ao “espaço absoluto”? Seria também possível determiná-lo? De imediato podemos admitir que o “espaço absoluto”, ou seja, o espaço *em si mesmo* não pode ser discernido pelos sentidos. O que discernimos são os corpos no espaço. Portanto, para discernir o espaço absoluto seria necessário detectar um corpo absolutamente em repouso em relação a esse espaço, e tomá-lo como ponto de referência. Mas para determinar se em corpo está absolutamente em repouso seria necessário, num primeiro momento, compará-lo com o próprio espaço absoluto, o qual não discernimos. Além do mais, com exceção do próprio espaço absoluto, todos os corpos – por princípio – são móveis no interior desse espaço, e assim dificilmente podemos admitir que há algum corpo que esteja em repouso absoluto. Assim, não somos capazes de detectar o espaço absoluto pelos sentidos, mas apenas espaços relativos, em relação a determinados corpos que percebemos em repouso em relação a esses espaços (como no exemplo do navio). Portanto, os lugares e movimentos absolutos não podem ser discernidos pela determinação do espaço absoluto.

Haveria qualquer outra maneira de se determinar os movimentos absolutos? Haveria alguma maneira de pelo menos distinguir os movimentos absolutos dos relativos? Sob certas circunstâncias específicas *sim*. Newton afirma que o movimento relativo e absoluto e o repouso relativo e absoluto podem ser “distinguidos um do outro por meio das suas “propriedades, causas e efeitos”.⁵²³

Newton começa pelas *propriedades*. Inicialmente ele afirma que é uma propriedade do repouso que todos os corpos genuinamente em repouso se mantenham sempre numa mesma posição em relação a outros corpos em repouso. As “estrelas fixas”, por exemplo, mantêm posições relativas iguais entre si, e por isso desde a antiguidade elas foram consideradas em repouso por muitos, sendo o movimento percebido atribuído à rotação da Terra. No entanto, especificamente em nossa região do céu (o sistema solar) não se tem notícia de qualquer corpo que mantenha uma posição relativa constante em relação a outro corpo, e não há como saber se qualquer deles está em repouso em relação às estrelas fixas, uma vez que devido as grandes distâncias qualquer movimento desses astros não oferece qualquer variação do seu ângulo em relação a aquelas estrelas. Contudo mesmo se determinasse um conjunto de corpos

⁵²² Como se sabe, o tempo de rotação da Terra em relação ao Sol é em média 24 horas, enquanto que o tempo de rotação em relação às estrelas fixas é 23h 56min e 4s. Disso é possível concluir que o Sol apresenta um pequeno movimento relativo em relação à Terra, mas em torno de uma posição de equilíbrio.

⁵²³ CW, p.411.

no sistema solar que permanecem em repouso entre si, ainda assim isso não seria garantia de repouso absoluto, porque uma propriedade do movimento é que o movimento do todo é composto pelo movimento das partes, e essas partes também mantêm posições relativas fixas entre si. Por conseguinte, um conjunto de corpos que mantêm posições relativas fixas entre si podem estar tanto em repouso como podem fazer parte do movimento de um *todo*. Desse modo, não é possível distinguir o repouso e movimento absoluto dos corpos pelas “propriedades” seja do repouso ou do movimento; em outros termos, não é possível distinguir repouso e movimento absolutos pela posição relativa entre os corpos. Mas ainda que a posição relativa fixa não seja condição suficiente para determinar o repouso absoluto é, ao menos, uma condição necessária.

Em seguida Newton avança para as *causas*. A questão dele aqui é se é possível distinguir ao menos o movimento absoluto e o movimento relativo pelas suas *causas*. Ao meu ver é precisamente nesses dois últimos tópicos que se encontra o ponto central do escólio das definições. A resposta de Newton é *sim*. Eventualmente é possível distinguir os movimentos verdadeiros e relativos pelas causas. Num movimento verdadeiro toda mudança de movimento deve ser gerada por forças impressas. Num movimento relativo pode haver mudança de movimento sem nenhuma força que justifique tais mudanças. Talvez o exemplo do navio possa elucidar melhor essa questão. Suponha que dois navios se cruzem, um em repouso e outro em movimento acelerado. Sem considerar quaisquer outras circunstâncias a não ser o movimento perfeitamente suave de um dos navios, como um observador em um dos navios pode saber qual deles está em movimento? Pelo surgimento de uma força sem causa aparente. No navio que se desloca com movimento acelerado surgirá uma força no sentido contrário ao deslocamento agindo em todos os corpos sobre o navio. Desse modo, será possível distinguir o navio que verdadeiramente está com movimento acelerado.

Os movimentos absolutos e relativos também podem ser distinguidos pelos *efeitos*. Por exemplo, numa situação eventual em que um corpo gire em torno do seu eixo. É possível que um observador no corpo giratório determine se é ele que gira ou os objetos ao seu redor (como no caso da Terra)? Newton argumenta que sim, porque o corpo que gira apresentará efeitos *centrífgos*, ou seja, surgirão forças sobre os corpos livres os levando a se “afastar do eixo do movimento circular”. A esse propósito Newton oferece o famoso experimento do “balde”.⁵²⁴ Um balde com água suspenso por uma corda é colocado para girar em torno do seu eixo. Depois de um certo tempo a água estará girando juntamente com o balde, portanto em

⁵²⁴ CW, p.412-413.

repouso em relação às suas paredes. A questão que se coloca é se seria possível perceber o movimento giratório do ponto de referência da água. O balde tem paredes opacas e do ponto de referência da água seria possível se observar apenas as paredes do balde, em repouso em relação à água. Mas ainda assim a resposta é afirmativa. É possível inferir o movimento giratório da água pelos efeitos centrífugos que ela sofrerá, no caso, facilmente detectáveis pela concavidade sem causa aparente que se formará na superfície da água. Os efeitos centrífugos são efeitos *suficientes* para se determinar um verdadeiro movimento circular. Eis a conclusão de Newton sobre o experimento do “balde”:

O movimento circular verdadeiro de cada corpo giratório é único, correspondendo a um esforço único [em se afastar do eixo] como seu efeito próprio e suficiente, enquanto que os movimentos relativos são inúmeros de acordo com as suas relações variadas com os corpos externos e, tais relações são completamente carentes de efeitos verdadeiros, exceto na medida em que participam desse único e verdadeiro movimento.⁵²⁵

Pelos *efeitos* é possível perceber o movimento giratório absoluto da água. A bem da verdade, sempre é possível distinguir o movimento verdadeiro do relativo no caso do movimento circular. Os movimentos verdadeiros e relativos podem, então, ser distinguidos pelas “causas” e pelos “efeitos”.⁵²⁶

Com base na discussão feita até esse ponto Newton chega à sua conclusão no Escólio das Definições. Em primeiro lugar, ele conclui que “certamente é muito difícil encontrar os verdadeiros movimentos dos corpos individuais e efetivamente diferenciá-los dos movimentos aparentes”. Como ele acrescenta na sequência, essa dificuldade decorre principalmente do fato que “o espaço imóvel não produz qualquer impressão nos sentidos”. Mas em segundo lugar, é possível distinguir movimentos verdadeiros dos movimentos relativos, como se mostrou pelos exemplos dos parágrafos anteriores. À vista disso, Newton apresentará a sua estratégia para encontrar os “verdadeiros movimentos” a partir dos “movimentos aparentes” no caso específico dos movimentos planetários.

Para determinar os movimentos verdadeiros é possível retirar evidências de duas fontes. Primeiro, dos “movimentos aparentes”, que como já foi mencionado compartilha de parte dos “movimentos absolutos”. Segundo, das “forças” que relacionam-se com as “causas e efeitos dos verdadeiros movimentos”. Mais uma vez é fornecido um exemplo bastante

⁵²⁵ CW, p.413.

⁵²⁶ Aqui parece haver um problema. Newton mostrou como distinguir os movimentos *acelerados* dos movimentos *não-acelerados*, não os movimentos absolutos dos relativos. Em outras palavras ele mostrou como distinguir as *mudanças de movimentos* absolutas daquelas relativas, e não os próprios *movimentos absolutos*, conforme os definiu no início do prefácio. O APÊNDICE E mostra como esse problema poderia ser evitado numa formulação alternativa desse escólio.

sugestivo. Considere dois globos, A e B , conectados por uma corda e ao mesmo tempo girando em torno do seu centro de gravidade. Considere que também haja um corpo fixo F , em repouso, como na figura abaixo.⁵²⁷ A pergunta que se levanta é se é possível que um observador em um dos globos saiba quais corpos estão verdadeiramente girando e quais não estão.

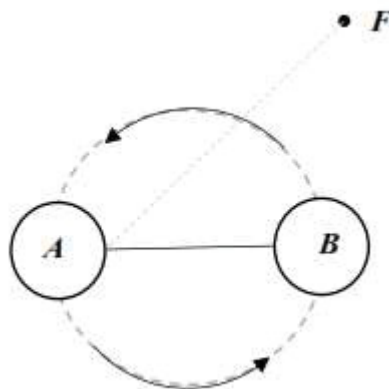


Figura 82 – Diagrama dos dois globos girantes sugerido no Escólio das Definições.
Fonte: o autor

Um observador no corpo A perceberá sempre o corpo B em repouso e o corpo F girando em torno de si. Nesse caso supõe que está em repouso juntamente com B , enquanto que F está em movimento circular em torno ambos. No entanto, pela relatividade do movimento poderá supor outras três possibilidades. Primeiro, A e F estão num lugar em repouso do espaço e somente B gira em torno de A , fazendo com que A gire em torno do seu próprio eixo e perceba B em repouso e F em movimento. Segundo, B e F estão em lugares em repouso no espaço e A gira em torno de B , fazendo B girar em torno do seu eixo e, por conseguinte, percebendo B em repouso e F em movimento. E terceiro, tanto A quanto B estão em movimento giratório em torno do ponto médio da corda, ou em torno do centro de gravidade dos corpos (se ambos tiverem massas diferentes), e cada qual percebe o outro em repouso e o corpo F em movimento.

Das “aparências” temos quatro possibilidades para os movimentos verdadeiros. A primeira questão, repetindo, seria: é possível que um observador em A determine os movimentos verdadeiros? A resposta de Newton é *sim*, pela “tensão na corda”. Como já foi mencionado antes, um verdadeiro movimento giratório apresenta um efeito centrífugo. Se há

⁵²⁷ CW, p.414. Newton não menciona um ponto fixo no seu exemplo. Introduzi esse elemento aqui para tornar o exemplo mais claro.

uma corda entre A e B um efeito centrífugo desses corpos pode ser detectado por uma tensão contínua na corda. Se A e B estivessem em repouso essa tensão contínua não poderia se manifestar, e caso se manifeste, o suposto repouso é, na verdade, relativo. A tensão na corda, portanto, elimina a possibilidade do repouso de ambos os corpos.

Mas a segunda questão seria: é possível que o observador em A possa detectar qual dos corpos, A ou B , está em movimento, ou se ambos estão? Se apenas A revolve em torno de B ou se B revolve em torno de A é possível determinar pelos efeitos centrífugos em cada um dos *corpos* (não na corda). Os corpos livres sobre A ou B sofrerão uma tendência em se afastar do eixo do movimento circular, enquanto que no outro corpo, que não muda de lugar, tais efeitos não surgirão. Desse modo é possível determinar se A gira em torno de B ou se B gira em torno de A . No caso de ambos girarem um em relação ao outro, eles apresentarão tais efeitos em diferentes ou iguais proporções, dependendo da situação.

Agora a terceira e mais importante pergunta. Numa eventual situação em que se determinou que ambos os corpos, A e B , estão em movimentos giratórios diferentes (i.e., com raios diferentes), seria possível determinar os *verdadeiros movimentos* desse corpos em relação ao corpo F em repouso, ou melhor, em relação a um ponto fixo desse espaço no qual esses corpos se movem? A resposta mais uma vez é *sim*. Conhecendo-se a tensão no fio, a massa dos corpos, e as leis do movimento, é possível perfeitamente encontrar o ponto fixo do espaço em torno do qual os corpos A e B revolucionam e, conseqüentemente os seus *movimentos verdadeiros*. Esse ponto coincidirá com o centro gravidade dos referidos corpos e estará em repouso em relação ao corpo F . A quantidade exata do movimento de cada um pode ser determinada pelas quantidade de matéria de cada, pela tensão no fio, e pela a distância de cada um até o centro de gravidade, que também é o raio da órbita de cada. E até mesmo o sentido do movimento circular pode ser encontrado. Se for aplicada uma força em ambos os globos nos sentidos contrários aos seus movimentos, a tensão no fio diminuirá. Se for aplicada uma força no mesmo sentido do movimento a tensão aumentará.

Portanto, é perfeitamente possível determinar os “verdadeiros movimentos” planetários a partir dos “movimentos aparentes”. E digo que é possível porque esse último exemplo não é nem um pouco casual. Embora Newton não o manifeste expressamente, ele se trata de uma analogia da situação planetária. A partir dos “movimento aparentes” ele determinou, pela etapa da *análise*, a causa dos movimentos planetário. Uma força de atração entre os planetas. Ele determinou o “fio”. Mas determinou também a “tensão no fio”, uma força proporcional às massas dos planetas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os planetas. E tendo determinado a causa dos movimentos planetário pelas

“aparências” ele pode agora determinar *a priori*, pela *síntese*, um ponto imóvel do espaço pelo qual seria possível encontrar os *verdadeiros movimentos* planetários. Desse modo, como foi destacado no fim da seção anterior, a estratégia adotada por Newton mais parece introduzir o método da análise e síntese na astronomia para determinar os verdadeiros movimentos planetários. Uma vez que pela experiência não é possível encontrar um ponto fixo de referência para estabelecer esses movimentos, então talvez se possa encontrá-lo sem recurso à experiência. O método da análise e síntese representa a expectativa de se avançar para além dos limites estabelecidos pela nossa experiência. Vejamos como Newton empreendeu exatamente isso, para então voltarmos a esse assunto no desfecho desse volume, com uma delineação mais completa do método utilizado por Newton nos *Principia*.

11.2 A SÍNTESE

Conforme se destacou mais acima, a *análise* foi realizada nas proposição de 1 a 7 do Livro III, com o recurso aos princípios matemático-mecânicos do Livro I. A *síntese* se inicia a partir da proposição 8, embora Newton faça referência direta a essa etapa apenas na proposição 13. Não se deve confundir a etapa da *síntese* com a determinação dos verdadeiros movimentos planetários, que é o problema astronômico que se pretende resolver durante a etapa da síntese. De fato, a dedução dos “movimentos celestes” começa somente na proposição 13. Mas como ficará evidente na sequência, a síntese, propriamente dita, inicia assim que se conclui a demonstração das causas dos movimentos planetários, qual seja, o princípio da gravitação universal na proposição 7. Aliás, não é sem razão que Newton insere “Q.E.D” ao término dessa proposição. Como já vimos, antes de deduzir os verdadeiros movimentos celestes Newton precisa usar a síntese para determinar *a priori* um ponto de referência fixo no sistema planetário a partir do qual será possível estabelecer os movimentos almejados. Isso será feito apenas na proposição 12. As proposições de 8 a 12, por conseguinte, são as proposições em que Newton aplica a síntese para determinar o ponto imóvel do mundo.

Para limitar a extensão do presente trabalho decidi apresentar a etapa da síntese de modo mais sucinto. Não continuarei introduzindo as proposições uma a uma, na ordem própria dos *Principia*. No entanto, na medida do possível, tento preservar ao máximo o espírito e o estilo de Newton nesses últimos desenvolvimentos. De todo modo, alertarei o leitor para as proposições correspondentes nos passos que se seguirão. Entremos, portanto, na *síntese*.

Uma vez estabelecido o princípio da gravitação universal, isto é, uma vez estabelecida a atração mútua entre todas as partículas da matéria, a questão agora é inferir *a priori* o que se segue desse princípio. Newton apresenta três deduções preliminares antes de entrar propriamente na dedução dos movimentos celestes. Em primeiro lugar, do princípio da atração mútua entre todas as partículas de matéria se segue uma determinada noção de homogeneidade da matéria dos planetas, noção esta que assegura que eles sofrerão uma força de atração mútua direcionada para os seus centros e proporcional às suas quantidades de matéria e ao inverso do quadrado da distância entre esses centros. Em segundo lugar, do princípio da atração universal mútua se segue que os espaços interplanetários apresentam uma resistência desprezível. E em terceiro lugar, do princípio da atração universal mútua se segue que o ponto imóvel do sistema planetário (ou o “centro do mundo”) está muito próximo da superfície do Sol. Vejamos essas três deduções preliminares separadamente.

Primeira dedução. Do princípio da atração universal mútua se segue uma determinada noção sobre a homogeneidade das matérias dos planetas que assegura que a força de atração entre eles é direcionada para o centro desses planetas, e proporcional ao inverso do quadrado da distância entre os seus centros.

A questão de Newton nesse ponto é a seguinte: admitindo que todas as partículas de matéria se atraiam mutuamente com uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância entre elas, disso realmente se segue que dois grandes corpos esféricos como os planetas serão atraídos como uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância *entre os seus centros*? O leitor pode argumentar que essa questão já foi respondida anteriormente. É verdade. Mas foi respondida na etapa da *análise*. Por exemplo, dos “movimentos aparentes” dos satélites de Júpiter e Saturno se deduziu que eles sofrem uma força centrípeta em direção aos centros desses planetas. O mesmo para os planetas primários em relação ao Sol e para a Lua em relação à Terra. Agora estamos na etapa da *síntese*. Estabelecido que a “causa” dos movimentos celestes é uma atração mútua *entre cada partícula de matéria* desses corpos, que tipo de força emergirá dos planetas inteiros? Será mesmo que a soma da força entre todas as partículas de matéria dos planetas, proporcional ao inverso do quadrado da distância entre elas, será equivalente a uma força na mesma proporção entre os *centros* dos planetas?

A questão parece óbvia, mas não é. Dados dois corpos esféricos maciços (ou dois “globos”, como diz Newton⁵²⁸) cujas partículas se atraem nas condições especificadas é fácil

⁵²⁸ Enunciado da Proposição 8, Livro III.

perceber que se a matéria dos globos for “homogênea”, ou seja, se todas as partes de matéria dos corpos tiver a mesma densidade em todas as regiões, a soma das atrações coincidirá com uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância entre os centros dos globos (Conforme prop. 75 do Livro I). No entanto, é igualmente fácil perceber que se a densidade dos globos não for homogênea esse resultado não será verdadeiro. As partes com maior densidade exercerão uma maior atração e isso produzirá uma desigualdade que deslocará a força atrativa resultante do centro dos globos e, portanto, a lei do inverso quadrado da distância *entre os centros* dos planetas não valerá exatamente, embora a grandes distâncias esse resultado possa aparentar validade. O problema é que Newton não tem motivos para acreditar sem margem para dúvidas que a matéria dos planetas é *homogênea* em todas as regiões. Na própria superfície temos muitos corpos de variadas densidades. Além disso, ele não pode afirmar com certeza que as mínimas partículas de matéria de cada corpo tem exatamente a mesma densidade. Em suma, Newton não pode garantir que a matéria dos planetas é *homogênea*, e nesse caso também não pode garantir a validade exata da lei do inverso quadrado para os planetas. Mas partindo do princípio da atração mútua é possível assumir uma posição a esse respeito.

Da atração mútua universal se segue, em primeiro lugar, que as mínimas partículas de matéria de cada espécie de corpos *não possuem a mesma densidade*. Se todas essas mínimas partículas tivessem precisamente a mesma densidade elas se atrariam todas igualmente, e isso faria com que o espaço fosse “totalmente preenchido” de matéria com uma densidade homogênea. Conforme Newton esclarece no cor.3 da proposição 6, se esse fosse o caso, nem o mercúrio, o ouro, ou outro corpo denso seria capaz de “descender no ar”. É evidente que isso não ocorre. As partículas mínimas de matéria de cada corpo, por conseguinte, não devem possuir a mesma densidade. Uma alternativa seria elas serem “rarefeitas com poros”, conforme se surge no cor.4 da proposição 6. Naturalmente, as partículas mais “rarefeitas com poros” teriam uma menor densidade e exerceriam uma menor atração; as partículas menos “rarefeitas com poros” teriam maior densidade e exerceriam uma maior atração.

Mas em segundo lugar, da atração mútua universal se segue que as partículas mínimas de matéria de cada espécie de corpos, de diferentes densidades, ou se aglutinarão formando corpos de densidade homogênea (reunindo partículas de mesma densidade), ou se aglutinação formando corpos de densidade não homogênea (reunindo partículas de diferentes densidades), porém com a densidade se mantendo aproximadamente uniforme em camadas concêntricas a partir do centro do corpo. Como se sabe, no caso específico dos corpos fluidos, aqueles mais densos tendem a ocupar o fundo do recipiente em virtude da maior atração que recebem em

direção ao centro da Terra. Numa situação hipotética em que houvesse muitos fluidos de diferentes densidades, aqueles mais densos se concentrariam mais próximos do centro da Terra e aqueles menos densos se concentrariam em camadas concêntricas de densidade decrescente a partir desse centro. De maneira análoga, no caso da matéria sólida dos planetas é bastante razoável acreditar que a ela tenha se acomodado naturalmente ao longo de muito tempo concentrando as partes mais densas nos centros desses astros, enquanto que as partes menos densas se estabeleceram na periferia, em virtude da sua menor atração. E mesmo que não se possa admitir que a densidade a partir do centro é decrescente no caso dos planetas, ao menos é razoável aceitar que cada camada concêntrica tenha a densidade aproximadamente igual.

Embora me parece que Newton não afirma essa tese categoricamente em lugar algum dos *Principia*, é isso o que se subentende pelos seus comentários iniciais sobre a proposição 8 do Livro III. Após apresentar as suas dúvidas quanto a validade exata da lei do inverso quadrado para os planetas, ele menciona que se convenceu disso após os estudos das proposições 75 e 76 do Livro I. Ora, a proposição 75 aborda o caso da atração entre duas esferas de densidade homogênea; a proposição 76 aborda o caso de duas esferas de densidade não homogênea, porém admitindo que cada camada concêntrica tenha densidade homogênea. Para os dois casos a conclusão é a mesma: ambas as esferas se atrairão mutuamente com uma força exatamente proporcional ao quadrado da distância entre os seus centros. Ao que parece, Newton supõe que, dada a atração universal mútua entre as partículas, os planetas ou tem uma densidade aproximadamente homogênea em todas as regiões, ou tem uma densidade não homogênea porém aproximadamente homogênea em camadas concêntricas. Portanto, dada a atração universal mútua, os planetas se atrairão mutuamente com uma força proporcional às suas quantidades de matéria e proporcional ao inverso do quadrado da distância *entre os seus centros*. Desse modo, a primeira dedução da síntese estabelece *a priori* que os corpos celestes se atrairão com uma força proporcional às suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os seus centros.

Segunda dedução. Do princípio de atração mútua entre toda a matéria se segue que o espaço interplanetário apresenta uma resistência desprezível para os movimentos planetários.

Do que foi discutido sobre a homogeneidade da matéria acima se segue que os corpos fluidos se acomodarão em camadas concêntricas de densidade decrescente em torno dos corpos sólidos e mais densos. Ou seja, estabelecida a atração universal mútua de toda matéria, e que as partículas mínimas dos corpos não são homogêneas, disso segue que os corpos fluidos são compostos de partículas de menor densidade, e portanto exercem uma menor

atração mútua em relação as partículas dos corpos sólidos mais densos. Então, em primeiro lugar, os corpos fluidos se acumularão em torno desses corpos sólidos. Em segundo lugar, os corpos fluidos, precisamente por serem fluidos, cederão diante de qualquer corpo sólido ou fluido mais denso, permanecendo em equilíbrio em torno desses corpos em camadas concêntricas de densidade decrescentes. No caso do espaço interplanetário, portanto, os fluidos se acumularão em torno dos planetas e a densidade desses fluidos decrescerá numa dada proporção que pode ser estimada.

Newton estimou proporção da diminuição da densidade na proposição 10 do Livro III. Fazendo referência à prop.22 do Livro II, ele afirmou que “numa altura de duzentas milhas acima da terra, o ar seria mais rarefeito que na superfície, grosso modo, numa razão de 30 para 0,0000000000003998, ou 75.000.000.000.000 para 1”.⁵²⁹ Em outros termos, a densidade do ar numa altura de 380 km da superfície está para a densidade do ar na superfície assim como 1 está para 75 trilhões.⁵³⁰ Diante dessa estimativa ele conclui que o planeta Júpiter, “revolvendo num meio com a mesma densidade que esse ar superior, num tempo de um milhão de anos, não perderia um milionésimo do seu movimento como resultado da resistência do meio”. E portanto, na região do céu, “os planetas e cometas, não encontrando resistência sensível, mover-se-ão através do espaço por um tempo muito longo”. A segunda dedução da síntese estabelece *a priori* que a resistência oferecida ao movimento planetas pelos meios fluidos no espaço é desprezível.

Terceira dedução. Do princípio atração universal se segue que um ponto imóvel do sistema planetário pode ser determinado, e que esse ponto está próximo da superfície do Sol.

Estabelecido que todos os corpos celestes se atraem com uma força proporcional às suas quantidades de matéria e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os seus centros, segue-se que os planetas são graves em direção uns dos outros, e portanto um ponto imóvel do sistema planetário pode ser encontrado pela determinação do centro de gravidade de todos os planetas. A dificuldade, no entanto, está em que a localização do referido centro de gravidade depende determinação dos pesos relativos dos planetas, ou da quantidade de matéria relativa dos planetas, algo até então impensável para a época. A seguir, abrirei uma seção para mostrar como Newton determinou os pesos e as quantidades de matérias relativas dos planetas. Em seguida, com esses pesos estabelecidos, apresentarei a determinação do centro imóvel do mundo pelo qual os verdadeiros movimentos planetários poderão ser determinados.

⁵²⁹ CW, p.816.

⁵³⁰ Usei para conversão a milha inglesa medieval, que corresponde a cerca de 1,9 km.

11.3 A DETERMINAÇÃO DAS QUANTIDADES DE MATÉRIA DOS PLANETAS

Como foi mencionado na seção anterior, a determinação do ponto imóvel do mundo a partir do qual os verdadeiros movimentos planetários podem ser estabelecidos se torna realizável ao se encontrar o centro de gravidade do conjunto dos corpos planetários. No entanto, essa tarefa não é fácil, uma vez que depende do conhecimento prévio dos pesos relativos dos planetas, ou das suas quantidades de matéria. Esse problema é resolvido no corolário 1 da proposição 8 do Livro III. Pelo princípio da atração mútua universal, determinando-se o peso dos corpos em cada planeta do nosso sistema, seria possível encontrar as quantidades de matéria relativas dos planetas. Ora, encontrar o peso dos corpos em cada planeta é o mesmo que determinar a força de atração entre um dado corpo de mesma massa (ou um corpo de massa unitária) sofreria a uma igual distância de cada planeta; e assim, a razão entre essas forças resultaria na própria razão entre as massas dos planetas, como pode ser percebido abaixo:

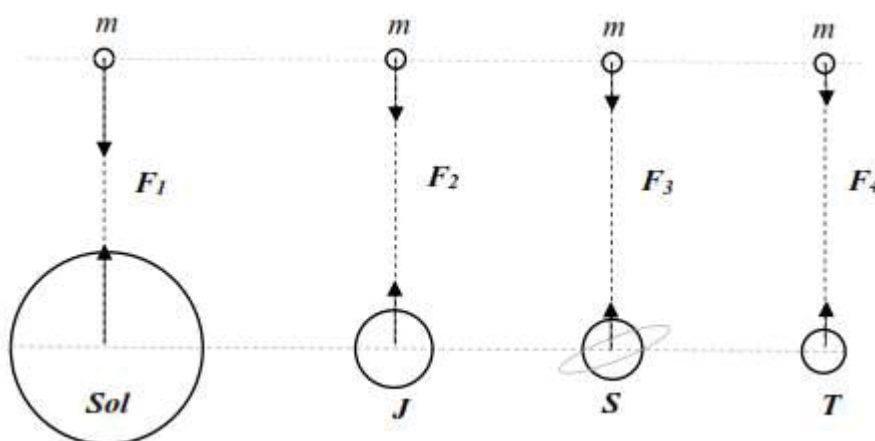


Figura 83 – Corpo de mesma massa a igual distância do Sol e dos Planetas.
Fonte: o autor

Pela proporção [78] encontramos que a força da gravidade mútua entre dois corpos extensos é dada por:

$$F \propto \frac{m_A m_B}{D^2}$$

Então as forças do corpo da figura em direção ao Sol e a Júpiter serão:

$$F_1 \propto \frac{m \cdot m_{sol}}{D^2}$$

e

$$F_2 \propto \frac{m \cdot m_J}{D^2}$$

E a razão entre o peso do corpo de massa m em Júpiter e no Sol será dado por:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{m_{sol}}{m_J} \quad [80]$$

Mas como é possível determinar as forças mútuas de atração a uma mesma distância de cada planeta? Newton mostra que essas forças podem ser determinadas por meio do cor.2 da proposição 4 do Livro I. Pelo referido corolário se sabe que a força acelerativa centrípeta de um corpo em órbita em torno de um planeta pode ser determinada pela razão entre o raio da órbita (r) e o quadrado do período (T), o que está expresso na proporção [19]:

$$F_{acel} \propto \frac{r}{T^2}$$

E determinada essa força do corpo orbital será também possível determinar a força acelerativa a qualquer distância do planeta, uma vez que se sabe que essa força é proporcional ao inverso do quadrado da distância:

$$F_{acel} \propto \frac{1}{r^2} \quad [81]$$

Como a força de atração mútua é proporcional à força acelerativa centrípeta do corpo orbital em direção ao planeta, então temos que:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{F_{acel\ 1}}{F_{acel\ 2}} = \frac{m_{sol}}{m_J} \quad [82]$$

Onde $F_{acel\ 1}$ e $F_{acel\ 2}$ são as forças acelerativas de qualquer corpo orbital em torno do Sol e em torno de Júpiter a uma mesma distância dos centros desses dois astros.

O problema, portanto, resume-se em determinar as referidas forças acelerativas. Newton usa como referência de corpos orbitais em torno do Sol e de Júpiter, o planeta Vênus e o satélite de Júpiter hoje conhecido como Calisto, respectivamente. Adota a distância entre Vênus e o centro do Sol como referência para a distância fixa entre todos os planetas. Se chamarmos a força acelerativa de Vênus em direção ao Sol de F_{SV} e a força acelerativa de Calisto em direção à Júpiter de F_{JC} , e os períodos orbitais de Vênus em torno do Sol e Calisto em torno de Júpiter de T_{SV} e T_{JC} , respectivamente, pela proporção [19] teremos:

$$F_{SV} \propto \frac{r_{SV}}{T_{SV}^2} \quad [83]$$

e

$$F_{JC} \propto \frac{r_{JC}}{T_{JC}^2} \quad [84]$$

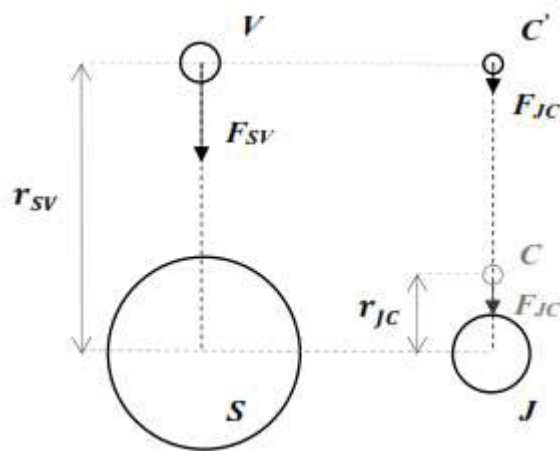


Figura 84 – Diagrama para determinar a razão entre as forças acelerativas em direção ao Sol e a Júpiter a uma mesma distância do centro desses astros. Fonte: o autor

Mas o que nos interessa é saber a força acelerativa de Calisto em direção à Júpiter na mesma distância de Vênus ao Sol. Nesse caso, a força que se pretende descobrir é $F_{JC'}$ e não F_{JC} . Da proporção [19] e da figura acima teremos que:

$$F_{JC'} \propto \frac{r_{SV}}{T_{JC'}^2} \quad [85]$$

Como a força acelerativa é proporcional ao inverso do quadrado da distância, pela proporção [81], teremos:

$$\frac{F_{JC}}{F_{JC'}} = \frac{r_{VS}^2}{r_{JC}^2} \quad [86]$$

Combinado [86] com [84]:

$$F_{JC'} \propto \frac{r_{JC}^3}{r_{VS}^2 T_{JC}^2} \quad [87]$$

Desse modo, a força acelerativa atuando em Calisto em direção ao centro de Júpiter a uma distância igual a r_{SV} desse planeta e a força acelerativa de Vênus em direção ao Sol estarão entre si como a proporção abaixo (pelas proporções [83] e [87]):

$$\frac{F_{VS}}{F_{JC'}} = \left(\frac{r_{SV}}{r_{JC}} \right)^3 \left(\frac{T_{JC}}{T_{SV}} \right)^2 \quad [88]$$

A razão entre as forças acelerativas em direção à Júpiter ao Sol – a uma mesma distância desses astros – pode ser obtida por meio dos raios das órbitas de Vênus ao Sol e de Calisto à Júpiter, e dos períodos das órbitas de Vênus e Calisto.

Esse cálculo, no entanto, apresenta uma dificuldade. Conforme Cohen ressaltou, o raio da órbita de Calisto em torno de Júpiter e o raio da órbita de Vênus em torno do Sol, apresentados nos fenômenos (Fen.1 e 4), não estão numa mesma unidade de medida. O raio da órbita de Calisto em torno de Júpiter está expresso em termos de “semidiâmetros de Júpiter”, e o raio da órbita de Vênus em torno do Sol está expresso em termos da distância da Terra ao Sol, unidade que hoje conhecemos como “unidade astronômica” (UA). Evidentemente, Newton precisa desses dados na mesma unidade.

Desde Copérnico as distâncias dos planetas primários ao Sol já eram conhecidas em termos da distância da Terra ao Sol. Copérnico elaborou uma maneira para determinar as distâncias dos planetas inferiores ao Sol e outra para determinar a distância dos planetas superiores. No caso dos planetas inferiores, essa distância era determinada pela “elongação máxima” do planeta, o ângulo máximo entre o planeta e o Sol, quando visto da Terra.

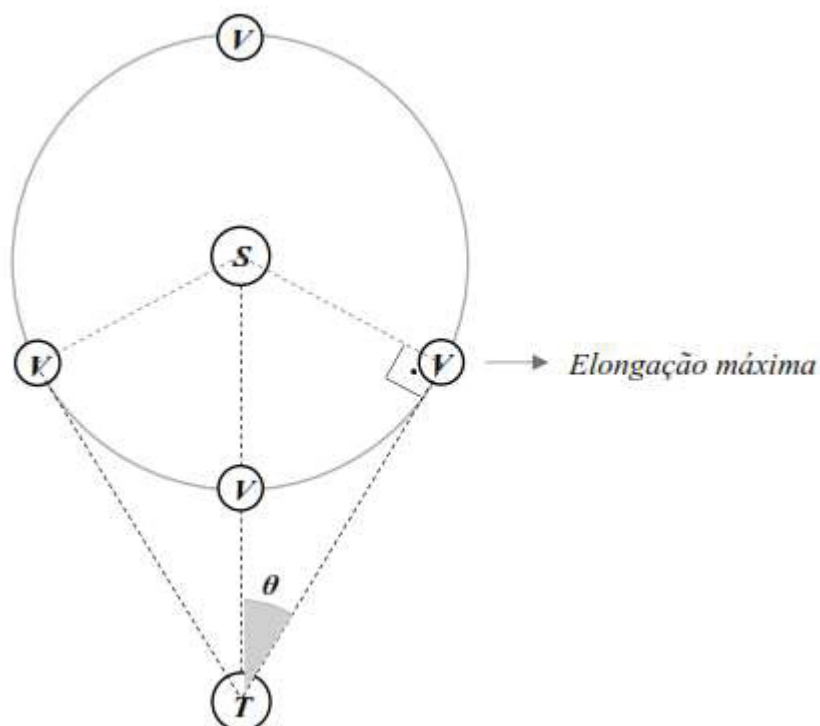


Figura 85 – Elongação máxima de Vênus na sua órbita em torno do Sol.
Fonte: o autor

Tomando como referência a distância ST (1UA), e sendo conhecido o ângulo de elongação máxima θ , determina-se sem maiores dificuldades a distância SV de Vênus ao Sol. Conforme apresentado no fenômeno 4, essa distância equivale a 0,724 UA. No caso dos planetas superiores, a maneira de determinar as suas distâncias até ao Sol é um tanto mais complicada. Uma vez que a elongação máxima de todos é igual é preciso aplicar um procedimento mais complexo, que faz uso do período sinodial. Por meio desse procedimento é possível encontrar a distância de Júpiter até o Sol. No fenômeno 4, Newton forneceu três valores para essa distância. De acordo com Kepler é 5,195 UA; Boulliau obteve 5,2252 UA; e pela regra dos períodos se obtém 5,200 UA.

No fenômeno 1 Newton também se utiliza do método da “elongação máxima” para determinar a distância de Calisto até Júpiter, mas expressa esse valor, como disse, em termos do raio de Júpiter. Pela figura abaixo se percebe que não é difícil obter esse dado em termos da distância da Terra ao Sol:

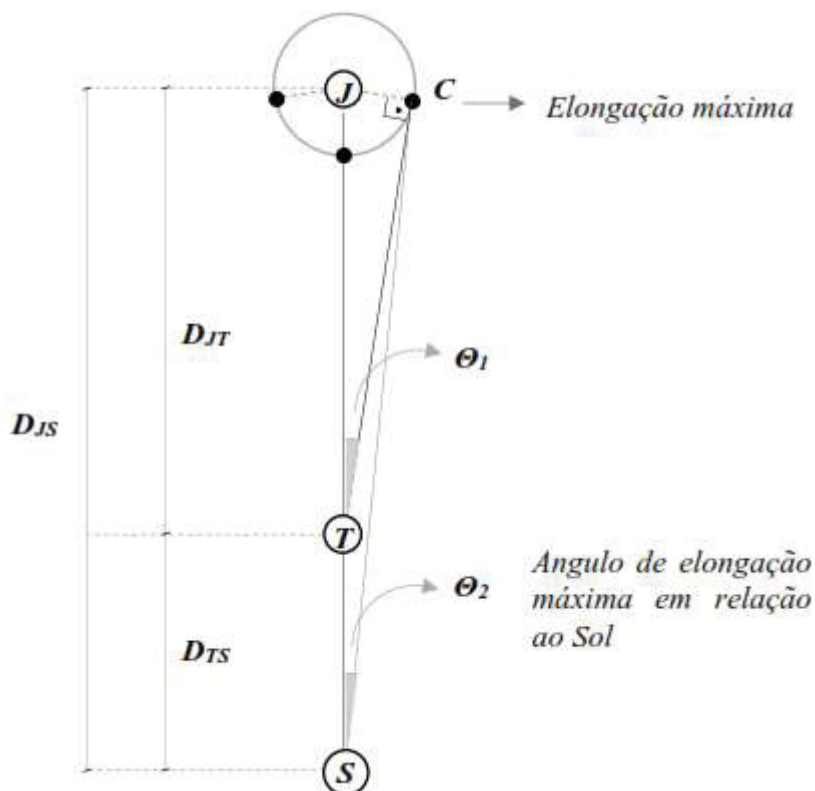


Figura 86 – Elongação máxima de Calisto em relação à Terra e em relação ao Sol.

Fonte: o autor

Conhecendo o ângulo de elongação máxima de Calisto em relação à Terra (θ_1), e conhecendo a distância de Júpiter ao Sol (D_{JS}) e, conseqüentemente, a distância de Júpiter a Terra (D_{JT}) é possível determinar o ângulo de elongação máxima de Calisto em relação ao Sol (θ_2). Esse foi o ângulo informado por Newton no fenômeno 1.

$$\theta_2 = 8' 16'' = \frac{31}{225} \text{ graus}$$

Então, pelo triângulo JCS podemos obter o raio da órbita de Calisto (r_{JC}) em termos da unidade astronômica:

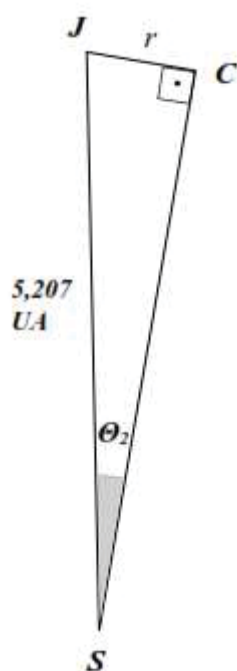


Figura 87 – Determinação do raio da órbita de Calisto em torno de Júpiter em unidades astronômicas.
Fonte: o autor

$$r = 5,207 \cdot \sin\left(\frac{31}{225}\right)$$

$$r = 0,01252 \text{ UA}$$

Usando o valor médio das três distâncias entre Júpiter e o Sol fornecidas no Fenômeno 4, encontramos que o raio da órbita de Calisto corresponde a uma fração de 0,01252 da distância da Terra ao Sol. Com esse valor é possível obter a razão das forças acelerativas em direção à Júpiter e ao Sol. Sendo os períodos de Calisto e Vênus em termos de dias terrestres 16,689 e 224,6176 (fornecidos no Fen. 1 e 4), por meio da proporção [88], obtemos:

$$\frac{F_{VS}}{F_{JC'}} = \left(\frac{0,724}{0,01252}\right)^3 \left(\frac{16,689}{224,6176}\right)^2$$

$$\frac{F_{VS}}{F_{JC'}} = 1067$$

A força acelerativa de Vênus (ou de qualquer outro corpo) em direção ao Sol está para a força acelerativa em direção a Júpiter assim como 1067 está para 1. Em outros termos, a força em

direção ao Sol é 1067 vezes maior que a força em direção a Júpiter numa mesma distância.⁵³¹ Um procedimento semelhante pode ser realizado para Saturno, obtendo-se um valor de 3021 para 1.

O caso da Terra é bem mais complicado que Júpiter e Saturno uma vez que o raio da órbita da Lua não é determinado pelo método elongação máxima, mas pela “paralaxe solar”. A “paralaxe solar” consiste no ângulo subtendido pelo raio equatorial terrestre médio a uma distância de 1 UA.

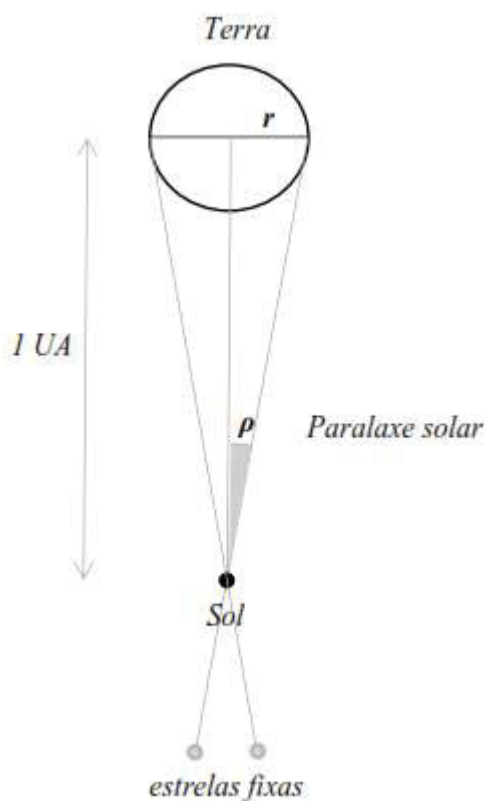


Figura 88 – Ângulo de paralaxe solar.
Fonte: o autor

⁵³¹ Seguindo Robert Garisto, Cohen destacou um suposto erro de Newton nos cálculos para a determinação da massa de Júpiter. Pelos dados dos fenômenos o resultado deveria ser 1/1064 e não 1/1067. Eles atribuíram essa pequena diferença a alguns arredondamentos apressados de Newton. No entanto, a pressa, aparentemente, não foi de Newton, mas de Garisto. Primeiro, ele usou a tangente em vez do seno para o cálculo do alongamento máximo. Segundo, ele não observou que Newton tomou o valor médio da distância de Júpiter ao Sol. Terceiro, ele não percebeu que na proposição 8 o valor do período de Vênus em torno do Sol (“224 dias e 16 $\frac{3}{4}$ horas”) não confere com o valor fornecido por Newton no Fenômeno 4, “224,6176”, que corresponde a 224 dias e 16 $\frac{3}{5}$ horas. Embora os dois primeiros lapsos de Garisto não trazem maiores consequências no resultado final, esse último traz. Utilizando o dado correto para o período de Vênus, o resultado obtido é precisamente igual a aquele fornecido por Newton. O período errado na proposição 8 muito provavelmente não foi um erro de arredondamento; foi um erro tipográfico, ou uma simples transcrição errada. Veja Cohen, 1999, p.222; e Garisto, 1991.

Pela figura acima é fácil perceber que conhecendo ângulo da paralaxe solar é possível determinar o raio terrestre em termos da unidade astronômica.

$$r = \tan \rho \, UA$$

Consequentemente, a distância da Terra a Lua poderia ser obtida na mesma unidade, uma vez que à época se conhecia essa distância em raios terrestres. O problema com essa estratégia é que a determinação da paralaxe solar envolvia a uma evidente dificuldade: uma observação simultânea da posição do Sol em relação as estrelas fixas de pontos extremos da Terra, ou o mais afastado possível. Esse problema inevitavelmente tornava difícil um acordo sobre a paralaxe solar nos dias de Newton. De todo modo, mesmo com alguma incerteza sobre esse ângulo Newton também determinou a gravidade relativa em direção à Terra. No cor. 1 da proposição 8, Newton apresenta os seus resultados tomando como referência o Sol, as forças acelerativas em direção ao Sol, Júpiter, Saturno e Terra serão respectivamente 1, 1/1.067, 1/3.021 e 1/169.282.⁵³²

Como a força de atração mútua entre os planetas é proporcional a força acelerativa, conforme, essas razões também fornecem as quantidades de matéria relativas dos planetas. A tabela abaixo apresenta as quantidades de matéria relativas dos planetas:

Tabela 9 – Quantidade de matéria do Sol e Planetas

Quantidade de matéria relativa do Sol e dos planetas		
<i>Corpo</i>	<i>Principia</i>	<i>Valores atuais</i>
Sol	1	1
Júpiter	1/1.067	1/1.048
Saturno	1/3.021	1/3.499
Terra	1/169.282	1/332.931

Fonte: Prop. 8 dos *Principia*. Adaptado pelo autor

Pela comparação entre as quantidade de matéria relativas determinadas nos *Principia* e as proporções atuais é possível perceber claramente a incerteza referida mais acima sobre a paralaxe solar, que impactou significativamente a determinação da quantidade de matéria da Terra. Nos padrões atuais, a Terra tem praticamente a metade da massa calculada por Newton.

⁵³² CW, p.813.

Ainda assim, como veremos a seguir, essa incerteza quanto a massa da Terra em nada terá influência na conclusão sobre o centro de gravidade do mundo e os verdadeiros movimentos planetários.⁵³³

11.4 A DETERMINAÇÃO DO PONTO IMÓVEL DO MUNDO

Estabelecidas as quantidades de matéria relativas do Sol, Júpiter, Saturno e Terra é possível agora determinar razoavelmente o centro de gravidade do sistema planetário e concluir a terceira dedução preliminar antes da demonstração dos verdadeiros movimentos planetários. Newton determina o centro de gravidade do sistema planetário na proposição 12 do Livro III. Ele começa localizando o centro de gravidade entre os dois corpos mais massivos do sistema, a saber, Júpiter e o Sol. Uma vez que a quantidade de matéria do Sol é cerca de 1067 vezes maior que a quantidade de matéria de Júpiter, a distância do centro do Sol até o centro de gravidade estará para a distância entre Júpiter e o Sol assim como 1 está para 1067. Newton afirma que o centro de gravidade de Sol e Júpiter “cairá sobre um ponto ligeiramente fora da superfície do Sol”.⁵³⁴

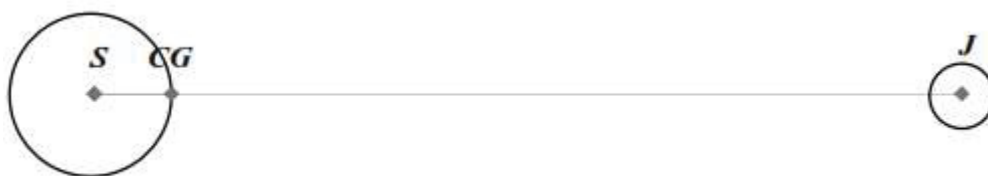


Figura 89 – Centro de gravidade do Sol e Júpiter. Figura fora de escala.
Fonte: o autor

A figura acima está com a escala bastante alterada. Apenas para se ter uma melhor ideia dessa proporção, se a unidade astronômica fosse equivalente à distância de um quarteirão de aproximadamente 100 metros, a distância entre Júpiter e o Sol seria de 520 metros, ou cerca de cinco quarteirões; o raio do Sol teria 44 centímetros, e o centro de gravidade estaria 2 centímetros fora da superfície do Sol.⁵³⁵

Repetindo a operação para Saturno e o Sol o centro de gravidade cairá sobre um ponto ligeiramente para dentro da superfície do Sol. Apelando para a mesma analogia acima,

⁵³³ Nos corolários da proposição 8 Newton ainda compara o peso dos na superfície de cada planeta e a densidade dos planetas. Do que foi exposto nessa seção esses outros resultados podem ser obtidos com facilidade.

⁵³⁴ CW, p.817.

⁵³⁵ Adotando a proporção calculada entre as quantidades de matéria do Sol e Júpiter, o centro de gravidade estaria a uma distância de 0,0048 UA do centro do Sol. O valor atual do raio do Sol é 0,0046 UA.

Saturno estaria a 952 metros do Sol, e o centro de gravidade de Saturno e do Sol ficaria cerca de 13 centímetros para dentro da superfície do Sol.



Figura 90 – Centro de gravidade do Sol e Saturno. Figura fora de escala.
Fonte: o autor

E seguindo com o mesmo tipo de raciocínio é possível concluir que ainda que imaginássemos todos os planetas alinhados em um só dos lados do Sol, uma vez que todos os outros planetas estão bem mais próximos do Sol que Júpiter e Saturno, e possuem uma quantidade de matéria significativamente menor que esses dois planetas, ainda assim o centro de gravidade do conjunto ficaria próximo do superfície do Sol. Pela nossa analogia, não chegaria em 40 centímetros fora da superfície do Sol. Como afirma Newton, a distância do centro de gravidade até o centro do Sol “difícilmente ultrapassaria um diâmetro completo do Sol”.⁵³⁶

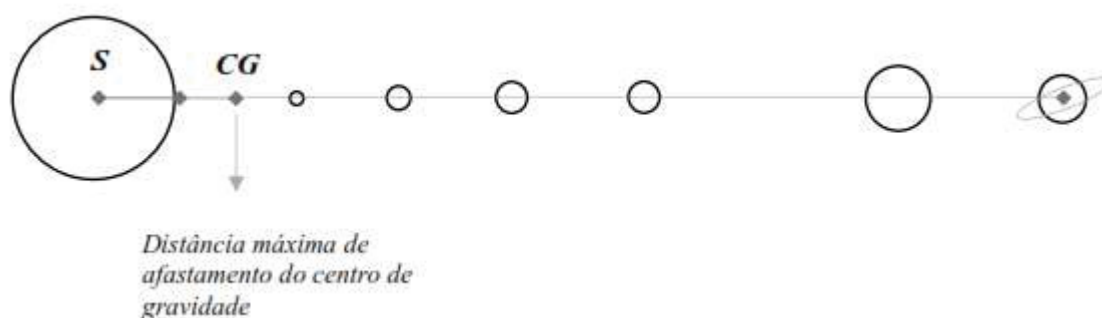


Figura 91 – Centro de gravidade do Sol e dos planetas. Figura fora de escala.
Fonte: o autor.

Em outros termos, para qualquer configuração dos planetas, o centro de gravidade do sistema jamais estará muito afastado da superfície do Sol. E como sabemos que os planetas dificilmente circundam o Sol perfeitamente alinhados como na figura acima, muito provavelmente o centro de gravidade do Sol e todos os planetas estará minimamente fora da própria superfície do Sol.

⁵³⁶ Ibid.

Estabelecido o centro de gravidade do sistema planetário, deve-se agora lembrar do corolário 4 das leis do movimento. O centro de gravidade de qualquer sistema de corpos – interagindo de qualquer maneira que seja (colidindo ou se atraindo) – estará em repouso ou movimento uniforme em linha reta. Evidentemente, desse corolário se segue que o centro de gravidade do sistema planetário está em repouso ou movimento uniforme em linha reta. Mas qual seria o caso?

Antes de entrar na proposição 12, Newton apresentou a “Hipótese 1”, que foi omitida, mas agora convém enunciar:

Hipótese 1

O centro do sistema do mundo está em repouso. Ninguém duvida disso, embora alguns argumentem que a Terra está em repouso no centro do sistema, outros que o Sol.⁵³⁷

O que parece implícito nessa hipótese é a crença de que o universo se resume no sistema dos sete corpos celestes com as estrelas fixas ao fundo. Embora essa hipótese não implique necessariamente que Newton acredite que o universo se resume a esses corpos, aqui ele está trabalhando a crença amplamente aceita e difundida na sua época, inclusive entre os astrônomos e filósofos. Como já vimos, a discussão dos astrônomos nesse período era sobre qual dos corpos celestes, a Terra ou Sol, está em repouso, e conseqüentemente está no centro do universo. Sequer era cogitada a possibilidade do centro não estar no nosso sistema, ou mesmo se haveria outros sistemas além do nosso. A crença generalizada era que os sete corpos celestes cercados pelas estrelas fixas era tudo o havia. Mas o simples fato de Newton introduzir esse conteúdo como uma *hipótese* já é bastante sugestivo. Insinua que eventualmente ele poderia conceber outras possibilidades. Ao mesmo tempo em que adota essa concepção difundida aqui, ele também estaria dizendo: *atenção, isso é apenas uma hipótese!* Por conseguinte, a *Hipótese 1* não permite concluir que Newton acreditava mesmo que o universo se resumia aos sete corpos celestes e as estrelas fixas, mas permite concluir que uma vez admitido esse ponto, segue-se que o centro de gravidade do mundo está necessariamente *em repouso*.

Conforme Newton esclarece na proposição 11 (do Livro III), se pelo corolário 4 das leis do movimento há somente duas possibilidades para o centro de gravidade (repouso ou movimento uniforme), e se pela Hipótese 1 o sistema dos sete corpos celestes que conhecemos é tudo o que há e, portanto, o seu centro está em repouso absoluto no centro do

⁵³⁷ CW, p.816.

cosmo, então o centro de gravidade desse sistema de corpos é, também, o centro imóvel do mundo.

Cohen afirma que a proposição 11 do Livro III é um dos poucos lugares dos *Principia* que Newton faz uma referência evidente ao espaço absoluto.⁵³⁸ A bem da verdade, essa referência não é tão evidente quanto Cohen sugere. Mas realmente há uma relação com espaço absoluto aqui. Se o universo se resume no sistema dos sete corpos celestes estudados, então o centro de gravidade desse sistema é o próprio centro do mundo, e esse centro não pode estar em movimento, pois se estivesse o próprio universo estaria em movimento. Portanto, se o sistema solar é tudo o que há, a determinação do centro de gravidade desse sistema também é a determinação de um ponto imóvel do espaço absoluto. Com efeito, trata-se de uma determinação *a priori* do próprio espaço absoluto. Não obstante, se não for o caso que o nosso sistema planetário é o único, o centro de gravidade ainda pode estar em movimento uniforme. Mesmo assim pode ser admitido sem prejuízos como o centro desse sistema.⁵³⁹

Está solucionado – portanto – o problema do centro do sistema do mundo. A questão que atravessou os séculos desde os pitagóricos, Aristarco de Samos, passando por Ptolomeu, Copérnico, e culminando em Kepler e Galileu recebeu uma surpreendente solução nos *Principia* de Newton. Nem a Terra, nem o Sol. O centro do sistema do mundo é o centro de gravidade comum dos sete corpos celestes. Esse é o centro imóvel do mundo, o ponto fixo em relação ao espaço absoluto que encerra o universo. No corolário único à proposição 12, Newton apresenta a sua conclusão sobre o problema dos “dois máximos sistemas do mundo”. Vale a pena citar:

Portanto, o centro comum de gravidade da Terra, do Sol, e de todos os planetas deve ser considerado o centro do universo. Porque uma vez que a Terra, o Sol, e todos os planetas gravitam em direção um dos outros e portanto – na proporção da força da gravidade em cada um deles – são constantemente colocados em movimento de acordo com as leis do movimento, está claro que os seus centros móveis não podem ser considerados o centro do universo, o qual está em repouso. Se um corpo em torno do qual todos os outros corpos gravitam mais tivesse de ser admitido no centro (como é a opinião comumente sustentada), esse privilégio teria de ser concedido ao Sol. Mas uma vez que o próprio Sol se move, um ponto imóvel tem que ser escolhido para esse centro, a partir do qual o centro do Sol se move minimamente e a partir do qual se moveria ainda menos, supondo que o Sol fosse maior e mais denso (...).⁵⁴⁰

⁵³⁸ Cohen, 1999, p.232.

⁵³⁹ Veja o APÊNDICE E.

⁵⁴⁰ CW, p.817.

Newton termina, então, a terceira dedução preliminar antes de apresentar os verdadeiros movimentos planetários: a determinação do centro imóvel do mundo. Agora, estabelecido esse centro, ele poderá deduzir *a priori* os verdadeiros movimentos planetários a partir das suas causas. Essa etapa encerrará o objetivo dos *Principia* segundo o *Escólio das Definições*. Determinar os verdadeiros movimentos planetários a partir das suas causas e das suas aparências.

11.5 A DETERMINAÇÃO DOS VERDADEIROS MOVIMENTOS PLANETÁRIOS

Até o momento se mostrou que do princípio de atração universal mútua entre toda a matéria se segue, em primeiro lugar, que dois globos de densidades homogêneas ou não homogêneas (com a densidade variando em camadas concêntricas) gravitarão em direção um dos outro na proporção direta da suas quantidades de matéria e na proporção inversa do quadrado da exata distância entre os seus centros. Em segundo lugar, do princípio da atração universal mútua entre toda a matéria se segue que a densidade dos meios fluidos decrescem com a distância dos planetas, de modo que qualquer resistência oferecida por esses meios no espaço interplanetário será desprezível para os movimentos dos planetas. E em terceiro lugar, do princípio da atração mútua entre toda a matéria se segue que as quantidades de matéria dos planetas podem ser determinadas, e juntamente com elas o centro de gravidade do sistema planetário, que é o próprio centro do sistema do mundo. Estabelecidas essas três deduções preliminares é possível – agora – determinar *a priori* os verdadeiros movimentos planetários.

Pela proposição 58 do Livro I, estando dois planetas em movimento um em torno do outro, eles necessariamente revolverão em círculos ou elipses com o centro de gravidade sobre o centro dos círculos, ou sobre o foco das elipses, obedecendo a lei das áreas em relação a esse centro. No caso específico do nosso sistema planetário, segue-se da proposição 65 e 66 do Livro I, que os planetas e o Sol revolvem em elipses com o centro de gravidade comum em um dos focos da elipse, e por raios traçados a partir desse centro descrevem áreas proporcionais aos tempos. Mas como foi mencionado na seção anterior, o centro de gravidade do sistema planetário estará muito próximo da superfície do Sol, e as perturbações mútuas das órbitas dos planetas “são tão pequenas que podem ser ignoradas”.⁵⁴¹ Assim, pode-se admitir que o Sol está em repouso e que os planetas se movem em elipses com o centro do Sol em um

⁵⁴¹ CW, p.818.

dos focos, e que descrevem áreas proporcionais aos tempos. Esse é o enunciado dos verdadeiros movimentos planetários na proposição 13 do Livro III. Eis a proposição:

Proposição 13

Os planetas se movem em elipses que têm um dos focos no centro do Sol, e por raios traçados a partir desse centro descrevem áreas proporcionais aos tempos.⁵⁴²

Como já foi mencionado, Newton alerta que os movimentos planetários foram anteriormente estudados a partir dos fenômenos. Agora esses movimentos estão sendo enunciados *a priori*. Há duas diferenças fundamentais entre os movimentos planetários *aparentes* considerados nos fenômenos e esses últimos movimentos que ora são deduzidos das causas. A primeira diferença é que os fenômenos eram neutros acerca do centro do sistema ser o Sol ou a Terra. Aqui é estabelecido que esse centro é o Sol. A Terra se torna, portanto, mais um dos planetas. Newton não contempla mais aqui a distinção entre Terra, Sol e “planetas primários”. Ele diz apenas “os planetas” se movem em elipses com foco no centro do Sol. A Terra se torna definitivamente mais um dos planetas primários. A segunda diferença importante é que na seção *fenômenos* não se mencionava que os planetas revolviam em “elipses”. Como foi destacado na seção 9.2, a primeira lei de Kepler não havia sido reconhecida por Newton como um fenômeno. Foi a lei harmônica que o levou a inferir a lei do inverso quadrado, que por sua vez levou à conclusão da órbita elíptica. Como ele disse certa vez a Halley, as órbitas elípticas foram apenas um “palpite” de Kepler, sem qualquer demonstração. Agora os *Principia* forneciam uma robusta demonstração *a priori* para as órbitas elípticas a partir das causas dos movimentos planetários.

Por essa razão Newton justifica a proposição 13 citando a proposição 1, 11 e 13 do Livro I. A proposição 1 demonstra que de uma força tal como a admitida se segue a lei das áreas; a proposição 11 demonstra que um corpo se movendo numa órbita elíptica que obedece a lei das áreas em relação ao foco da elipse implica numa força proporcional ao inverso do quadrado da distância em direção ao foco da elipse; e a proposição 13 demonstra o inverso, que uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado implica em um movimento em uma das seções cônicas, mas em se tratando de uma órbita fechada, um movimento numa órbita elíptica. Em outras palavras, em se tratando de uma órbita fechada, uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância implica necessariamente numa órbita circular ou elíptica. A partir desse resultado, os fenômenos dão conta de distinguir as duas órbitas em cada caso.

⁵⁴² Ibid, p.817.

O Livro III segue, a partir desse ponto, demonstrando a priori os verdadeiros movimentos planetários. Ainda na proposição 13, Newton destaca que os únicos corpos celestes que sofrerão perturbações sensíveis em suas órbitas serão a Lua e Saturno (quando em conjunção com Júpiter). Sobre a órbita de Saturno, ele determina a proporção da força de perturbação gerada pela conjunção com Júpiter. Sobre o movimento da Lua ele apresenta 13 proposições específicas ao longo do Livro III (prop. 22 a 35). E para completar o quadro do sistema do mundo, Newton ainda deduz os diâmetros e excentricidades das órbitas planetárias (prop.14 a 16), e apresenta três longas proposições sobre o movimento dos cometas (prop.40 a 42).

Após essas etapas, Newton segue ainda com alguns passos da síntese mesmo em assuntos que não estão diretamente relacionados com o estabelecimento de um modelo do céu. Ele deduz a precessão dos equinócios (prop.39), o movimento das marés pela atração do Sol e da Lua (prop.36, 37), o peso dos corpos em diferentes regiões da Terra (prop.20), entre outras coisas. O *Principia* termina na proposição 42, na primeira edição. Na segunda edição ele termina com um último escólio conclusivo, o famoso *Escólio Geral*.

Finalizamos, assim, a *Parte 3* desse trabalho, que visava apresentar os passos da formulação da teoria da gravitação universal, e a subsequente solução do problema do sistema do mundo a partir da causa dos movimentos planetários. Essa parte se concentrou sobretudo na apresentação e discussão das primeiras treze proposições do Livro III, nas quais Newton partiu dos movimentos aparentes dos astros até determinar as suas causas, e, em seguida demonstrou o centro do sistema do mundo e os verdadeiros movimentos planetários. Para encerrar esse volume, resta-nos, agora, retornar aos comentários metodológicos de Newton, desta vez aqueles da segunda e terceira edição, e fazer algumas considerações gerais sobre o método. É isso que será feito a seguir, na *Parte 4*, a parte que encerra o presente volume.

Parte 4.
Segunda e Terceira Edição aos Principia:
Epistemologia e Método

“Porque o que quer que não seja deduzido dos fenômenos deve ser chamado de hipótese; e hipóteses, quer metafísicas, quer físicas, quer de qualidades ocultas, quer mecânicas, não têm lugar na filosofia experimental”.

Isaac Newton, 1713.

Na parte precedente os princípios matemático-mecânicos e a geometria mecânica de forças, desenvolvidos nos capítulos 5-8, foram aplicados em associação com o método da análise e síntese para solucionar o difícil problema do sistema do mundo. Partindo dos fenômenos dos movimentos orbitais dos planetas foi possível chegar à causa desses movimentos, a saber, a força da gravidade universal pela qual os planetas e satélites são desviados das suas trajetórias retilíneas; em seguida, partindo dessa causa se deduziu o centro do sistema do mundo e, conseqüentemente, os verdadeiros movimentos planetários. O centro do sistema do mundo está próximo da superfície do Sol, e os planetas descrevem trajetórias elípticas com o Sol aproximadamente sobre um dos focos, obedecendo a lei das áreas e períodos em relação a esse foco. Com essa solução, encerrou-se a etapa da apresentação e análise dos desenvolvimentos dos *Principia* (i.e., do conteúdo, argumentos, procedimentos, método, etc).

Pretendo, agora, voltar a me focar nos *pronunciamentos metodológicos* de Newton. Mas dessa vez, naqueles da segunda e terceira edição. Como pretendo mostrar, esses pronunciamentos se concentram em aspectos relacionados à epistemologia e o método dos *Principia*. Nos capítulos 12, 13 e 14, apresento e analiso as declarações de Newton na segunda e terceira edição. Mais especificamente, no capítulo 12 examino as Regras 3 e 4, que foram suprimidas na seção 9.1. Juntamente com as Regras 1 e 2, elas formam um quadro do que aqui considero útil para compreender a *epistemologia dos Principia*. No capítulo 13, apresento o célebre *Escólio Geral* aos *Principia*, concentrando-me nas polêmicas expressões “*hypotheses non fingo*” e “dedução a partir dos fenômenos”, procurando esclarecer a relação dessas expressões com a chamada “filosofia experimental”, também mencionada por Newton no seu texto conclusivo. E no capítulo 14, apresento os comentários metodológicos de Roger Cotes no prefácio à segunda edição, especialmente aqueles que se relacionam com o método da “análise e síntese”. Por fim, ofereço uma discussão geral sobre o método e um esboço completo desse método nos *Principia*, a partir de todo o percurso de estudos realizados anteriormente, ou seja, a partir tanto dos pronunciamentos e procedimentos de Newton no tratado, quanto dos seus pressupostos metafísicos e epistemológicos.

12 REGRAS 3 E 4: A EPISTEMOLOGIA DOS *PRINCIPIA*

Conforme foi mencionado na seção 9.1, as Regras 3 e 4 não constavam na primeira edição dos *Principia*. A Regra 3 foi introduzida apenas na segunda edição de 1713, e a Regra 4 na terceira edição de 1726. Alguns comentadores sugerem que essas duas últimas regras foram introduzidas extemporaneamente em razão das críticas sofridas pelos *Principia* ao longo dos anos após a sua primeira publicação. Elas teriam mais o papel de responder aos críticos e defender a gravitação universal dos ataques dos filósofos mecanicistas. Segundo eles, as Regras 3 e 4 deveriam ser recebidas com certa cautela, pois teriam mais o objetivo de atacar as teorias rivais do que mesmo esclarecer os pressupostos do argumento da gravitação. Não nego que esse poderia ser um dos objetivos de Newton. Mas adianto que nesse capítulo procuro mostrar que, a despeito dessas regras terem sido usadas para defender os *Principia*, ou atacar os seus críticos, elas são de fato parte fundamental dos pressupostos da ciência desse tratado, e já podiam ser depreendidas desde a sua primeira edição. Seria um erro, portanto, afirmar que aquele era o seu propósito mais fundamental. A seguir, argumento que todas as quatro regras dos *Principia* derivam de um único e mesmo princípio: o *princípio da simplicidade da natureza*. Esse princípio é absolutamente fundamental para a epistemologia de Newton. Para esclarecer essa conclusão, dividirei esse capítulo em duas partes. Na primeira parte tratarei especificamente da Regra 3. Na segunda, abordarei a Regra 4.

12.1 REGRA 3: O FUNDAMENTO DE TODA A FILOSOFIA

Conforme mencionei acima, a Regra 3 não constava explicitamente dentre as premissas do argumento da gravitação na primeira edição dos *Principia*. Supostamente, Newton acrescentou essa regra com o objetivo de fortalecer e tornar mais clara a última inferência para chegar ao princípio da gravitação universal no Livro III. Eis o seu enunciado:

Regra 3

As qualidades dos corpos que não podem sofrer intensificação nem remissão e que se encontram em todos os corpos no alcance dos experimentos devem ser admitidas como qualidades de todos os corpos universalmente.⁵⁴³

Na tradução do Mote-Cajori se lê:

⁵⁴³ Tradução minha, do latim. Original: “Qualitates corporum quae intendi & remitti nequeunt, quaque corporibus omnibus competunt in quibus experimenta instituere licet, pro qualitatibus corporum universorum habendae sunt”.

The qualities of bodies, which admit neither intensification nor remission of degrees, and which are found to belong to all bodies within the reach of our experiments, are to be esteemed the universal qualities of all bodies whatsoever (As qualidades dos corpos que não admitem nem intensificação nem remissão de graus e que são encontradas em todos os corpos no alcance dos nossos experimentos devem ser consideradas como qualidades universais de todos os corpos).⁵⁴⁴

Das quatro regras apresentadas na última edição dos *Principia*, a Regra 3 é aquela para a qual Newton dedica o maior espaço de discussão. São quase duas páginas de comentários. Mas não penso que seja porque o autor considere essa regra mais importante que as demais. Pelo contrário. Penso que o maior espaço dedicado à Regra 3 ocorre em virtude de se tratar de uma expansão e aprofundamento no conteúdo das Regras 1 e 2. Com disse, as três regras – na verdade as quatro – possuem um único e mesmo fundamento.

É possível dividir os comentários da Regra 3 em três partes. A primeira parte apresenta uma justificativa para a necessidade de aplicação dessa regra e alguns exemplos. A segunda parte apresenta um corolário da regra e uma pequena discussão sobre ele. A terceira parte aplica a regra para o caso específico da gravidade para se chegar à conclusão da gravidade universal. Acerca da primeira parte, Newton justifica a regra de uma forma bastante direta e pragmática. Devemos considerar como *universais* as qualidades que são encontradas em todos os corpos no alcance dos experimentos “porque as qualidades dos corpos apenas podem ser conhecidas por meio dos experimentos; e, portanto, as qualidades que concordam universalmente com os experimentos devem ser consideradas como qualidades universais”.

A justificava, acima fornecida de maneira bastante sucinta, poderia ser melhor compreendida e desenvolvida evidenciando-se as suas premissas. Abaixo segue uma tentativa de fazê-lo:

1. O nosso conhecimento do mundo natural – e particularmente dos corpos – é formulado indiscutivelmente com a admissão de *qualidades universais*.
2. As *qualidades universais* são qualidades que estão presentes em todos os corpos que existem.
3. As qualidades dos corpos são por nós conhecidas apenas por meio dos experimentos (ou da experiência).⁵⁴⁵

⁵⁴⁴ MC, p.398. Na versão do Cohen: “Those qualities of bodies that cannot be intended and remitted [i.e., qualities that cannot be increased and diminished] and that belong to all bodies on wich experiments can be made should be taken as qualities of all bodies universally”. (CW, p.795).

⁵⁴⁵ Os comentários de Newton nessa regra dão a entender que ele usa “experimentos” e “experiência” como sinônimos. Veja o capítulo 13 para dirimir qualquer dúvida sobre isso.

4. Não somos capazes de conhecer todos os corpos que existem por meio da experiência.
5. Logo, não somos capazes de conhecer pela experiência as *qualidades universais*, e se ainda assim as utilizamos é porque atribuímos a universalidade para as qualidades que pertencem a todos os corpos no alcance da nossa experiência.

Não é difícil perceber que a Regra 3 propõe um princípio de indução. Dada a premissa em que Newton sustenta o seu empirismo radical (“as qualidades dos corpos apenas podem ser conhecidas por meio dos experimentos [i.e., da experiência]”), segue-se que as qualidades universais se originam da indução. Uma vez que o nosso conhecimento é válido, o procedimento indutivo que fazemos também é. O foco da justificativa de Newton não repousa na discussão sobre a validade lógica das inferências indutivas, mas no fato já consumado e estabelecido que o nosso conhecimento é válido. Os exemplos fornecidos em seguida reforçam essa ideia:

A extensão dos corpos é por nós conhecida apenas pelos nossos sentidos e, no entanto, há corpos além do alcance dos nossos sentidos; mas porque a extensão é encontrada em todos os corpos sensíveis é atribuída a todos os corpos universalmente (...) Sabemos que todos os corpos são impenetráveis não pela razão, mas pelos sentidos. Percebemos que todos os corpos com os quais lidamos são impenetráveis e, portanto, concluímos que a impenetrabilidade é uma propriedade de todos os corpos universalmente. Que todos os corpos são móveis e perseveram em movimento ou em repouso por meio de certas forças (as quais chamamos de força de inércia) nós inferimos por encontrarmos essas propriedades em todos os corpos que nós temos visto (...) Esse é o fundamento de toda a filosofia.⁵⁴⁶

Todas as qualidades universais que povoam o nosso conhecimento do mundo são obtidas pela indução. A extensão, a impenetrabilidade, a mobilidade e a inércia são alguns exemplos. A inferência indutiva é, portanto, “o fundamento de toda a filosofia”. Certamente alguém poderia objetar: *mas isso não é justificativa alguma. Não há qualquer garantia que essa universalidade atribuída seja mesmo verdadeira.* Ao que Newton poderia responder: *não importa. É assim que o conhecimento é construído. Tire isso e não há mais conhecimento. Tire isso e toda a filosofia natural – e quiçá toda a filosofia – desmorona.*

Está claro a essa altura que, assim como as Regra 1 e 2, estamos aqui diante de um princípio epistemológico mais do que tudo. Talvez a última sentença da passagem acima pudesse ser parafraseada sem prejuízo algum se fosse afirmada como: *esse é o fundamento de todo o conhecimento.* A atribuição de universalidade a tudo aquilo que se apresenta aos

⁵⁴⁶ CW, p.795. Na última frase da citação Cohen diz: “This is the foundation of all natural philosophy”. No entanto, o original afirma: “Et hoc est fundamentum philosophiae totius”.

nossos sentidos como universal. É assim que formulamos o conhecimento cotidiano. E na formulação do conhecimento na filosofia natural não devemos nos desviar desse modo de funcionamento espontâneo da nossa razão. Naturalmente, essas observações encaminham a Regra 3 precisamente na mesma direção das Regras 1 e 2. Ela também visa expressar meramente a forma como realizamos as inferências espontaneamente na construção cotidiana do conhecimento. Não se trata de uma instrução metodológica; não se trata de uma parte importante do procedimento de Newton; não se trata sequer de uma peça essencial no argumento da gravitação. Trata-se de algo que já está dado e estabelecido. Não é assim que *deve ser*; é assim que *é*. É o ponto de partida. Desse modo, assim como nas Regras 1 e 2, essa regra foi também inserida nos *Principia* apenas para satisfazer a exigência formal do método axiomático de se explicitar todas as premissas das inferências realizadas. Entretanto, mesmo que ela lá não estivesse explicitada, a inferência se estabeleceria da mesma forma, uma vez que é assim que pensamos naturalmente.

Após apresentar a sua breve justificativa para o uso da regra e alguns exemplos, Newton introduz o que aqui classifiquei como a segunda parte dos seus comentários. Ele afirma que, no caso de uma qualidade universal, *a qualidade do todo surge e é composta pela qualidade das partes*. Na verdade, esse princípio tem uma grande importância nos *Principia*. Ele é repetido em várias vezes ao longo do tratado. No *Escólio das Definições* se afirma que “o movimento do todo é o mesmo que a soma do movimento das partes”⁵⁴⁷; na *definição 8* se afirma que a força motriz de um corpo é a soma da força motriz de cada partícula; no *escólio da seção 11* se afirma que a atração exercida por um corpo deve surgir da soma da força de todas as suas partículas; e na *proposição 6 e 7 do Livro III*, como vimos anteriormente, esse princípio é imprescindível para a inferência final da gravitação universal. Na segunda edição dos *Principia*, Newton revela que a fonte do importante preceito: a “Regra 3”. E após o esclarecimento básico da regra ele ensina que “a dureza do todo surge da dureza das partes”, e por essa razão também inferimos a dureza até mesmo das “partículas indivisíveis” dos corpos. E estende esse princípio como válido para todas as qualidades universais:

A extensão, dureza, impenetrabilidade, mobilidade, e a força da inércia do todo resulta da extensão, dureza, impenetrabilidade, mobilidade e força de inércia das partes; e, portanto, concluímos que mesmo as menores partículas de todos os corpos são também extensas, duras, impenetráveis, móveis e dotadas da sua própria força de inércia. Esse é o fundamento de toda a filosofia.⁵⁴⁸

⁵⁴⁷ MC, p.7.

⁵⁴⁸ CW, p.795-796.

Newton afirma que as qualidades que pertencem a todos os corpos no alcance dos nossos experimentos devem ser consideradas como *qualidades universais*. Mas além disso, afirma que as qualidades dos corpos que são consideradas universais devem ser admitidas como pertencendo não apenas aos corpos como um todo coeso, mas às partes dos corpos, e mesmo às suas mínimas partículas. Aparentemente, a indução sugerida na Regra 3 não deveria se limitar a estender a qualidade considerada para *todos os corpos*, mas até mesmo para *todas as partículas* dos corpos. E em última instância, talvez seja esse motivo pelo qual esse procedimento seria “o fundamento de toda a filosofia”. Ele nos levaria não somente a um conhecimento de grande extensão sobre o mundo, mas às propriedades mais fundamentais de todas as coisas, ou às propriedades dos elementos últimos de toda a matéria.

Evidentemente, a justificativa para a admissão desse princípio é a própria indução, que, como já destacado mais acima, é admitida como válida no seu ponto de partida, uma vez que se admite como pressuposto que o nosso próprio conhecimento – de maneira geral – é válido.⁵⁴⁹ Mas estando bem assentado esse ponto, vale a pena agora dizer que embora o foco de Newton não seja justificar a indução, ou a validade do nosso conhecimento, de passagem ele fornece algumas pistas sobre o assunto. Da mesma forma que as Regras 1 e 2, a Regra 3 também decorre imediatamente do princípio da simplicidade da natureza. Ele afirma:

Certamente fantasias inventadas aleatoriamente não devem ser sustentadas contra a evidência dos experimentos [ou da experiência], e nem devemos nos desviar da analogia da natureza, uma vez que a natureza é sempre simples e consonante consigo mesma.⁵⁵⁰

Nessa passagem se parece sugerir que a validade dos conhecimentos que decorrem da indução é justificada pela simplicidade e consonância – ou harmonia – da natureza. Embora a sentença acima possa ser entendida como um breve parêntese no comentário da regra, será de grande proveito fazer uma pausa nesse ponto e analisar em maior profundidade essa sugestão. Esse “parêntese” terá o mérito de contribuir para uma possível compreensão da confiança de Newton na indução, e também para tornar mais claro o princípio que preceitua que a qualidade do todo surge da qualidade das partes, além de esclarecer a menção à

⁵⁴⁹ Como o leitor já deve ter percebido, ou ainda perceberá no que se segue, uso aqui um conceito mais flexível de indução, bem ao modo da abordagem do próprio Newton. Esse conceito será melhor refinado na Etapa II desse trabalho.

⁵⁵⁰ Traduzido do latim. No original: “Certe contra experimentorum tenorem somnia temere confingenda non sunt, nec a natura: analogia recedendum est, cum ea simplex esse soleat & sibi semper consona”. Na tradução do Mote-Cajori: “We are certainly not to relinquish the evidence of experiments for the sake of dreams and vain fictions of our own devising; nor are we to recede from the analogy of Nature, which is wont to be simple, and always consonant to it self”. (MC, p.398-399). Na tradução do Cohen: “Certainly idle fancies ought not to be fabricated recklessly against the evidence of experiments, nor should we depart from the analogy of nature, since nature is always simple and consonant to itself”. (CW, p.795).

“intensificação e remissão” no enunciado da lei. Após essa discussão retomo aos demais comentários de Newton sobre a regra 3.

12.1.1 Indução e simplicidade da natureza

Na seção 9.2.1 foi mostrado que a admissão de um princípio de simplicidade da natureza levava por um lado à conclusão que cada efeito (ou fenômeno) deveria possuir no máximo uma causa, e por outro, que cada causa poderia gerar vários efeitos; e, além disso, que cada espécie de causa deveria gerar uma determinada espécie de efeitos. Assumidas essas conclusões como regras, elas necessariamente reduziriam no *número* de causas e as *espécies* de causas nas explicações dos fenômenos naturais, conferindo às nossas explicações uma maior simplicidade e, conseqüentemente, uma maior proximidade daquilo que se acredita que a natureza o seja. Mas a admissão de um princípio de simplicidade da natureza tem implicações ainda mais profundas na formulação e organização do nosso conhecimento.

Se a natureza é simples, não apenas as *causas* devem ser reduzidas ao menor número possível, mas toda a estrutura da constituição e funcionamento da natureza deve ser a mais simples possível. Aparentemente, os modernos utilizaram um semelhante princípio de simplicidade da natureza quando procuraram reduzir todos os fenômenos naturais à matéria e ao movimento. Com efeito, na filosofia mecânica estava implícito que toda a matéria era constituída por um único tipo de elemento fundamental (não mais *quatro*, como na cosmologia aristotélica); que havia dois estados naturais dessa matéria (o repouso ou movimento uniforme em linha reta); e por fim que havia um único tipo de operação que podia alterar esses estados naturais da matéria ou dos corpos (o contato).⁵⁵¹ A partir daí todos os fenômenos naturais poderiam ser explicados ou com recurso a esses elementos únicos da matéria; ou com recurso aos estados naturais da matéria; ou com recurso ao único tipo de interação da matéria. Genericamente falando, a concepção filosófica dos modernos parece estar totalmente de acordo com a suposição de que a natureza é simples. Mas suscito esse exemplo aqui apenas para enfatizar que a partir do pressuposto da simplicidade da natureza não se segue apenas que o número de causas dos fenômenos deve ser o menor possível. Na verdade, toda a estrutura de constituição, processos e operações da natureza deve ser o mais simples possível.

⁵⁵¹ Pelo menos para Descartes a segunda parte era verdadeira.

Com base nessa compreensão consideremos mais detidamente agora o caso das *qualidades* ou *propriedades* dos corpos. Se a natureza é simples, toda a diversidade dos corpos e dos fenômenos deve surgir de um número mínimo de elementos fundamentais cada qual com um pequeno número de propriedades fundamentais. Para fins de argumentação, admitamos que toda a natureza seja composta por um único *elemento fundamental* que possui poucas *propriedades fundamentais*. Em razão dessas propriedades, os elementos serão capazes de se associar e combinar, gerando combinações e subcombinações até o ponto da diversidade atual dos corpos da natureza. A figura abaixo apresenta um esquema simplificado:

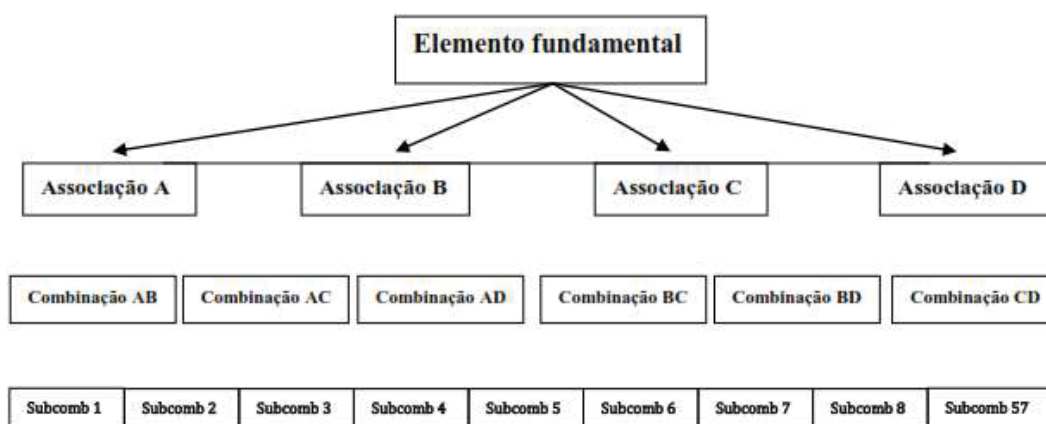


Figura 92 – Estrutura idealizada do mundo, sob a tese da simplicidade da natureza
Fonte: o autor

Imaginando que o *elemento fundamental* fosse capaz, por meio das suas propriedades, de realizar quatro associações, e que essas associações pudessem se combinar duas a duas, surgiriam seis combinações diferentes, que poderiam gerar, por sua vez, um número de até 57 subcombinações. Mas admitamos, além disso, que o número de propriedades fundamentais do elemento originário sejam *três*, e que a cada nova associação, combinação, ou subcombinação surja *uma* nova propriedade, digamos, uma *propriedade derivada*. Teríamos, desse modo, três *propriedades fundamentais*, quatro *propriedades derivadas* de primeira ordem, seis de segunda ordem, e 57 de terceira ordem. A partir dessa organização inicial, todos os corpos da natureza seriam caracterizados por uma determinada combinação de propriedades.

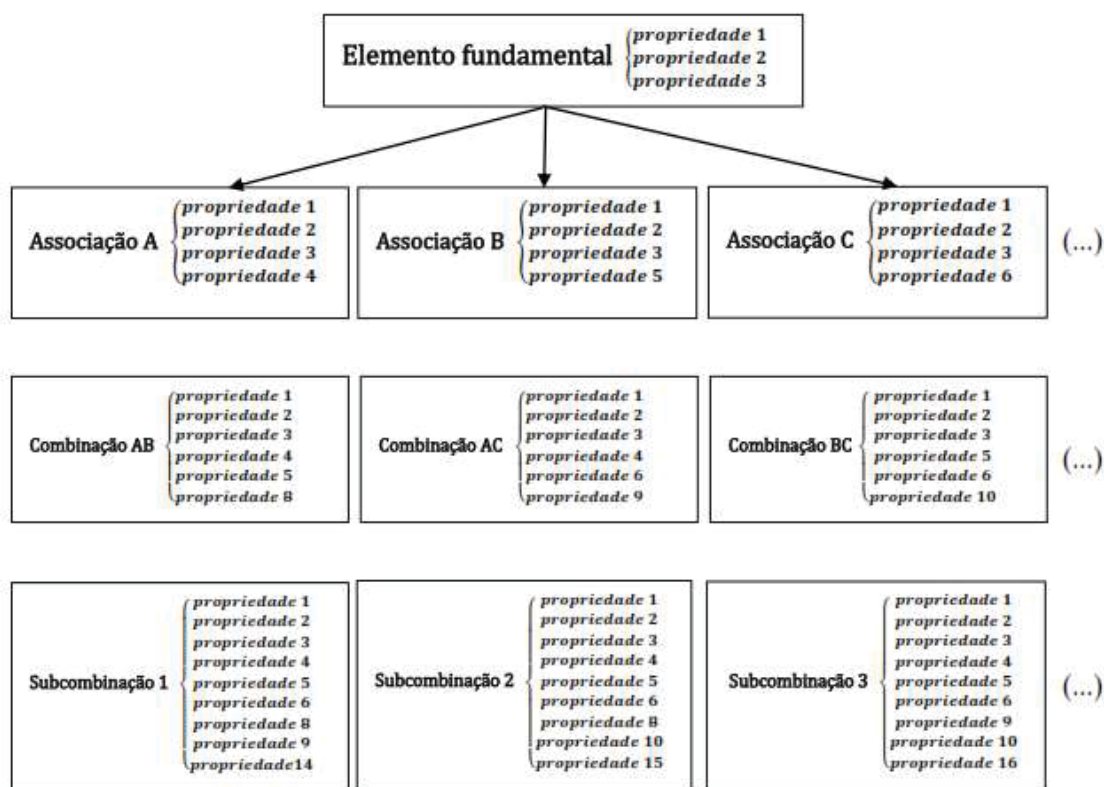


Figura 93 – Variedade de propriedades dos corpos sob a tese da simplicidade da natureza

Fonte: o autor

Como se percebe pelo esquema acima, as *propriedades fundamentais* 1, 2 e 3 estão presentes em todos os corpos, pois pertencem ao *elemento fundamental* a partir do qual todas as coisas são constituídas. Por essa razão também podem ser chamadas de *propriedades ou qualidades universais*. A cada nível hierárquico de associação ou combinação surge um novo número propriedades derivadas que estarão presentes, cada qual, numa determinada classe de corpos. Por essa razão elas também podem ser chamadas de *propriedades gerais*. Naturalmente, no esquema considerado haverá propriedades gerais de primeira ordem, segunda e terceira ordem. No diagrama, as propriedades gerais de primeira ordem são aquelas que variam de 4 a 7; as propriedades gerais de segunda ordem variam de 8 a 13; e as propriedades gerais de terceira ordem variam de 14 a 70.

Consideremos agora a questão da possibilidade de acesso do nosso conhecimento a essa organização da matéria e dos corpos, e as suas propriedades. É evidente que dificilmente teremos acesso empírico aos *elementos fundamentais* da matéria e suas combinações primárias.⁵⁵² Mas é bastante razoável admitir que temos, sim, acesso empírico às *qualidades*

⁵⁵² Tento raciocinar aqui como um pensador do séc. XVII.

ou propriedades por eles manifestas.⁵⁵³ Conceda, então, que o nosso acesso empírico esteja restrito às *propriedades* dos corpos ou da matéria. Assim, é possível conhecer indiretamente os *elementos* e as suas combinações específicas por meio do conhecimento das suas *propriedades* ou combinações específicas de propriedades. Cada combinação específica de *propriedades* está relacionada a uma combinação específica de *elementos* fundamentais e derivados. Conhecendo-se as combinações das propriedades, conhece-se a combinação dos elementos. Quanto mais geral é a propriedade, mais elementar é a combinação. A mais geral das propriedades expressa também a mais fundamental das combinações de elementos, senão uma propriedade do próprio elemento fundamental.

Do exposto acima é possível perceber que todas as *propriedades fundamentais* dos elementos primários – ou seja, as *propriedades universais* – nos são acessíveis empiricamente, uma vez que essas propriedades estão presentes e são manifestas em *todos os corpos universalmente*. Mas não apenas temos “acesso empírico” a elas como certamente as conhecemos, senão todas ao menos algumas, posto que uma vez que se manifestam em *todos os corpos*, estão no pleno alcance da nossa experiência. Por outro lado, as *propriedades derivadas*, ou *gerais*, embora acessíveis empiricamente, podem estar presentes em corpos fora do alcance imediato da nossa experiência particular, pois são propriedades que não estão presentes em todos os corpos universalmente.⁵⁵⁴ Com efeito, quanto mais geral é a propriedade, maior é a probabilidade de estar no alcance imediato da nossa experiência, e de efetivamente a conhecermos, uma vez que ela está presente numa maior classe de corpos. E disso se segue que as propriedades mais difíceis de serem conhecidas são as propriedades mais particulares, pois pertencendo elas a um número restrito de corpos, com grande probabilidade podem estar fora do alcance imediato da nossa experiência. Em suma, assumindo que a natureza é simples, e que toda a diversidade dos corpos da natureza surge de um único elemento fundamental, o resultado é que é muito mais fácil conhecer as *propriedades universais* dos corpos do que as *propriedades particulares*.

Posto isso, se a natureza é simples, uma construção progressiva do conhecimento deve se iniciar não do particular para o universal, mas do universal para o particular. Mais exatamente, a construção do conhecimento se inicia pelo *agrupamento de semelhanças*. Características semelhantes que observamos ou percebemos em *todos os corpos* devem ser

⁵⁵³ A própria ideia de “qualidade” ou “propriedade” está relacionada à nossa percepção.

⁵⁵⁴ Um exemplo disso seriam as propriedades de corpos que estão em um outro planeta. Embora enquanto propriedades são acessíveis empiricamente, não temos acesso aos corpos nos quais se manifestam. Evidentemente, esse raciocínio é igualmente válido para todos os corpos desconhecidos. Não podemos conhecer as suas propriedades simplesmente porque jamais os encontramos. É nesse sentido aplico a expressão “alcance imediato” no texto.

consideradas como *propriedades universais*. Aquelas que percebemos apenas em *um grupo de corpos* devem ser consideradas *propriedades gerais*. Todas as demais propriedades que não se assemelham com qualquer outra devem ser consideradas *propriedades particulares*. A partir daí se inicia o processo de aperfeiçoamento do conhecimento. A medida que se amplia o campo da experiência algumas propriedades que antes eram consideradas *universais* podem não mais se apresentarem dessa forma. No entanto, esse fato não torna falso o conhecimento do ponto de partida. Não desfaz as ligações que antes foram feitas. Apenas as reajusta. Se as propriedades antes universais não se mostram mais dessa maneira, elas apenas descem um degrau da hierarquia, tornando-se propriedades gerais de primeira ordem. Ademais, propriedades gerais que antes eram de primeira ordem podem se subdividir, tornando-se propriedades de segunda ordem, e propriedades antes consideradas particulares podem se tornar propriedades gerais por novos agrupamentos de semelhanças. E assim diminui gradativamente o número de propriedades universais e o número de propriedades particulares, e aumenta o número de propriedades gerais e suas subdivisões. Não temos, portanto, jamais, um processo de falseamento.⁵⁵⁵

Do parágrafo anterior segue-se que a indução é um requisito absolutamente necessário para a construção progressiva do conhecimento. Se a natureza é simples – revisemos – disso decorre, em primeiro lugar, que há propriedades universais. Uma vez que todos os corpos são derivados de um único elemento, e possuindo evidentemente esse elemento certas propriedades, essas propriedades estarão presentes e serão manifestas em todos os corpos. Mas em segundo lugar, se a natureza é simples, há também propriedades gerais, pertencentes a classes de corpos ou de compostos que são formados por uma determinada combinação de elementos. A observação de uma mesma combinação de propriedades em vários corpos é uma evidência decisiva de que esses corpos pertencem a um mesmo grupo, o qual é caracterizado por essa propriedade geral. Qualquer nova propriedade encontrada em um elemento desse grupo é generalizada automaticamente para todos os demais. E isso porque já se admitiu que todos os corpos com essa combinação de propriedades é uma classe determinada de corpos que possuem uma constituição semelhante.

Por exemplo, se em um conjunto de corpos agrupados pelas propriedades comuns de brilho, dureza, alto ponto de fusão e densidade elevada se descobre em um deles que também há a propriedade de *alta condutividade elétrica*, essa última propriedade é também estendida para todos os demais. Isso significa que se admitiu anteriormente que todos os corpos,

⁵⁵⁵ Esse ponto está relacionado com a Regra 4. Veja a seção 12.2.

peremptoriamente, que possuem aquela combinação específica de propriedades são corpos de uma natureza (ou combinação) definida, por exemplo, “metais”. Evidentemente, alguém poderia dizer que a alta condutividade elétrica, se fosse testada nos outros corpos do conjunto, bem poderia não se manifestar, e há mesmo exemplos de muitas situações em que isso ocorre nas investigações científicas. Mas aqui cabem duas observações: primeiro, que se a natureza é simples, há de fato classes de corpos e propriedades gerais e, portanto, há uma grande probabilidade de que uma discrepância como essa não ocorra; e segundo, mesmo que diante do teste a alta condutividade não se mostre nos demais corpos, ou não se mostre em todos eles, esse resultado jamais seria capaz de falsear as generalizações anteriormente efetuadas. A negativa do teste, ou mesmo uma descoberta eventual, jamais seria capaz de desfazer a classe de corpos anteriormente agrupada; essa classe é apenas subdividida (por exemplo, em “metais” e “semimetais”)⁵⁵⁶. Em outras palavras, posto que a natureza é simples, todo e qualquer agrupamento dos corpos por semelhança é sempre decisivo e verdadeiro, ao menos aproximadamente. Evidências e estudos futuros podem, no máximo tornar essas conclusões mais exatas que antes.

O mesmo pode ser afirmado para as propriedades universais. Se todos os corpos no alcance da experiência possuem certas propriedades, essas propriedades devem ser consideradas necessariamente como universais e estendidas para todos os corpos, mesmo para aqueles fora do alcance da experiência. Esse procedimento é uma exigência para o avanço do conhecimento. Se eventualmente se descobrir que um corpo não possui a propriedade que antes se considerava universal, essa descoberta não falseia a conclusão anterior, apenas a reajusta. Como já foi dito, a propriedade antes universal desce um degrau na hierarquia e se torna uma propriedade geral de uma classe bastante ampla de corpos ou compostos, mais próximo de onde ela se localiza na verdadeira estrutura da realidade. A hesitação na generalização indutiva, por outro lado, simplesmente estagnaria a progressão do conhecimento, uma vez que todos os corpos permaneceriam com o mesmo estatuto de espécies particulares, sem nunca alterar essa condição, posto que para isso, em qualquer situação, seria necessário que se conhecesse a totalidade dos corpos do universo. Portanto, se a natureza é simples, o conhecimento deve ser construído do universal para o particular, e não

⁵⁵⁶ Estou usando o exemplo dos metais e semimetais aqui apenas como uma imagem familiar. Não pretendo que as propriedades listadas realmente se adequem rigorosamente aos conceitos atuais de metal e semimetal, e nem estou impondo esses conceitos ao séc. XVII.

o contrário; e a generalização indutiva é uma peça necessária para o avanço do conhecimento.⁵⁵⁷

Não é difícil perceber as Regras 1 e 2 se seguem facilmente dos mesmos pressupostos acima estabelecidos. Se a natureza é simples, todas as interações e operações possíveis entre os corpos ou elementos são em um número reduzido, e derivam, com efeito, de uma ou mais propriedades dos elementos fundamentais. Por exemplo, suponhamos que a impenetrabilidade, a extensão e a inércia sejam propriedades do elemento fundamental. Em razão dessas propriedades, se um elemento fundamental inicialmente em movimento avançar em direção a outro inicialmente em repouso, no limite do espaço que delimita os dois elementos haverá uma operação que podemos chamar de “impacto” ou “contato” que, primeiro, impedirá que os dois elementos extensos penetrem um no espaço ocupado pelo outro e, segundo, causará uma igual mudança na quantidade de movimento de cada elemento em sentidos contrário, em virtude da propriedade de resistência à mudança do estado natural de cada um (a inércia). Então, das propriedades do elemento fundamental surgem as operações possíveis entre os elementos e os corpos.

Admitamos agora, pela mesma simplicidade anteriormente suposta, que haja apenas uma única operação de causa e efeito entre os corpos ou elementos da qual todas as demais operações surgem. Nesse caso, essa operação chamada “contato” seria a *operação fundamental* enquanto que as demais operações surgidas a partir dela seriam as *operações derivadas*. É possível perceber que cada operação derivada seria um *efeito* de uma operação derivada de ordem superior, que seria a sua *causa*; e essa *causa* seria ela mesma um *efeito* de uma operação derivada de ordem superior, e assim por diante até se chegar à causa mais geral – a *operação fundamental*. Mas cada uma dessas operações entre corpos ou elementos seria, naturalmente, capaz de produzir vários efeitos. E nada impede ainda que esses efeitos possam se combinar, sendo essa própria combinação a causa de novos efeitos. Todas as operações entre corpos e elementos da natureza, bem como os fenômenos consequentes poderiam surgir

⁵⁵⁷ Newton poderia dizer que os filósofos da ciência contemporâneos têm feito a pergunta errada sobre a indução. A questão não é a validade lógica do procedimento indutivo para uma determinada inferência particular. A questão é *por que* o procedimento indutivo promove um avanço no conhecimento, mesmo não possuindo validade lógica, ou seja, mesmo que a sua conclusão possa ser falsa, estritamente falando. A resposta seria: porque a natureza é estruturada da maneira mais simples possível. Estando organizada a natureza dessa forma, há de fato uma ordem e uma regularidade, e não qualquer uma, de modo que qualquer inferência indutiva será uma aproximação dessa ordem por nós captada, e a cada nova inferência indutiva a partir de outras informações da natureza a aproximação anterior se torna mais exata. Isso só é possível de ocorrer porque há uma ordem, e essa ordem é a mais simples possível. A discussão sobre a indução e a sua relação com a racionalidade da ciência será aprofundada principalmente no volume II.

dos efeitos, e combinações dos efeitos, de um pequeno número de operações fundamentais, se não de uma única operação fundamental. O esquema abaixo pode favorecer o entendimento:

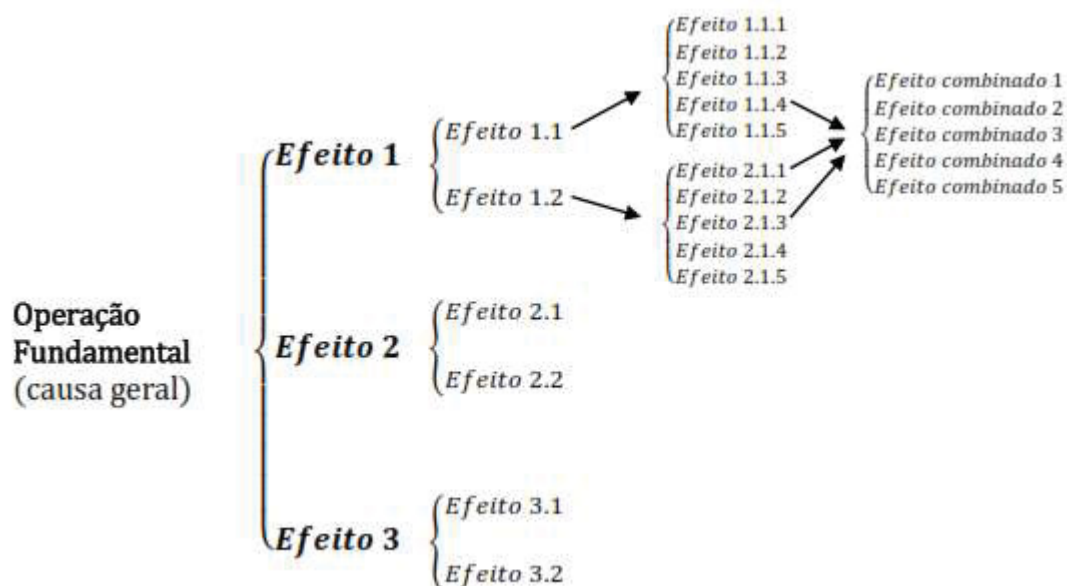


Figura 94 – Hierarquia das causas e efeitos de acordo com princípio da simplicidade da natureza
Fonte: o autor

Da mesma maneira que no caso das propriedades, temos pleno acesso empírico à *operação fundamental* pois ela está presente em toda e qualquer operação entre corpos na natureza. E de fato a conhecemos, mesmo que não tenhamos consciência disso. O que a distingue é que ela está presente em *todas as interações entre corpos* no alcance dos experimentos. Semelhantemente, temos acesso empírico a todas as *operações derivadas*, embora não conheçamos necessariamente todas, uma vez que não estão presentes em todas as interações entre corpos da natureza. E construímos, do mesmo modo, o conhecimento do universal para o particular. Agrupamos efeitos pela semelhança e atribuímos a eles a mesma “espécie de causa” ou operação – fundamental ou derivada. As operações que estão presentes em todas as interações entre corpos no alcance dos experimentos são as *operações fundamentais*, aquelas que estão apenas em grupos de interação são as *operações derivadas*. Todos os efeitos particulares podem ser considerados como causados por uma operação derivada, e estas causadas por uma operação de ordem superior, e todos os efeitos e operações de qualquer ordem podem ser considerados como causados, em última instância, pela *operação fundamental*. Por essa razão, explicar derradeiramente uma operação natural qualquer pode ser entendida como reduzi-la em termos da operação fundamental, encontrando todas as conexões do efeito até essa causa mais geral. Por exemplo, se admitirmos que essa operação é o “contato”, isso significa que ele está presente em todas as interações entre

corpos no alcance dos experimentos ou, ao menos, é a interação mais universal que se tem notícia. Uma vez admitido o contato como operação fundamental, segue-se que todas as demais operações derivadas e efeitos particulares podem ser reduzidos a ele.⁵⁵⁸

Portanto, como disse mais acima, não é difícil perceber que as Regras 1 e 2 também se seguem dos mesmos pressupostos estabelecidos para as qualidades universais. E as generalizações aplicadas tanto para as qualidades dos corpos quanto para as operações de causa e efeito decorrem e são justificadas pelo princípio da simplicidade da natureza. Se a natureza é simples, segue-se que as generalizações indutivas levam a um avanço gradual do conhecimento e, por conseguinte, devem ser admitidas sem restrições. O mais curioso nesse particular é que não apenas a natureza é simples, e consequentemente o conhecimento avança pelo procedimento exposto acima, como esse procedimento não foi inventado por Newton ou por qualquer outro filósofo; todos fomos equipados com um sistema cognitivo que funciona precisamente nesses termos. É claro que Newton não afirma isso explicitamente, mas acredito que não seja demais conceder que esse seja o seu entendimento. O “mais perfeito dos mecânicos” não apenas criou o mundo natural de maneira exata, regular, e mais simples possível; ele nos equipou com a capacidade de conhecer esse mundo. Em última análise, essa parece ser a fonte da confiança de Newton na indução. De todo modo – repito – o uso do procedimento indutivo é legítimo na construção do nosso conhecimento porque é um fato amplamente aceito que o conhecimento humano tem validade.⁵⁵⁹ E se o nosso conhecimento – construído pela indução – tem validade, então a natureza é simples e regular (“consonante consigo mesma”).⁵⁶⁰

Voltando a discutir diretamente os comentários de Newton à Regra 3 é fácil perceber como as reflexões acima tem o mérito de contribuir para a compreensão do princípio que afirma que qualidade do todo surge da qualidade das partes mínimas, no caso das qualidades universais. Conforme foi mostrado, se a natureza é simples, as únicas propriedades que estarão presentes em todos os corpos universalmente serão as propriedades fundamentais, ou melhor, as propriedades do elemento fundamental a partir do qual todos os corpos são formados. Assim, se uma qualidade é considerada *universal*, necessariamente deve-se considerar que todas as partes mínimas dos corpos apresentam essa mesma propriedade; e

⁵⁵⁸ Todavia, a partir do que foi exposto até aqui é evidente que com o aumento do campo da experiência esse quadro pode eventualmente mudar. Mas “mudar”, aqui, não significa se tornar falso. Outras operações universais podem surgir, e eventualmente o “contato” também pode se tornar uma operação derivada. Isso efetivamente ocorreu a partir da segunda metade do séc. XIX na Física. Veja sobre isso as seções 19.2 e 19.3 do volume II.

⁵⁵⁹ Nós não duvidamos do conhecimento, de maneira geral. Apenas tentamos justificá-lo. Até os céticos, que questionam retoricamente a validade do conhecimento, fundamentam as suas vidas na crença da sua validade. Caso contrário, sequer discutiriam esse assunto.

⁵⁶⁰ “Indução” nesse contexto pode ser entendido como o agrupamento de semelhanças em classes.

conversamente, caso se admita que as partes mínimas de matéria dos corpos possuem uma determinada propriedade, necessariamente essa propriedade deve ser considerada como uma propriedade de todos os corpos universalmente. No caso de uma propriedade universal, a propriedade do todo surge da propriedade das partes.

Está justificado, portanto, esse corolário que aqui classifiquei como pertencendo à segunda parte das observações de Newton sobre a Regra 3. Mas as reflexões empreendidas nessa seção ainda têm o mérito de esclarecer outros aspectos relevantes ligados da Regra 3. Em particular, tem o mérito de esclarecer a referência à “intensificação” e “remitência” no enunciado dessa regra; esclarecer o comentário de Newton sobre a gravidade não ser uma propriedade essencial da matéria; e esclarecer a conexão entre a Regra 3 e a Regra 4. Vejamos, a seguir, a relação dessa reflexão com a referência à “intensificação” e “remitência” no enunciado da regra.

12.1.2 A transmutação e a hipótese 3

Antes de avançar para a terceira e última parte da divisão aqui proposta para os comentários da Regra 3 (que aplica essa regra para o caso da gravidade universal) vale a pena aproveitar os desenvolvimentos da seção anterior para esclarecer a referência à “intensificação” e “remitência” no enunciado da Regra 3. Relembrando, Newton afirma que somente podem ser consideradas como qualidades universais aquelas qualidades que (1) “se encontram em todos os corpos no alcance dos experimentos” e (2) “não podem sofrer nem intensificação nem remitência”, ou “não admitem nem intensificação nem remissão de graus” – na tradução do Mote-Cajori – ou ainda “não podem ser entendidas e remitidas [aumentadas e diminuídas]”, na tradução do Cohen. A pergunta principal aqui talvez não seja *o que Newton quer dizer exatamente com isso*, mas porque as qualidades universais não podem sofrer essa variação, independente do nome que essa variação possa receber.

A partir dos desenvolvimentos complementares da seção anterior é possível oferecer uma resposta para essa questão. As qualidades ou propriedades realmente *universais* são as propriedades do *elemento fundamental* da matéria. Qualquer outra propriedade surge das associações e combinações entre esses elementos fundamentais. Portanto, essas últimas propriedades podem sofrer modificações ou mesmo deixar de se manifestar uma função da alteração das associações ou combinações desses elementos. Por exemplo, na Figura 93 a “propriedade 15” pode não mais se manifestar se a subcombinação específica que a produziu

se desfizer. Do mesmo modo uma propriedade pode se intensificar ou atenuar se um determinado corpo for constituído de dois tipos de subcombinações e uma delas abundar mais do que a outra. Uma situação concreta típica seria nas propriedades elétricas e magnéticas. Elas podem ser adquiridas temporariamente pelos corpos e perdidas; elas podem ser intensificadas e atenuadas. E isso significa simplesmente que elas não são propriedades *fundamentais*, mas *derivadas*. Modificando a organização da matéria, elas podem sofrer alterações, deixar de se manifestar, ou passar a se manifestar.

Os corolários 1 e 2 à proposição 6 do Livro III são bastante significativos a esse respeito.⁵⁶¹ Como vimos, ao constatar que a gravidade era proporcional unicamente à quantidade de matéria dos corpos, Newton concluiu que a gravidade não dependia da “forma da matéria”. E se não dependia da “forma da matéria” os corpos não poderiam “*gradatim transmutari*”, ou seja, “transmutar gradativamente”, passando a gravitar numa proporção maior ou menor que a sua quantidade de matéria, ou mesmo, “assumindo gradativamente a forma de outro corpo”, “perder a sua gravidade”.⁵⁶² É forte a impressão de que Newton tem em vista aqui que toda a matéria é composta por um único elemento fundamental, e que toda a diversidade dos corpos da natureza é produzida pela “forma da matéria”, ou melhor, pela forma como essa matéria é organizada ou *combinada*. E que por essa razão tanto um corpo de determinada natureza pode se transmutar em um corpo de outra natureza, como as propriedades por ele manifestas (não fundamentais), pela mesma razão, podem ser alteradas.⁵⁶³ Essas passagens da proposição 6 estavam presentes desde a primeira edição e faziam menção direta à “hipótese 3”, que veio a ser substituída pela Regra 3 na segunda edição. Vale a pena conhecer o que afirmava a hipótese 3 a esse respeito:

Hipótese 3

Todo corpo pode ser transformado em um corpo de qualquer outra espécie, e sucessivamente assumir todos os graus intermediários de qualidades.⁵⁶⁴

Sem a discussão feita anteriormente seria difícil compreender exatamente a relação da Regra 3 com essa hipótese. Ou mesmo como essa hipótese pode levar à inferência que resultou na gravitação universal. Mas estabelecido o fundamento comum que a matéria é

⁵⁶¹ Os comentadores geralmente têm se concentrado em relacionar a Regra 3 ao corolário 5 da proposição 6 do Livro III. No entanto, na minha opinião os corolários 1 e 2 são ainda mais importantes para essa relação. Veja a seção 10.7, particularmente as notas 503 e 504.

⁵⁶² CW, p.809. Dessas passagens da proposição 6 é possível perceber a origem da referência à “remissão de graus” na tradução de Mote para o enunciado da Regra 3. (O original em latim não faz qualquer menção a “graus”).

⁵⁶³ Não admira, portanto, que não apenas Newton mas outros filósofos naturais nutriam a crença e a expectativa da possibilidade da descoberta de uma maneira de transmutação dos metais.

⁵⁶⁴ *Principia* (1ed).

composta por um único elemento originário e que toda a diversidade dos corpos surge da “forma” dessa matéria, então fica claro que essa hipótese carrega o mesmo conteúdo da Regra 3, no entanto de uma forma mais fundamental. Na primeira edição, Newton usou essa hipótese para afirmar que a gravidade é uma “qualidade” que não apresenta qualquer variação intermediária de graus, portanto se mantém constante independente de qualquer transmutação dos corpos. Assim, só pode ser uma qualidade dos elementos fundamentais e, por conseguinte, uma qualidade universal. É claro que a redação da hipótese 3 em nada favorece a compreensão do leitor. Além disso fica apenas implícito que as “qualidades” que ele se refere não são as *qualidades universais*, mas todas as outras, ou as qualidades específicas dos corpos de determinada espécie.⁵⁶⁵ Provavelmente Newton extraiu esse preceito sem grandes alterações dos seus escritos alquímicos. No entanto, para a segunda edição ele tornou mais clara a relação desse princípio com as qualidades universais, e dirimiu as ambiguidades que surgiam da hipótese 3.

Não acredito que sejam necessários mais esclarecimentos sobre esse tópico.⁵⁶⁶ Uma qualidade universal é uma qualidade que surge das partes mínimas dos corpos, ou seja, dos seus elementos fundamentais. E surgindo desses elementos elas não podem sofrer qualquer modificação, seja na vasta variedade dos corpos encontrados na natureza, seja na alteração da “forma da matéria”, ou mesmo transmutação gradativa dos corpos. Somente *propriedades derivadas* podem sofrer esses efeitos.

Estabelecida e justificada a Regra 3, podemos passar agora à última parte dos comentários de Newton, que é a aplicação da regra para o caso da gravidade. Conforme mencionei anteriormente, Newton evitou modificar o texto original da primeira edição. Assim, ao substituir a hipótese 3 pela Regra 3 ele não fez grandes modificações no corpo das proposições 6 e 7. Em vez disso, preferiu incluir esse último trecho que reforça a inferência da gravidade universal na discussão da sua regra.

12.1.3 A aplicação da Regra 3 para o caso da gravidade

⁵⁶⁵ A hipótese 3 talvez pudesse ser melhor compreendida desse modo: *Todo corpo pode ser transformado em um corpo de qualquer outra espécie, e sucessivamente assumir todos os graus intermediários de qualidades [específicas de cada espécie de corpos].*

⁵⁶⁶ Na próxima seção acrescento mais considerações sobre isso.

A última parte da divisão que propus para os comentários de Newton à Regra 3 é a aplicação dessa regra para o caso da gravidade. Do que foi discutido até aqui sabemos que, uma vez que a natureza é simples, as qualidades que pertencem a todos os corpos no alcance dos experimentos, e que permanecem invariáveis a despeito da alteração dos estados e formas da matéria, devem ser consideradas como qualidades de todos os corpos universalmente. Como já vimos anteriormente, a gravidade (1) não sofre qualquer alteração na sua proporção em razão da mudança da forma da matéria; (2) é proporcional unicamente a quantidade de matéria dos corpos, o que significa que ela surge das partes mínimas dos corpos; e (3) é percebida em todos os corpos no alcance dos experimentos. Portanto, a gravidade é uma qualidade de todos os corpos universalmente. Nas palavras de Newton:

Finalmente, se é universalmente estabelecido pelos experimentos e observações astronômicas que todos os corpos sobre ou próximos da Terra gravitam [*lit.* são pesados] em direção a Terra, e gravitam na proporção da quantidade de matéria em cada corpo, e que a Lua gravita [é pesada] em direção à Terra na proporção da sua quantidade de matéria, e que o nosso mar gravita [é pesado] por sua vez em direção a Lua, e que todos os planetas gravitam [são pesados] em direção uns dos outros, e que há uma semelhante gravidade [peso] dos cometas em direção ao Sol, então terá de ser concluído, por meio dessa terceira regra, que todos os corpos universalmente gravitam em direção uns dos outros. Com efeito, o argumento a partir dos fenômenos será ainda mais forte para a gravidade universal do que para a impenetrabilidade dos corpos, para a qual, é claro, não temos um único experimento, ou mesmo uma observação, no caso dos corpos celestes.⁵⁶⁷

Newton não apenas estabelece uma analogia entre a generalização amplamente aceita para o caso da impenetrabilidade, como afirma que utilizando o mesmo critério haveria um número de evidências ainda maior para a universalidade da gravidade do que para a universalidade da impenetrabilidade. Em outras palavras, qualquer um que aceite a impenetrabilidade como uma qualidade universal dos corpos deve obrigatoriamente aceitar também a universalidade da gravidade. E se não aceitar, deve negar todas as demais qualidades universais. Está aplicada a Regra 3 para o caso da gravidade.

A aplicação da Regra 3 à gravidade provavelmente não suscitaria maiores questões se o comentário de Newton terminasse nesse ponto. Mas ao final ele acrescenta uma breve nota que parece obscurecer tudo o que foi afirmado anteriormente. Ele declara:

Contudo, de maneira alguma estou afirmando que a gravidade é essencial aos corpos. Por força inata eu entendo apenas a força de inércia. Isso é imutável. A gravidade diminui à medida que os corpos se afastam da Terra.⁵⁶⁸

⁵⁶⁷ CW, p.796.

⁵⁶⁸ Ibid.

A última nota oferecida à Regra 3 provoca muitas indagações porque Newton aplica à gravidade a mesma inferência que aplica para as propriedades como a impenetrabilidade, a inércia, a mobilidade entre outras. Como essas propriedades se encontram em todos os corpos no alcance dos experimentos, então elas são consideradas propriedades universais. Mas se elas são propriedades universais são igualmente *propriedades fundamentais*, ou propriedades do elemento fundamental, sendo por essa exata razão “essenciais aos corpos”, ou melhor, essencial à matéria. Mas embora Newton considere, aparentemente, essas propriedades essenciais à matéria, ele se limita a afirmar que a gravidade não é. À primeira vista essa afirmação parece meramente uma tentativa de se esquivar das várias críticas que o acusavam retornar ao aristotelismo; uma tentativa inócua, uma vez que a aplicação da sua regra levava exatamente à conclusão que ele pretendia evitar. Além disso, nas brevíssimas palavras que se seguem à sua declaração questionável ele parece sugerir que a gravidade não é essencial aos corpos porque ela “diminui” (por exemplo, a medida que se afasta da Terra), enquanto que a inércia, por exemplo, é uma propriedade “imutável”. Ora, esses comentários parecem sugerir que a gravidade é uma propriedade que precisamente não se enquadra na exigência da Regra 3 de não admitir “intensificação” ou “remitência”. Diferentemente da inércia, que é uma propriedade “imutável”, a gravidade pode sofrer “remitência” à medida que aumenta a distância da Terra ou dos outros corpos. Então, parece não haver outra alternativa: ou a gravidade é essencial à matéria, ou não se pode aplicar a Regra 3 à gravidade, pois ela pode sofrer intensificação e remitência com a variação da distância.⁵⁶⁹ Como essa última possibilidade parece estar mais claramente fora dos propósitos de Newton, resta a primeira possibilidade, da gravidade ser essencial à matéria e esses últimos comentários serem apenas uma espécie de invenção arbitrária para se esquivar das críticas.

Mas com base nas reflexões das seções anteriores (12.1.1 e 12.1.2), acredito que pode haver uma melhor explicação para a posição de Newton. Nitidamente, ao citar a gravidade Newton não está falando de uma “qualidade” ou de uma “propriedade”. Ele está referindo-se a um “efeito”. Em toda a argumentação da última parte dos seus comentários, em que aplica a Regra 3 à gravidade, em momento algum se aplica o adjetivo “qualidade” para a gravidade, como, aliás, eu mesmo fiz uma vez ou outra nos parágrafos anteriores ao reproduzir o

⁵⁶⁹ Vários comentadores já chamaram a atenção para as dificuldades interpretativas dessa passagem. Segundo Achinstein, se realmente os termos em latim “*intendi & remitti*” podem ser traduzidos como “aumentadas e “diminuídas”, como sugere Cohen em sua tradução, a Regra 3 de fato não poderia ser aplicada para o caso da gravidade, pois o próprio Newton alerta que a diferença entre a gravidade e a inércia é que essa última pode ser “diminuída”. Vários comentadores, no entanto, concordam que não é esse o caso. Veja Ducheyne, 2012, p. 115-117; J.E.McGuire, 1995, p.247; Achinstein, 2004, p.71-72.

argumento final dessa regra. Ele insistentemente fala de gravidade *em direção a*, ou de “corpos pesados *em direção* uns dos outros”. Newton está falando não de uma *propriedade* dos corpos, mas, como já disse antes, de um *efeito* que surge de certas propriedades dos corpos. Mais especificamente, depois de se convencer que a gravidade era um tipo de atração mútua *entre corpos* (evidenciada pela manifestação da terceira lei do movimento), esse *efeito* passa a ser uma “operação entre dois termos”, conforme se esclareceu na citação do *De Mundi Systemate* na seção 10.7.2.

Mas essa conclusão também se estabelece pelos desenvolvimentos da seção 12.1.1. Concebendo que tanto as Regras 1 e 2 quanto a Regra 3 surgem do mesmo princípio de simplicidade da natureza, essa última regra pode perfeitamente ser utilizada para estabelecer *propriedade gerais*, e não somente para *propriedades universais*.⁵⁷⁰ Enquanto que as Regras 1 e 2 podem perfeitamente ser utilizadas para estabelecer uma *operação universal* de causa e efeito (i.e., a *operação fundamental*), e não somente para as *operações gerais* e *derivadas* como sugere a interpretação mais imediata dessas regras. Sendo aplicada a Regra 3 para *propriedades gerais*, naturalmente se tratará de propriedades que não estão presentes em *todos os corpos* no alcance dos experimentos, mas ao menos em uma *classe* de corpos, e, portanto, serão propriedades que podem sofrer “intensificação” e “remitência” ou, de outro modo, podem sofrer variação em virtude da alteração da “forma da matéria”. Por outro lado, sendo aplicada as Regras 1 e 2 para *operações universais* (ou fundamentais), essas operações não devem estar apenas presentes numa *classe* de operações ou efeitos, mas em *todas as operações* entre corpos no alcance dos experimentos. Além disso, essa suposta *operação fundamental* não pode sofrer “intensificação” ou “remitência” em virtude da alteração da “forma da matéria”, ou em outras palavras, em virtude da alteração gradativa da estrutura elementar dos corpos.

Está claro, portanto, que a “intensificação” ou “remitência” refere-se a uma variação que ocorre em virtude da alteração da “forma da matéria”, e não qualquer outro tipo de variação, como aquela que o ocorre com a gravidade a medida que se afasta do centro da Terra, ou quanto um corpo se afasta do outro. Isso fica definitivamente esclarecido numa das variações da Regra 3, escrita num rascunho de uma das partes da Questão 31 da *Óptica*, em inglês. Newton afirma:

⁵⁷⁰ Newton fez isso no corolário 1 da proposição 5 do Livro III.

Todos os corpos aqui abaixo são pesados em direção à Terra na proporção da sua quantidade de matéria. A gravidade na proporção da sua quantidade de matéria não sofre intensificação ou remissão [*orig.* intended or remitted] numa mesma região da Terra por qualquer variedade de força e, portanto, não pode ser perdida [*orig.* cannot be taken away]. ~~Eu falo de corpos igualmente distantes do centro da Terra (...).~~⁵⁷¹

Nessa passagem Newton deixa bem claro “numa mesma região da Terra”, porque é evidente que aumentar a distância da Terra a gravidade vai variar. Não é disso que ele está falando. A última sentença cancelada por Newton é útil para eliminar derradeiramente qualquer possibilidade de ambiguidades. Ele está mencionando a possibilidade de alteração do peso de um corpo, por qualquer processo que seja, estando ele numa mesma distância do centro do planeta. E é evidente que isso jamais foi observado, conforme se afirma nos corolários 1 e 2 da proposição 6 do Livro III. Se isso fosse possível, um corpo poderia eventualmente até perder a sua gravidade.

As operações universais seriam aquelas que se observam em todos as operações entre corpos no alcance dos experimentos, e que não podem sofrer qualquer variação com a alteração gradativa da “forma da matéria” ou, como prefere Newton, não podem sofrer intensificação ou remissão. Mas haveria uma importante diferença entre uma *propriedade universal* e uma *operação universal*. Apenas uma propriedade universal é absolutamente imutável e se manifesta em toda e qualquer situação. Uma *operação*, por mais que seja universal, é sempre a manifestação de um *efeito* entre dois corpos ou dois elementos, que possuem propriedades. E mesmo quando se trata da operação mais fundamental ela não deixa de ser uma operação entre dois termos, nesse caso entre dois elementos fundamentais. Portanto, a diferença entre uma propriedade universal e uma operação universal é que esta última não é permanente e nem imutável *em qualquer situação*. A operação fundamental não é uma propriedade, ela surge das propriedades. E desse modo, ao que parece Newton tem motivos para dizer que a gravidade, apesar de *universal*, “não é essencial” à matéria, pois não é “imutável” como, por exemplo, a inércia ou a impenetrabilidade.

À guisa de conclusão, vale a pena mencionar que a presente interpretação da Regra 3 apresenta um resultado semelhante ao sugerido por McGuire (1995) e seguido por Ducheyne (2012), porém por caminhos distintos. McGuire tenta harmonizar a aparente discrepância da aplicação da Regra 3 para a gravidade (que não é nem um corpo e nem uma qualidade), argumentando que as “qualidades” podem ser entendidas por Newton como “forças”. Provavelmente ele abraça a ideia de que essa noção de “força” surgiu dos seus estudos

⁵⁷¹ U.L.C. Add. 3970 f. 243, apud McGuire, 1995, p.247. Cancelados de Newton.

alquímicos de Newton. Então, o sentido de “qualidades” da Regra 3 seria bem mais amplo do que se poderia à primeira vista supor. No entanto, ainda assim McGuire admite que as últimas sentenças do comentário de Newton à essa regra sugerem que ele admite dois tipos de qualidade ou forças: “universais-essenciais (imutáveis)” e “universais-relacionais”.⁵⁷² Essa classificação é equivalente a distinção entre “propriedade” e “operações” aqui proposta, com a diferença que esta última me parece mais adequada a uma interpretação conjunta das Regras 1, 2 e 3.

De todo modo, parece-me que mesmo pela interpretação de McGuire não se poderia negar que as conclusões de Newton sobre a universalidade da gravidade, e, ao mesmo tempo a sua recusa em admiti-la como essencial à matéria precisamente por ser uma “operação entre dois termos”, coloca a gravidade ao lado de outra operação fundamental: o “contato”. Em outras palavras, pelos próprios critérios de Newton definidos por suas regras, surge a possibilidade – ou talvez a necessidade – de se incluir a gravidade como uma operação fundamental da natureza. No entanto, curiosamente, até o fim da sua vida, Newton parece ter insistido na tentativa encontrar uma forma de reduzi-la ao *contato*. Isso pode sugerir que ele não foi capaz de acatar as suas próprias regras de indução. Mas não me parece que foi o caso. Para apresentar um entendimento, ainda que superficial, para essa questão, será necessário introduzir agora o conteúdo da última das regras de Newton, incluída na terceira edição dos *Principia*. A regra de número quatro.

12.2 REGRA 4: CONTRA-EXEMPLOS E HIPÓTESES CONTRÁRIAS

Para concluir esse capítulo resta, agora, apresentar a Regra 4 e evidenciar a relação dela com as demais regras. Ou melhor, mostrar porque a Regra 4 é apenas um corolário da Regra 3. Para isso, será necessário fazer um breve sumário da seção anterior.

Na seção anterior vimos que o fundamento da Regra 3 é a simplicidade da natureza. Se natureza é simples, então é razoável supor que ela tenha ordem, padrões, que seja “consonante consigo mesma”, pois tem de ser estruturada com o menor número possível de princípios. Toda a diversidade de efeitos deve surgir de um número mínimo de causas fundamentais; toda a diversidade de processos deve surgir de um número mínimo de operações fundamentais; toda a diversidade de corpos deve surgir de um número mínimo de elementos fundamentais; toda diversidade propriedades deve surgir de um número mínimo de propriedades

⁵⁷² McGuire, 1995, p. 252, 254, 256; e Ducheyne, 2012, p.116.

fundamentais; e toda diversidade de leis deve surgir de um número mínimo de leis fundamentais. Assim, se um determinado fenômeno se repete sob certas circunstâncias é mais razoável supor, por simplicidade, que sempre ocorra do mesmo modo do que supor o contrário. Ou seja, se a natureza é simples, e todos os corpos no alcance dos experimentos apontam para uma determinada propriedade, deve-se considerar que essa qualidade pertence a todos os corpos universalmente, pois se assim não fosse a natureza poderia ser mais simples do que é.

Como também já mencionei, aqui não está em questão a validade lógica da indução. Não se trata de dizer que se um determinado fenômeno ocorre em $E_1, E_2, E_3, \dots E_{100}$, então devemos inferir, por uma necessidade lógica, que ocorre para todo e qualquer E . Trata-se de pensar: (1) a natureza é simples; (2) se a natureza é simples, há o menor número possível de leis e princípios na sua organização e funcionamento; (3) se há o menor número possível de leis e princípios na sua organização, todos os fenômenos que se apresentam aos nossos sentidos com semelhanças ou regularidades notáveis entre si devem ser produzidos por um único princípio (ou lei); (4) esse princípio deve se aplicar a todos os corpos universalmente; (5) se o princípio não se aplica a todos os corpos universalmente é porque na verdade é um princípio derivado, que decorre de outro ainda mais simples e mais amplo, que então se aplica a todos os corpos universalmente. Portanto, na prática, a melhor direção para a construção do conhecimento é admitir que um fenômeno que se repete para todos os corpos no alcance da experiência, por força da simplicidade da natureza, deve se aplicar a todos os corpos universalmente. E se eventualmente essa conclusão não continuar se mostrando verdadeira após a ampliação do campo da experiência, isso significará apenas que o princípio ou lei que então se considerava é um princípio *derivado*, e que há outro ainda mais universal do qual ele procede. A ampliação do campo da experiência, portanto, jamais falseia uma conclusão indutiva a partir do pressuposto da simplicidade da natureza, apenas a torna mais exata que antes.

Não é difícil perceber que a simplicidade da natureza justifica a aplicação prática da indução na construção do conhecimento. Não justifica a indução do ponto de vista lógico. Justifica o avanço do conhecimento pelo uso da indução, o que é coisa distinta. Uma vez que a natureza é simples, todo procedimento indutivo leva a uma conclusão pelo menos *aproximadamente verdadeira*, que poderá se tornar eventualmente mais exata pela ampliação do campo da experiência. Ora, esse é precisamente o conteúdo principal da Regra 4. Ela afirma:

Regra 4

Na filosofia experimental, as proposições formuladas por indução a partir dos fenômenos coletados devem ser consideradas como exatamente verdadeiras, ou aproximadamente verdadeiras, não obstante qualquer hipótese contrária, até que outros fenômenos tornem essas proposições ou mais exatas ou sujeitas a exceções.

573

A Regra 4 reafirma o que Newton já havia antecipado no “parênteses” da Regra 3. As “hipóteses”, ou as “fantasias inventadas aleatoriamente” não podem ser consideradas em um mesmo nível epistemológico que os conhecimentos “construídos a partir dos experimentos” e generalizados pela indução. Com efeito, somente esses últimos são *conhecimento*, rigorosamente falando. A Regra 4, portanto, é apenas um corolário da Regra 3. Ela também decorre da simplicidade da natureza.

Isso significa dizer que a Regra 4 não introduz um conceito novo, de “indução”, que estava ausente nas regras anteriores. Significa que ela apenas *nomeia* esse procedimento, que já estava subentendido previamente. Nesse sentido, a menção à “indução” na Regra 4 surgiria apenas de um amadurecimento e clarificação do entendimento de Newton acerca das suas regras anteriores. Todas as quatro regras sugerem um procedimento do tipo indutivo, e todas elas se fundamentam na simplicidade da natureza. Por essa razão, as observações de Newton nessa regra são totalmente pertinentes às discussões da seção anterior (12.1). Por exemplo, considere a sua observação sobre as “exceções”. A regra sugere que um *contraexemplo* não pode alterar as conclusões anteriormente estabelecidas pela indução. Eles devem ser considerados como “exceções”. Mais exatamente, a regra declara que qualquer novo “fenômeno” pode tornar “as proposições formuladas por indução” ou sujeitas a “exceções” ou ainda “mais exatas”. Mas como isso seria possível? Ora, à medida que as “exceções” forem aumentando, acumulam-se informações que podem levar a novas generalizações indutivas; e depois que essas novas generalizações se estabelecem as hierarquias de propriedades gerais se reorganizam, tornando as conclusões mais exatas.

Isso foi esclarecido na seção anterior, no exemplo dos “metais”. Inicialmente existia apenas um grande grupo dos metais, cuja propriedade de “alta condutividade elétrica” foi

⁵⁷³ Traduzido do latim. No original: “In philophia experimentalis propositiones ex phaenomenis per inductionem collectae, non obstantibus contrariis hypothesibus, pro veris aut accurate aut quam proxime haberi debent, donec alia occurrerint phaenomena, per quae aut accuratiores reddantur aut exceptionibus obnoxiae”. Na tradução do Cohen: “In experimental philosophy proposition gathered from phenomena by induction should be considered either exactly or very nearly true notwithstanding any contrary hypotheses, until yet other phenomena make such propositions either more exact or liable to exceptions”. (CW, p.796). Na tradução do Mote-Cajori: “In experimental philosophy we are to look upon propositions inferred by general induction from phenomena as accurately or very nearly true, notwithstanding any contrary hypotheses that may be imagined, till such time as other phenomena occur, by which they may either be made more accurate, or liable to exceptions”. (MC, p.400). Embora a Regra 4 seja formulada como um preceito metodológico, pelo que foi argumentado anteriormente é possível perceber que esse preceito surge e decorre igualmente da simplicidade da natureza e da Regra 3.

generalizada para todos os elementos do grupo. Encontrar uma exceção nesse grupo não altera essa conclusão, assim como encontrar um animal com as características dos mamíferos, mas que é ovíparo, em nada altera a conclusão geral de que os mamíferos não botam ovos. Essa exceção fica apenas registrada aguardando mais informações. Se com o avanço do campo da experiência surgirem muitos outros exemplares de animais ovíparos com características de mamíferos, surgirá uma nova subdivisão entre mamíferos: os mamíferos ovíparos e não-ovíparos. De modo semelhante ocorreria com os metais. Se a experiência releva vários exemplares de metais que não apresentam alta condutividade elétrica, uma outra classe de materiais surge, e a generalização anterior é reorganizada em metais e semimetais. Só uma nova generalização indutiva modificar uma generalização indutiva.

Interessante perceber nesse ponto que o fundamento da Regra 4 também não é metodológico. Aqui, o fundamento desse procedimento pouco tem a ver com um novo método da ciência. É também uma questão epistemológica. É a própria maneira como o nosso conhecimento cotidiano é construído. Não é assim que *deve ser*; é assim que *é*. Na construção espontânea do conhecimento nós simplesmente generalizamos e ignoramos os contraexemplos. A medida que se amplia o campo da experiência, ocorrendo o aumento das informações e contraexemplos, novas generalizações ocorrem, e eventualmente uma reorganização nas generalizações toma lugar, tornando as conclusões previamente estabelecidas “mais exatas”. Os mesmos motivos que nos levam a generalizar sem maiores escrúpulos os conhecimentos da experiência, também nos levam a ignorar qualquer contraexemplo até que outras induções possam fazer o conhecimento mais exato. Não é um preceito metodológico. O papel do filósofo não é formular outra maneira de se construir o conhecimento; ou uma maneira mais eficiente; é não se desviar da maneira natural pela qual o nosso conhecimento é espontaneamente construído. Quando muito, seu papel é acelerar esse processo.

Por essa razão uma “hipótese contrária” também não pode afetar as “proposições formuladas por indução”, como afirma a Regra 4. Como se mostrará em mais detalhes no capítulo 13, uma “hipótese” é precisamente uma proposição – particular ou geral – que não é formulada por indução a partir dos fenômenos. Pode até ser útil na investigação da natureza, mas não pode ser considerada no mesmo nível epistemológico que os conhecimentos construídos pela indução. Só este último é *conhecimento*, propriamente dito. O primeiro é uma suposição que pode levar eventualmente a um *conhecimento*, mas ainda não é; portanto não pode, jamais, substituir o que já está estabelecido.

As considerações anteriores nos levam a concluir que Newton tem motivos sólidos para enunciar a Regra 4. Como mencionei no início desse capítulo, frequentemente essa regra tem sido encarada como um mero subterfúgio de Newton para proteger a sua teoria dos críticos que apelavam para a hipótese dos vórtices em seu favor. No entanto, os parágrafos anteriores revelam que mesmo que a Regra 4 tenha sido incluída na terceira edição desencadeada pelo debate com os críticos, o seu conteúdo não foi formulado exclusivamente para esse propósito. Em outras palavras, o debate com os críticos não determinou o *conteúdo* da regra; pode ter sido apenas a *ocasião* para a sua explicitação. O seu conteúdo já poderia ser depreendido da simplicidade da natureza desde a primeira edição; e ainda mais claramente na Regra 3, na segunda edição. *Conhecimento* – para Newton – é aquilo que construído a partir da experiência e generalizado pela indução. Qualquer enunciado que não se enquadre nesses termos é qualquer outra coisa menos conhecimento, estritamente falando. E para qualquer um que levante a objeção de que esses “conhecimentos” obtidos pela indução podem se demonstrar falsos, Newton poderia responder dizendo que se a natureza simples e regular, toda e qualquer generalização indutiva é, ao menos, aproximadamente verdadeira, e conduz a um avanço gradativo do conhecimento a medida que se amplia o campo da experiência.⁵⁷⁴

Em suma, as quatro regras fazem parte de um único *todo* nos *Principia* de Newton. São princípios epistemológicos, mais do que tudo. Princípios que são expressos em forma de regras apenas em razão das exigências do método axiomático, que requer que se explicitem todas as inferências realizadas. E embora se possa argumentar que as quatro regras se fundamentam num princípio metafísico de simplicidade da natureza, como já mencionei antes, não me parece que esse ponto principal para Newton. Não é porque “a natureza é simples” que devemos construir o conhecimento dessa maneira. É porque construímos o conhecimento dessa maneira, e ele é válido, que a natureza é simples e a indução leva ao progresso do conhecimento. Por essa razão a gravidade universal deve ser aceita não obstante qualquer hipótese contrária que se lhe contraponha, ou mesmo qualquer fenômeno isolado que lhe seja contrário. Ela é um legítimo *conhecimento*, e qualquer nova informação a tornará, no máximo, *aproximadamente verdadeira*, caso essas novas informações se acumulem de modo a torná-la mais exata.

Agora estamos em condição de retornar a questão que foi levantada no final da seção anterior (12.1.3), sobre por quê Newton ter ficado o resto da vida tentando reduzir a gravidade universal para o *contato*. Mais claramente, se a gravidade universal foi obtida pela

⁵⁷⁴ Evidentemente esse ponto tem muitos desdobramentos interessantes. Mas eles são aprofundados apenas no volume II.

generalização indutiva a partir de fenômenos da experiência, porque Newton aparentemente se preocupou tanto em explicá-la em termos *mecânicos*, ou seja, reduzi-la ao contato? Esse comportamento não indicaria, mesmo veladamente, um possível compromisso de Newton com os pressupostos da filosofia mecânica? Ou será que esse comportamento indicaria tão somente uma busca natural pela inteligibilidade da sua teoria? Afinal, ele *realmente* procurou fazer isso, ou há uma outra forma de entender o seu comportamento?

Primeiramente, devo dizer que tenho muitas dúvidas quanto à possibilidade do princípio que estabelece que todas as operações entre os corpos na natureza ocorrem por meio do contato ser um princípio *metafísico*. Se todas as mudanças de movimento que observamos em todos os corpos no alcance da experiência ocorressem pelo *contato*, pela Regra 3 o *contato* deveria ser considerado uma *operação universal*. Ora, não é difícil perceber que esse deve ter sido o caso durante muito tempo, e para um contingente grande de pessoas, antes de se difundirem minimamente as manifestações magnéticas e elétricas e as investigações sobre esses fenômenos. Desse modo, é razoável admitir que durante algum tempo a operação entre corpos que nós chamamos de *contato* pode ter sido admitida como uma operação universal ou *fundamental*. Todas as mudanças na quantidade de movimento dos corpos são geradas pelo contato. E se aceitamos que as regras de Newton realmente procuram reproduzir a maneira como nós conhecemos espontaneamente, será razoável também admitir que qualquer contra-exemplo à essa generalização seria considerado e registrado puramente como uma “exceção”, aguardando um acúmulo maior de informações no futuro para uma possível reavaliação dessa conclusão. As eventuais manifestações e observações de fenômenos elétricos e magnéticos, portanto, não invalidariam a generalização anteriormente realizada para o *contato* como a operação universal e fundamental entre os corpos na natureza.

Mas suponha que à medida que se amplie ao longo do tempo o campo da experiência, se acumulem informações suficientes para que ocorram novas generalizações indutivas. Aqueles fenômenos magnéticos e elétricos que até então haviam sido considerados exceções, não apenas foram generalizados para toda uma classe geral de corpos, mas outro fenômeno semelhante foi observado, a “gravidade” (como *atração*). E essa gravidade é observada não somente em uma pequena quantidade de tipos de corpos (como no caso dos fenômenos magnéticos e elétricos), mas numa ampla extensão. Além disso, e mais importante, suponha que se tenha investigado todas as mudanças de movimento no alcance da experiência: aquelas produzidas por *percussões* (ou impactos entre corpos), aquelas produzidas pela *pressão* (ou pela interação entre um corpo sólido e um fluido), e aquelas produzidas pelos fenômenos elétricos, magnéticos e da gravidade. Considere que dessas investigações de todas as

interações entre corpos no alcance dos experimentos se tenha concluído há dois tipos de interações, cada um com um efeito bem distinto. O primeiro tipo de interação gera efeitos “impulsivos”, sendo esse efeito definido pela forma com a terceira lei do movimento se manifesta; o segundo tipo de interação gera efeitos “atrativos”, sendo esse efeito também definido pela manifestação da terceira lei.

Pois bem, nesse momento – somente nesse momento – com a ampliação do campo da experiência realizada pelas investigações acima, teriam se acumulado informações que possibilitariam uma reorganização da generalização anteriormente realizada para o *contato*. Os contra-exemplos deixariam de ter esse estatuto e se acomodariam à novas informações que produziriam novas generalizações. Somente nesse momento a conclusão anterior sobre o contato poderia se tornar, pela Regra 4, “mais exata” que antes. Mas ainda assim, haveriam aqui dois caminhos que Newton poderia seguir. O primeiro caminho seria admitir que o *contato* é uma interação de grande alcance na natureza, porém não é *universal*. Ou seja, a operação antes *universal* do *contato* deveria se tornar uma *operação geral de primeira ordem*, uma vez que haveria uma classe de operações em que a quantidade de movimento seria alterada sem a ocorrência do contato. O segundo caminho seria admitir que há dois tipos distintos de interação por contato, que geram efeitos diferentes.

Se houvesse uma dúvida razoável sobre a existência ou não do vácuo (que acredito que era o caso de Newton e muitos outros modernos), a interpretação desses experimentos proposta acima seria dificilmente concebida de imediato. Para Newton, Boyle e outros, o universo não era constituído de matéria e vácuo, mas de matéria e “éter”. O éter era um tipo de matéria muito mais sutil que os demais corpos (sólidos, líquidos ou gasosos). Um corpo sólido teria a sua densidade definida pela quantidade de matéria num determinado espaço preenchido de éter. Então, dois corpos interagindo sem um meio material que os ligasse, como por exemplo dois planetas gravitando, não significaria necessariamente que estariam interagindo através do espaço vazio. Significaria apenas que estão mediados unicamente pelo éter. Dessa perspectiva, portanto, a aplicação da Regra 4 no parágrafo anterior não levaria a conclusão imediata de que há dois tipos de interação, uma que ocorre por meio do *contato*, e outra que não. Em vez disso, levaria a conclusão que há possivelmente dois tipos distintos de interações *de contato*, uma por meio da interação da matéria com ela mesma, que produziria efeitos “impulsivos”, e outro por meio da matéria e do éter, que produziria efeitos “atrativos”. De qualquer maneira, não se poderia atribuir à interação com o éter os mesmos efeitos de turbilhões que se observavam em líquidos ou mesmo nas percussões, que produziam efeitos

“impulsivos”. A figura abaixo ajuda a esclarecer as duas possibilidades propostas nos parágrafos anteriores:

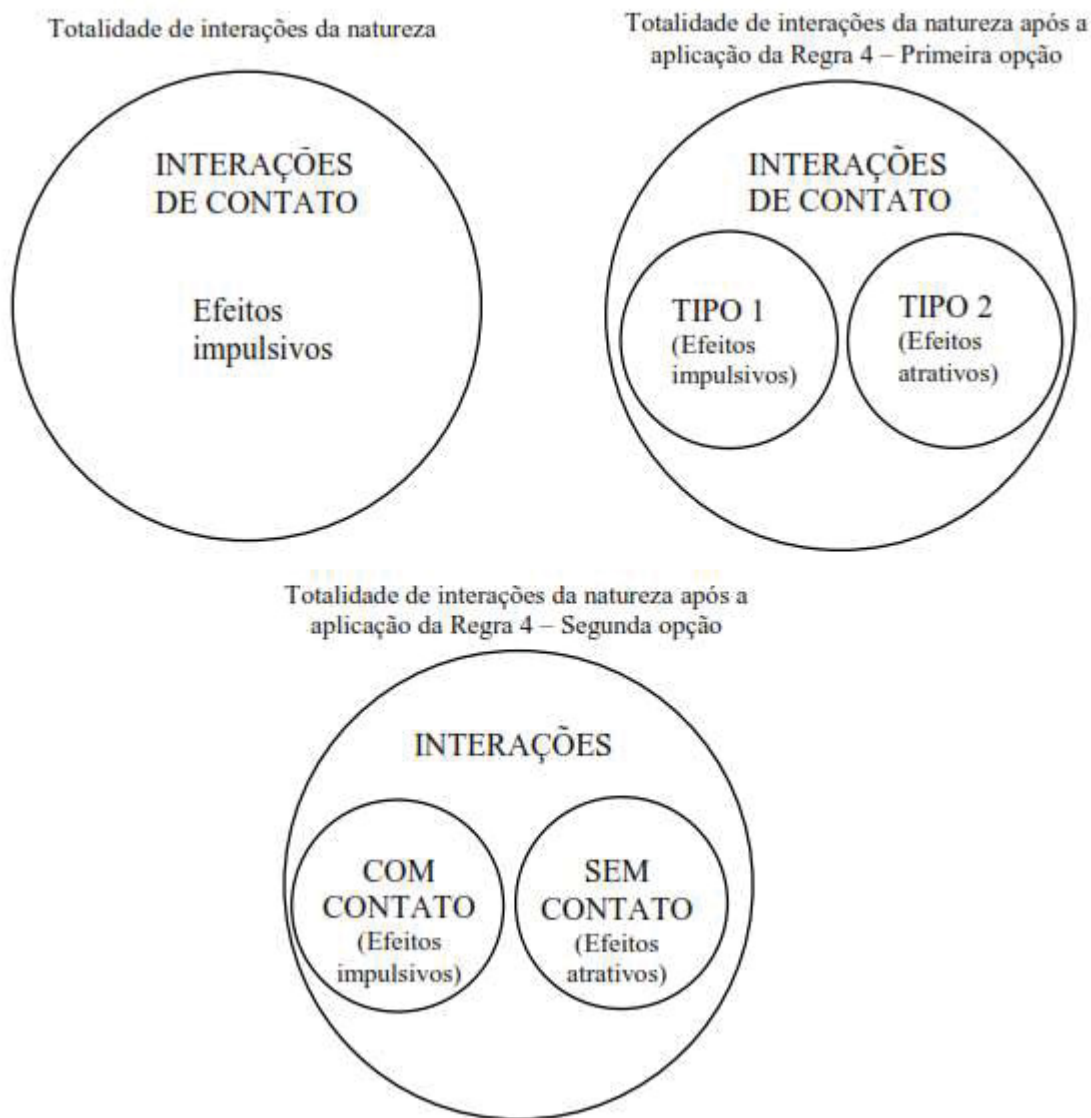


Figura 95 – Aplicação das Regras 3 e Regra 4 às interações da natureza
Fonte: o autor

Diante da dupla possibilidade de reformulação apresentada na figura acima, penso que Newton optou pela primeira. Alguém poderia se perguntar se ele teria optado pela primeira possibilidade porque estava comprometido com os pressupostos metafísicos da filosofia mecânica. Acredito que a essa altura já está claro que a resposta é não. A universalização das interações de contato, para Newton, teria sido obtida pela experiência e generalizada pela indução. Além disso, o próprio contato poderia ser explicado cabalmente com o apelo a propriedades ainda mais fundamentais da matéria, igualmente obtidas pela indução. Por exemplo, como afirmou Newton na Regra 3, a “mobilidade”, a “inércia” e a

“impenetrabilidade” são propriedades essenciais da matéria. Isso implica que cada elemento de matéria tem dois estados naturais, repouso ou movimento uniforme em linha reta. Implica também que se um elemento de matéria se move para o mesmo espaço que outro ocupa, pela propriedade essencial da impenetrabilidade, ocorrerá um choque entre a matéria, que alterará os seus estados naturais. O contato, portanto, ou melhor, a *percussão*, pode ser perfeitamente explicado pela sua redução a propriedades ainda mais elementares da matéria. À propósito, parece-me que esse é o sentido mais fundamental de uma “explicação”, razão pela qual seria também desejável reduzir todos os fenômenos ao *contato*. *Explicar* não seria necessariamente reduzir um fenômeno a um modelo *mecânico*; ou ainda reduzir ao *contato*. *Explicar* seria reduzir um fenômeno a uma operação mais elementar, ou a uma propriedade mais elementar. E explicar completamente seria reduzir um fenômeno às mais elementares propriedades da natureza. É possível perceber que isso ocorre com o contato. A interação entre corpos que conhecemos como “impacto”, “colisão”, ou “percussão” pode ser explicada em termos de propriedades essenciais da matéria como inércia e impenetrabilidade. Pode-se dizer, portanto, que o contato é completamente compreendido e pode ser satisfatoriamente explicado. É perfeitamente inteligível. Não é difícil perceber, entretanto, que o mesmo não ocorre o novo tipo de interação (de contato ou não) observada por Newton.

Basicamente, Newton percebeu que há interações entre corpos que não são geradas por percussão, que derivam da propriedade da impenetrabilidade. Esses tipos de interações devem estar fundados em outras propriedades essenciais da matéria. Mas quais? Sem que se consiga reduzir essa operação a propriedades mais elementares da matéria não se pode dizer que ela está explicada, ou mesmo compreendida perfeitamente. É por essa razão que o registro de um novo tipo de interação distinto das percussões não pode desfazer o *contato* como operação universal, que é uma operação solidamente fundamentada e completamente explicada. Antes de uma reorganização mais radical nas conclusões sobre as operações de contato deveria ser necessário minimamente uma *explicação* dessa interação que não deriva da propriedade conhecidas da matéria, e que é capaz de gerar um “efeito atrativo”. Antes de qualquer elaboração sobre isso, seria prematuro defender que há interações que ocorrem sem qualquer mediação de contato. Portanto, não me admira constatar que Newton passou o resto da sua vida tentando solucionar essa questão, ou seja, tentando encontrar uma resposta para o problema da “causa da gravidade”, ou como eu diria aqui, para o problema da explicação do “efeito atrativos” da gravidade.

Das considerações do parágrafo anterior se conclui que Newton não estaria tentando exatamente reduzir a gravidade ao *contato*, nos moldes que Descartes, Leibniz e outros

filósofos mecanistas faziam. Pelas regras de Newton, o *contato* deveria ser considerado uma operação universal. Isso era uma conclusão empírica e não um princípio metafísico. Mas pela ampliação das investigações ele conclui que nem todas as interações entre corpos são geradas por *percussão* e *pressão*, portanto ou há interações que não ocorrem por *contato* ou o *contato* não se resume somente a *percussão* e *pressão*, havendo outro tipo de interação por contato distinta dessas, que só poderia ser explicada por alguma propriedade ainda desconhecida do éter. Newton não estaria, portanto, tentando reduzir a gravidade ao *contato*, no sentido tradicional. *Contato*, para os modernos, se resumiria a *percussão* e *pressão*. Newton estava tentando investigar como poderia haver um outro tipo de interação por contato que não gerasse os efeitos conhecidos de *percussão* e *pressão*. Que gerasse “efeitos atrativos”. Aparentemente, o melhor palpite de Newton foi que isso era gerado por alguma propriedade elástica do éter.⁵⁷⁵

Parece-me que é precisamente nesse ponto que reside o desacordo entre o mecanicismo de Newton, por um lado, e de Descartes e Leibniz por outro. O desacordo não estava em que Descartes, Leibniz, entre outros exigiam o *contato* em todas as interações e Newton não exigia; com efeito, ao que parece eles defendiam que os únicos tipos de interação na natureza eram as *percussões*, ao passo nos *Principia* Newton procurou mostrar que haviam também a *pressão* e as *atrações*. A *pressão* e a *percussão* poderiam ser compreendidas como faces de uma única operação, mas a *atração* não poderia. Eventualmente, a gravidade poderia perfeitamente ser explicada pelo éter, mas essa substância definitivamente não poderia ter as propriedades de um vórtice como descritas por Descartes. Mas os filósofos continentais, por outro lado, exigiam que tal interação atrativa distinta das *percussões* fosse explicada como o era o *contato*; caso contrário seria ininteligível, obscura, e não consistia em explicação alguma. Para Newton, no entanto, as regras do conhecimento não fazem essa exigência. Uma generalização indutiva retirada dos fenômenos simplesmente tem que ser aceita, quer saibamos explicá-la ou não; quer hajam hipóteses contrárias ou não. Até porque ela não é absoluta; novas informações a tornariam necessariamente mais exata.

Não está necessariamente em tensão, portanto, a conclusão de Newton da gravidade universal pela aplicação da Regra 3 e a tentativa de conciliar essa conclusão com o princípio do *contato*. Muito pelo contrário, esse é o caminho mais indicado pela Regra 4. Mas só é possível chegar nesse entendimento pela compreensão que as interações de *contato* concebidas como operações universais não se constituem num princípio metafísico, mas numa

⁵⁷⁵ Veja mais sobre isso na seção “Escólio Final” do APÊNDICE C.

generalização empírica que poderia ser obtida perfeitamente pela Regra 3. Além disso, convém notar que a Regra 4 não permite que se cristalizem as conclusões de Newton sobre a gravidade universal. O aumento do campo da experiência poderia levar a novas reorganizações das conclusões, que inclusive poderiam culminar na conclusão da gravidade universal como uma operação entre corpos que não envolve qualquer tipo de contato, como de fato foi defendido pelas gerações seguintes. Newton, no entanto, não poderia antecipar essa conclusão. Isso violaria a Regra 4.

Terminada essa análise das *Regulae* de Newton, importa agora dizer que vários termos e conceitos apresentados nessa seção ficaram propositamente vagos, carecendo de um desenvolvimento mais adequado. O leitor poderia com razão questionar o que Newton entende exatamente por termos como “fenômeno”, “experiência”, “experimentos”, “hipótese”, etc. Sem o esclarecimento mais preciso desses conceitos seria difícil assumir sem reservas a leitura das regras aqui proposta. Esses conceitos e termos se esclarecerão no próximo capítulo, onde se examinará a filosofia que fundamenta os *Principia*: a assim chamada “filosofia experimental”. Analisarei essa filosofia juntamente com a apresentação do texto mais famoso da segunda edição: o *Escólio Geral*.

13 O ESCÓLIO GERAL E A FILOSOFIA EXPERIMENTAL

O Escólio Geral é um texto de cerca de cinco páginas que foi introduzido como conclusão dos *Principia*, 26 anos depois da sua primeira publicação, por ocasião da segunda edição. Esse texto pode ser dividido em seis parágrafos.⁵⁷⁶ Interessa-nos aqui apenas um desses parágrafos, em que Newton apresenta alguns comentários sobre o seu método de filosofar. No entanto, oferecerei inicialmente um panorama dos seis parágrafos para que o leitor tenha uma noção geral do conteúdo das considerações tecidas nesse texto conclusivo, e em seguida volto a minha atenção ao parágrafo no qual se introduz os referidos comentários metodológicos.

No primeiro parágrafo do Escólio Geral, Newton reafirma a conclusão sobre a hipótese dos vórtices no final do Livro II. Os vórtices são matematicamente incompatíveis com os fenômenos astronômicos. Não é possível conceber um sistema de vórtices que obedeça a regra das áreas e dos períodos de Kepler.⁵⁷⁷ Todavia um novo argumento é acrescentado em razão do que foi desenvolvido na etapa da *síntese* do Livro III. Acerca do argumento final do Livro II, alguém ainda poderia contestar que as órbitas planetárias são muito próximas de órbitas circulares e, portanto, não se poderia ter tanta certeza da ocorrência dessas regras nos movimentos planetários. No entanto, se havia qualquer dúvida sobre isso, o estudo sobre os cometas no Livro III eliminou todas elas. A órbita dos cometas são extremamente excêntricas, cruzando “muito suavemente e muito facilmente através das órbitas dos planetas”, e nada obstante, seus movimentos continuam com notáveis regularidades, sem qualquer perturbação dos supostos vórtices, obedecendo precisamente às leis previamente estabelecidas. A conclusão de Newton é que um movimento assim jamais poderia ocorrer, “a não ser que os vórtices sejam eliminados”.⁵⁷⁸ Portanto, tanto os planetas quanto os cometas se movem do modo observado em razão da “lei da gravidade”. A hipótese dos vórtices é totalmente incompatível com os fenômenos astronômicos.

Por outro lado, no segundo parágrafo Newton afirma que a lei da gravidade não é incompatível com a suposição de que cada “estrela fixa” seja o centro de um sistema planetário semelhante ao nosso. Essa observação parece lidar com uma objeção que poderia ser levantada para o princípio da gravidade por aqueles que acreditavam que as estrelas fixas são semelhantes ao Sol, e consistem em sistemas planetários semelhantes ao nosso. Essa

⁵⁷⁶ Os “parágrafos” que me refiro aqui são divisões temáticas que não necessariamente seguem os parágrafos do texto.

⁵⁷⁷ Veja o APÊNDICE B acompanhar o argumento de Newton sobre isso.

⁵⁷⁸ CW, p.939.

objeção poderia ser resumida na pergunta: se é verdade que há uma força da gravidade entre todos os corpos, porque as estrelas estão em repouso, e “não caem uma em direção a outra”?⁵⁷⁹ A resposta de Newton nesse parágrafo afirma que as estrelas chamadas fixas estão a imensas distâncias entre si, e pela lei da gravidade (proporcional ao inverso do quadrado da distância) não se deveria mesmo esperar que tal suposto fenômeno ocorresse. A “lei da gravidade”, portanto, *não é* incompatível com a suposição que as estrelas fixas sejam centros de sistemas como o nosso, e a objeção acima não pode ser levantada contra ela.

No terceiro parágrafo Newton afirma que o nosso sistema planetário (assim como possivelmente outros semelhantes) “não poderia ter surgido sem o plano e domínio de um poderoso e inteligente ser”. Esse parágrafo não é uma mera declaração de fé. Pouco antes de apresentá-lo se esclarece que a lei da gravidade explica como os planetas são *mantidos* nos seus movimentos, mas não explica como chegaram a esses movimentos. Os planetas se movem todos em uma mesma direção e quase no mesmo plano; os satélites de Júpiter e Saturno também se movem na mesma direção e quase no mesmo plano. Na seção 11 se mostrou que dadas certas condições iniciais os planetas podem persistir em órbitas estáveis por uma determinada lei de atração, mas nada é informado acerca de como os planetas podem ter adquirido tais condições iniciais.⁵⁸⁰ Nenhum desses fenômenos é explicado pela lei da gravidade. Ela apenas informa como os planetas se mantêm em seus movimentos. Diferentemente da hipótese dos vórtices, que fornecia uma explicação para esses fenômenos. No entanto, a hipótese dos vórtices foi eliminada. Assim, na ausência de uma possibilidade de explicação não resta alternativa a não ser admitir que esses fenômenos tenham surgido da arquitetura do *mecânico do universo*, ou do “plano e domínio de um poderoso e inteligente ser”, do “*dominus deus Παντοκράτωρ [Pantokrator]*”, o *Legislador Universal*, aquele que “governa todas as coisas”.⁵⁸¹

A partir da conclusão acima, inicia-se, no quarto parágrafo, uma série de considerações sobre esse ser todo-poderoso. A maior parte do escólio se desenvolve nessas considerações. Mas talvez elas possam ser resumidas na conclusão de que nada podemos conhecer acerca das substâncias das coisas, e assim muito menos podemos conhecer da substância de Deus. Conhecemos a Deus apenas pelas suas “propriedades e atributos”; e “pela sua sábia e perfeita construção das coisas e causas finais”.⁵⁸² Isso é tudo o que podemos conhecer e falar propriamente sobre ele. E, portanto, conhecer a Deus por meio da perfeita

⁵⁷⁹ Ibid, p.940.

⁵⁸⁰ Veja o APÊNDICE C.

⁵⁸¹ Ibid.

⁵⁸² CW, p.942.

construção das coisas também é tema da filosofia natural; porque “tratar de Deus a partir dos fenômenos é certamente parte da filosofia natural”. É difícil compreender as ligações exatas que Newton está estabelecendo aqui, mas vale a pena ao menos fazer uma tentativa. A lei da gravidade explica apenas uma parte do mundo; explica porque os planetas se mantêm regularmente em seus movimentos. A questão acerca de como surgiram esses movimentos é atribuída ao plano do Criador. Mas se tratamos do próprio Criador em nossa filosofia, nada podemos dizer certamente acerca da sua substância (como muitos filósofos procuram fazer). No máximo, poderíamos considerar as suas propriedades e as suas construções. Parece que Newton está dizendo que entrar em especulações sobre a natureza de Deus não é o caminho, nem para conhecer o mundo, nem para conhecer o Criador. É preciso persistir a investigação a partir dos fenômenos.

No entanto, a investigação empreendida nos *Principia* a partir dos fenômenos não pôde, ainda, determinar as causas finais. É isso que Newton desenvolve no quinto parágrafo do escólio. Ele afirma que explicou “o fenômeno dos céus e do mar pela força da gravidade”, mas que ainda não conseguiu estabelecer a “causa da gravidade”. Sem dúvida, esse é o parágrafo mais conhecido dos *Principia*. Na verdade é uma das passagens mais famosas da história da ciência. É praticamente um dever citá-la aqui:

Até aqui expliquei o fenômeno dos céus e do nosso mar pela força da gravidade, mas ainda não estabeleci a causa da gravidade. (...) Ainda não fui capaz de deduzir dos fenômenos a razão para essas propriedades da gravidade, e não invento hipóteses. Porque o que quer que não seja deduzido dos fenômenos deve ser chamado de *hipótese*; e hipóteses, quer metafísicas, quer físicas, quer de qualidades ocultas, quer mecânicas, não têm lugar na *filosofia experimental*. Nessa filosofia, as proposições são deduzidas a partir dos fenômenos e tornadas gerais pela indução. A impenetrabilidade, mobilidade e o impetus dos corpos, e as leis do movimento, e a lei da gravidade foram encontradas por esse método. E é suficiente que a gravidade realmente exista, e aja de acordo com as leis que estabelecemos, e que baste para explicar todos os movimentos dos corpos celestes e do nosso mar.⁵⁸³

É nessa passagem que se encontra o famoso pronunciamento “*hypotheses non fingo*” (“não invento hipóteses”), que tanta polêmica causou ao longo da história da ciência. Mas não antecipemos a discussão metodológica acerca dessa passagem. Inicialmente, esse parágrafo

⁵⁸³ CW, p. 943. Grifos do Newton. No original: Hactenus phaenomena caelorum & maris nostri per vim gravitatis exposui, sed causam gravitatis nondum assignavi (...). Rationem vero harum gravitatis proprietatum ex phaenomenis nondum potui deducere, & hypotheses non fingo. Quicquid enim ex phaenomenis non deducitur, *hypothesis* vocanda est; & hypotheses seu metaphysicae, seu physicae, seu qualitatum occultarum, seu mechanicae, in *philosophia experimental* locum non habent. In hac philosophia propositiones deducuntur ex phaenomenis, & redduntur generales per inductionem. Sic impenetrabilitas, mobilitas & impetus corporum & leges motuum & gravitatis innotuerunt. Et satis est quod gravitas revera existat, & agat secundum leges a nobis expositas, & ad corporum caelestium & maris nostri motus omnes sufficiat”.

parece apenas complementar as discussões anteriores sobre Deus. Sabemos como os planetas se mantêm em seus movimentos, mas não como chegaram a adquirir as condições em que se encontram. Certamente isso ocorreu pelo plano e domínio do arquiteto do mundo. Mas ingressar em especulações sobre a substância de Deus parece não ser o caminho nem para conhecer a Deus, nem para conhecer o mundo. É preciso persistir na investigação dos fenômenos até chegar às causas finais. E Newton, não obstante, admite que ainda não conseguiu determinar a “causa final”, qual seja, a “causa da gravidade”. Como ele afirma na parte que omiti desse parágrafo, a força da gravidade é tal que penetra até o centro dos planetas, e é proporcional à “quantidade da matéria sólida” dos corpos, surgindo das suas “partículas individuais”.⁵⁸⁴ Acerca da causa dessas propriedades, no entanto, ele não foi capaz de deduzi-las a partir dos fenômenos. Portanto, as suas conclusões sobre o tema devem ser encerradas nesse ponto.

No sexto e último parágrafo, Newton fornece a indicação de um caminho para a investigação da causa da gravidade. Ele se refere a um “certo espírito muito sutil permeando os corpos brutos e neles permanecendo oculto”. Na sequência do parágrafo se esclarece que esse “espírito” ao qual Newton se refere são os fenômenos elétricos que ocorrem em “corpos eletrificados” (“*corpora electrica*”). Na proposição 6 do Livro III ele já havia eliminado a possibilidade da gravidade ser gerada por fenômenos magnéticos. Restava ainda investigar se eventualmente poderia ser gerada por fenômenos elétricos. Mas o escólio se encerra com a afirmação de que “não há um número suficiente de experimentos para determinar e demonstrar exatamente as leis que governam as ações desse espírito”.⁵⁸⁵

Realizada essa apresentação panorâmica do Escólio Geral, podemos agora nos concentrar nos pronunciamentos metodológicos de Newton, que podem ser resumidos no famoso parágrafo citado acima.

13.1 A DEDUÇÃO A PARTIR DOS FENÔMENOS

No quinto parágrafo do Escólio Geral, Newton é bastante enfático em afirmar que ele “não inventa hipóteses”, porque na “*filosofia experimental* as proposições são deduzidas dos fenômenos e tornadas gerais pela indução”. É desnecessário dizer o quanto essa passagem foi discutida e rediscutida nos 300 anos desde a publicação da segunda edição dos *Principia*. Aqui não pretendo fazer uma exegese dessa passagem, como muitos já fizeram, e tampouco

⁵⁸⁴ Ibid.

⁵⁸⁵ Ibid, p.944.

uma apresentação das várias interpretações propostas ao longo do tempo. Pretendo apenas oferecer a conclusão natural que se segue da leitura particular dos *Principia* que foi apresentada nesse trabalho. Após todo o percurso da obra exposto nos capítulos anteriores, pode-se perceber (1) que essas palavras de fato são coerentes com o programa de Newton nos *Principia*; e (2) que os elementos destacados nessas palavras pouco informam acerca dos aspectos mais originais da metodologia dos *Principia*, estando mais ligadas ao objetivo de esclarecer a “filosofia experimental” subjacente a esse tratado. Vejamos inicialmente o primeiro ponto.

As últimas sentenças do Escólio Geral realmente são coerentes com o que Newton desenvolveu nos *Principia*? Mais exatamente, o procedimento de Newton ao longo dos *Principia* é coerente com a sua descrição que “nessa filosofia as proposições são deduzidas a partir dos fenômenos e tornadas gerais pela indução”?

Acerca disso vale lembrar as difundidas críticas de alguns reconhecidos filósofos da ciência do fim do séc. XIX e início do séc. XX, como Pierre Duhem, Karl Popper, Imre Lakatos e Paul Feyrabend, que afirmaram que o princípio da gravitação não poderia ser obtido a partir dos fenômenos de Kepler, nem por dedução e nem indução.⁵⁸⁶ Vale lembrar também as reservas de alguns historiadores da ciência, como Cohen, que sugeriu que o vocabulário metodológico de Newton era vago e inconsistente, e Laudan, que afirmou que várias de suas declarações foram “concebidas de maneira apenas casual e às vezes expressas de forma até grosseira”.⁵⁸⁷ Por fim, importa também lembrar que os próprios tradutores dos *Principia* às vezes tenderam a relativizar a expressão “dedução dos fenômenos”, como na primeira versão para inglês em que Andrew Mote ao menos em uma ocorrência traduziu o verbo “deduzir” (“*deducere*”) como “inferir”, preferência que também foi seguida por vários comentadores de Newton desde então.⁵⁸⁸

Acredito que as polêmicas e dificuldades de compreensão referidas acima surgem, em parte, de se interpretar os pronunciamentos de Newton fora do contexto da tradição ariostotélica-euclidiana das ciências demonstrativas da qual os *Principia* emergiram; em parte, devido a mudanças terminológicas que ele próprio introduziu nessa tradição, e, por fim, por se ignorar o contexto específico da “filosofia experimental” na Inglaterra naquele período.

⁵⁸⁶ Veja Ducheyne, 2012, p.xiv.

⁵⁸⁷ Laudan, 2000, p.43. Laudan também reconheceu que uma das principais questões sobre método de Newton é compreender “o que pretendia ele dizer quando falava em ‘deduzir’ (ou, às vezes, em ‘induzir’) as leis a partir dos fenômenos”. Laudan, 2000, p.44.

⁵⁸⁸ Veja, por exemplo, Harper, 2011. O capítulo 3 do seu livro é intitulado “inferências a partir dos fenômenos”.

Para compreender a expressão “dedução dos fenômenos”, em primeiro lugar precisamos nos perguntar o que Newton entendia por “fenômeno”. Do presente estudo dos *Principia* é possível perceber que o entendimento de Newton sobre os “fenômenos” é mais amplo que apenas os enunciados astronômicos. Por exemplo, enunciados sobre a queda dos corpos, sobre os pêndulos, sobre as atrações magnéticas, sobre o movimentos dos corpos em fluidos, todos são incluídos nos *Principia* sob a designação de “fenômenos”. Mais exatamente, os fenômenos seriam simplesmente enunciados que consensualmente podem ser admitidos como estando de acordo com a experiência. Ou de um modo mais alinhado com a linguagem de Newton, os fenômenos são enunciados que podem ser “provados” por meio de “experimentos”.⁵⁸⁹

Aqui cabe enfatizar que não se trata de uma terminologia que foi inventada pelo matemático britânico. O termo “fenômeno” já era empregado num sentido semelhante pelo menos desde Francis Bacon, e é possível percebê-lo nitidamente nos trabalhos de Boyle e Hooke.⁵⁹⁰ Estava estreitamente ligado à “filosofia experimental” e ao baconianismo na Inglaterra moderna. E aqui cabem algumas observações sobre isso.

A chamada “filosofia experimental” na Inglaterra estava ligada menos a “experimentos”, no sentido que nós os entendemos hoje, do que ao “empírico”, ou com à “experiência”.⁵⁹¹ Peter Anstey chegou a associar a filosofia experimental com o surgimento do empirismo inglês.⁵⁹² Essa filosofia surgiu com o fortalecimento das artes mecânicas no fim da idade média e início da modernidade, e com a consolidação de um ideal de manipulação da

⁵⁸⁹ Aqui faço uma caracterização dos “fenômenos” a partir da prática de Newton nos *Principia*, não a partir da sua retórica. Shapiro, por outro lado, procurou compreender o que Newton entendia por “fenômenos” a partir da sua retórica, dos seus comentários e cartas. As conclusões, no entanto, são semelhantes nos dois casos. Veja Shapiro, 2004.

⁵⁹⁰ Shapiro (2004) argumenta que a filosofia experimental que Newton apresenta no Escólio Geral é bastante distinta daquelas de Boyle e Hooke. Ele argumenta que para Boyle, Hooke, Huygens, entre outros, “filosofia experimental” era praticamente sinônimo de “filosofia mecânica”. E no Escólio Geral é notável que Newton usa a “filosofia experimental” para justificar a falta de fundamento “mecânico” da gravidade universal. No entanto acho difícil endossar a sugestão de Shapiro. A filosofia experimental tem suas origens na Inglaterra pelo menos desde Roger Bacon e já no fim do séc. XVI, com Francis Bacon e Galileu, ela possui contornos filosóficos e práticos bastante nítidos de um compromisso com aquilo que podemos chamar de “experiência sensível” ou “evidências empíricas” ou alguma expressão semelhante. Na *Grande Instauração* Bacon já dizia “The Office of the sense shall be the only judge of the experiment, and (...) the experiment itself shall judge of the thing”. Bacon, 1960, p.22. E é desnecessário dizer o quanto Boyle, Hooke, Henry Power, e vários outros filósofos naturais ingleses estavam sob a influência do grande patrono da *Royal Society*. Embora pudessem eventualmente relacionar a filosofia experimental com a filosofia mecânica, dificilmente a filosofia experimental desses pensadores ingleses poderia ser associada com a filosofia mecânica do continente, como aquela de Descartes e Leibniz. É verdade que no *Novum Organum* Bacon chamou várias vezes a filosofia experimental de “filosofia mecânica”, mas a relação estabelecida era com os experimentos das “artes mecânicas” e não com o entendimento de filosofia mecânica como a de Descartes ou Leibniz. Veja mais sobre isso veja em Kargon, 1971. Sobre o uso do termo “fenômeno” consulte Hooke, 1705; e Boyle, 1744.

⁵⁹¹ Kargon, 1971; Anstey, 2005; Shapiro, 2004.

⁵⁹² Anstey, 2005.

natureza na construção do conhecimento sobre o mundo natural.⁵⁹³ Por conseguinte, ela nunca esteve propriamente desvinculada de “experimentos” (no sentido que os entendemos hoje), mas ao se estabelecer como uma filosofia, incorporou a aspiração de uma nova ciência natural com critérios solidamente empiristas. Na *Grande Instauração*, por exemplo, lemos Francis Bacon várias vezes reforçar os seus objetivos de reformar a filosofia natural corrompida pelos “ídolos” por meio de uma investigação metódica da natureza subordinada à experiência e a experimentos com objetivo determinado, e realizados de maneira sistemática.⁵⁹⁴ Essa filosofia estava presente desde a fundação da *Royal Society* na década de 1660 e era seguramente a filosofia dominante não apenas entre os seus membros, mas entre os praticantes da filosofia natural na Inglaterra. Newton, evidentemente, fazia parte do seu campo de influência, e foi um dos seus principais defensores.⁵⁹⁵

Assim, a filosofia experimental era um movimento de pressupostos notavelmente empiristas em que não havia uma terminologia muito definida para designar a “experiência”, frequentemente sendo chamada por expressões como “fenômenos” ou “experimentos”.⁵⁹⁶ Para um filósofo experimental, um “fenômeno” era simplesmente um conhecimento que está dado imediatamente na experiência, ou, mesmo quando não é imediatamente dado, pode ser admitido por qualquer pessoa pela reprodução precisa de algum procedimento ou experimento (no sentido de hoje).⁵⁹⁷ Mas na maior parte dos casos “fenômenos” significava meramente “observações” ou a experiência obtida pelos sentidos. No caso específico de Newton, os seus manuscritos não deixam dúvidas de que o sentido por ele empregado não possuía diferenças significativas do sentido corrente entre os filósofos experimentais da sua época. Num rascunho para a questão 23 da *Óptica*, por exemplo, ele escreveu que “o objetivo da filosofia experimental é encontrar apenas pela *experiência e observação* ~~não como as coisas são~~

⁵⁹³ Essa relação é reiterada repetidas vezes no *Novum Organum* (1620), de Bacon.

⁵⁹⁴ “Toda verdadeira interpretação da natureza se cumpre com instâncias e experimentos oportunos e adequados, nos quais o ofício dos sentidos deve ser um único juiz do experimento, e o próprio experimento julga a natureza e a própria coisa” (*Novum Organum*, Livro I, Aforismo 50). “A melhor demonstração é de longe, a experiência, desde que se atenha rigorosamente ao experimento. Se procuramos aplicá-la a outros fatos tidos por semelhantes, a não ser que se proceda de forma correta e metódica, é falaciosa” (*Novum Organum*, Livro I, 70). “Os fundamentos da experiência — já que a ela sempre retomamos — até agora ou foram nulos ou foram muito inseguros. Até agora não se buscaram nem se recolheram coleções de fatos particulares, em número, gênero ou em exatidão, capazes de informar de algum modo o intelecto” (*Novum Organum*, Livro I, Aforismo 98). Veja também os aforismos 99 e 100. Bacon, 2002.

⁵⁹⁵ Shapiro (2004) tenta traçar uma descontinuidade entre a filosofia experimental de Boyle e Hooke e a filosofia experimental de Newton, mas a sua tese não se sustenta diante do estudo de Anstey (2005).

⁵⁹⁶ Muitos desses termos eram usados de forma um tanto vaga. Ver Anstey (2005) sobre isso.

⁵⁹⁷ Os filósofos experimentais descreviam em detalhes os seus experimentos e materiais utilizados para que os experimentos pudessem ser reproduzidos por qualquer pessoa. Um dos problemas da filosofia experimental dos séc. XVII era a reprodução exata de um experimento. Se outros filósofos não conseguissem obter os mesmos resultados a conclusão afirmada não era admitida como um “fenômeno”.

erçadas mas o que é o presente quadro da natureza”.⁵⁹⁸ Em outro rascunho para questão 31 Newton chega a oferecer uma definição de “fenômeno”:

Definição 1

Chamo de fenômeno qualquer coisa que possa ser percebida, tanto coisas externas que se tornam conhecidas pelos cinco sentidos, quanto coisas internas que nós contemplamos em nossas mentes pelo pensamento. Como o fogo é quente, a água é molhada, o ouro é pesado, o Sol é luminoso, *eu penso, eu existo* [*ego cogito ergo sum*]. Todas essas são coisas sensíveis e podem ser chamadas de fenômenos num sentido mais amplo (...).⁵⁹⁹

Essas passagens já bastam para deixar claro o entendimento de Newton para o termo “fenômenos”. Baseando-se somente por essas palavras poderíamos ser levados a pensar que os fenômenos são somente os enunciados derivados da experiência *imediata*, mas à luz do que foi exposto anteriormente fica manifesto que também podem se tratar de enunciados bem mais elaborados como, por exemplo, aqueles provenientes de *experimentos* (no sentido de hoje), ou provenientes *leis fenomênicas*, ou seja, da matematização de regularidades observadas na natureza, como no caso das regras de Kepler e das regras das colisões, ou ainda, dados obtidos pela mediação de teoria, como é o caso do tempo da queda dos corpos obtido pelo pêndulo de Huygens.⁶⁰⁰ De fato, a flexibilidade de Newton para os enunciados que chama de “fenômenos” é bastante ampla, mas o que todos têm em comum é rígido fundamento empírico.

Está sumariamente esclarecido, portanto, o que Newton quer dizer com “fenômenos” na referida sentença do Escólio Geral. De maneira genérica, era um termo comum na tradição da filosofia experimental inglesa, e estava relacionado com enunciados que seguramente poderiam ser considerados de acordo com a experiência. Mas e quanto à expressão “dedução a partir dos fenômenos”? O que Newton pretendia dizer com ela?

⁵⁹⁸ CUL, MS Add. 3970, f. 243r., apud Shapiro, 2004. Grifos meus. A parte riscada foi cancelada por Newton no manuscrito. Em outro trecho ele também diz: “nem estamos aqui para considerar princípios metafísicos a não ser que na medida em que eles estejam fundados na experiência. Porque toda metafísica que não é fundada na experiência é hipotética: e na medida em que as proposições metafísicas estejam fundadas sobre a experiência elas são parte da filosofia experimental” (CUL, MS Add. 3970, f.621v, apud Shapiro, 2004).

⁵⁹⁹ MS Add.3965, f. 422v, apud McGuire, 1966, p. 238-239.

⁶⁰⁰ Harper (2011) chamou esse último tipo de fenômeno de “theory-mediated measurements”. Ele considerou também as leis de Kepler e a determinação das massas dos planetas pela teoria da gravidade exemplos de medições mediadas pela teoria. Esse procedimento muitas vezes permite uma obtenção muito mais exata de dados do que pela experiência direta. Esse é o caso da mensuração do tempo de 1 segundo de queda com o pêndulo de Huygens. A admissão das Regras de Kepler e dos dados de Huygens como “fenômenos”, ou talvez os principais fenômenos dos *Principia*, mostram a perspicácia e a capacidade intuitiva de Newton em avaliar a confiabilidade e a exatidão dos dados que dispunha. Ele mostrou a mesma perspicácia em perceber que os dados de James Pound para os raios dos satélites de Júpiter eram superiores aos demais dados da época.

Em primeiro lugar, a expressão “dedução a partir dos fenômenos” (“*deducuntur ex phaenomenis*”) está relacionada com o ideal de construção de uma filosofia natural demonstrativa entre os filósofos experimentais na Inglaterra após a década de 1650. Nesse período os filósofos experimentais poderiam ser divididos, grosso modo, em dois grupos. Os *probabilistas*, e aqueles que mantinham a crença na possibilidade de uma filosofia natural demonstrativa, dentre os quais Newton se alinhava.⁶⁰¹ Com efeito, a filosofia experimental surgiu, aparentemente, com um objetivo de construir uma filosofia natural mais segura. A própria rejeição desses filósofos por “especulações vazias”, buscando somente o que pode ser “confirmado”, ou “provado” pela experiência denuncia um projeto de se construir um conhecimento mais seguro, que poderia ser “demonstrado” pela experiência. Mas é claro que a medida que se tentou empreender esse projeto logo se deve ter evidenciado que haviam muitas dificuldades envolvidas. Dificuldades relacionadas à percepção da experiência, à reprodução de experimentos, à linguagem na tradução da experiência para enunciados, entre outras. O ideal de uma filosofia natural demonstrativa fundada na experiência deve ter se esmaecido entre os filósofos experimentais ingleses que passaram a aderir a alguma forma de *probabilismo*, com critérios mais flexíveis. Contudo, alguns desses filósofos aparentemente persistiram com a crença na possibilidade de sustentar o projeto de uma filosofia natural demonstrativa. A matemática seria a solução. Ela seria uma linguagem suficientemente precisa para superar as dificuldades que infestavam esse projeto. Portanto, quando Newton usa a expressão “dedução a partir dos fenômenos”, a utilização do verbo “deduzir” (*deducere*) evidencia que ele não era apenas um filósofo experimental, mas um filósofo experimental alinhado a uma classe mais restrita e minoritária – até de certo modo *demodé* – que ainda nutria a esperança na possibilidade da construção de uma filosofia natural exata e demonstrativa.⁶⁰²

Em segundo lugar, a expressão “dedução a partir dos fenômenos” está relacionada com a maneira particular pela qual Newton pôs em prática o projeto de uma filosofia natural demonstrativa, fundindo a matemática e os métodos matemáticos com os princípios da filosofia experimental. Analisando o percurso principalmente do Livro III dos *Principia* é possível concluir que Newton empregou na filosofia natural de orientação “experimental” os preceitos das ciências demonstrativas desenvolvidos nos *Analíticos* de Aristóteles (especialmente nos *Segundos Analíticos*), tendo como exemplo paradigmático os *Elementos*

⁶⁰¹ Veja Anstey, 2005; Guicciardini, 2009.

⁶⁰² Esse ponto é evidenciado pelos primeiros trabalhos de Newton na década de 1670. Voltarei a isso mais adiante.

de Euclides. Assim, a expressão *deducuntur ex phaenomenis* se refere mais exatamente à aplicação do “método axiomático” tomando como ponto de partida, ou como “princípios”, os “fenômenos” da filosofia experimental. No caso específico dos *Principia*, os principais fenômenos mobilizados seriam os enunciados astronômicos do início do Livro III e as “leis do movimento” (com os teoremas delas derivados). Da perspectiva dos “fenômenos” que se desenvolveu mais acima, não é difícil perceber que as regras das colisões entre os corpos que deram origem às leis do movimento estão incluídas nessa caracterização e, portanto, as próprias “leis do movimento”, se não podem ser consideradas como “fenômenos”, devem ao menos serem consideradas como “deduzidas a partir dos fenômenos”.⁶⁰³ Assim, no caso do argumento da gravidade universal, seguramente os principais fenômenos mobilizados foram os “fenômenos de Kepler” e os fenômenos das “colisões”, incorporados nas leis do movimento. Mas, como já mencionamos anteriormente, além desses vários outros fenômenos foram também incluídos no argumento, como por exemplo o fenômeno da queda dos corpos na superfície da Terra. Um breve exame no Livro III é suficiente para mostrar que o projeto desse último livro era prosseguir dedutivamente a partir dos “fenômenos”, tomados como “princípios”.

Mas certamente parte das confusões e incompreensões relacionadas à expressão “dedução a partir dos fenômenos” começou a surgir quando Newton passou a não mais respeitar as fronteiras disciplinares, e alterou conscientemente a terminologia tradicional. Quando o método axiomático era usado na óptica de Euclides, ou na astronomia, ou em qualquer outra matemática mista, os princípios dos quais se originavam as proposições eram chamados de “hipóteses”. E como vimos anteriormente, o próprio Newton usou essa terminologia na primeira edição dos *Principia*. Entretanto, a partir da segunda edição ele passou a usar a designação de “fenômenos” para esses princípios, um conceito que pertencia a uma outra tradição: a filosofia natural experimental. Deve haver poucas dúvidas que para as gerações seguintes que analisaram os pronunciamentos do final do Escólio Geral, já não era imediatamente perceptível que a expressão “dedução a partir dos fenômenos” estava se referindo à utilização do método axiomático das ciências demonstrativas na filosofia natural de orientação experimental. Em outras palavras, não devia ser imediatamente perceptível que

⁶⁰³ Newton de fato endossa essa última opção, que as leis do movimento foram “deduzidas a partir dos fenômenos”, afirmando-a expressamente no próprio Escólio Geral. “Nessa filosofia, as proposições são deduzidas a partir dos fenômenos e tornadas gerais pela indução. A impenetrabilidade, mobilidade e o ímpetus dos corpos, e as leis do movimento, e a lei da gravidade foram encontradas por esse método”. As leis do movimento, portanto, teriam sido deduzidas a partir dos fenômenos das colisões entre os corpos.

essa expressão se referia à própria “maneira matemática” que Newton alertou que iria seguir no texto de abertura do Livro III.

O problema é que esse movimento de Newton não foi uma mera mudança terminológica. Aparentemente, empregar os “fenômenos” em associação com o método axiomático não era uma prática tão comum entre os filósofos experimentais. Do mesmo modo, entender os primeiros princípios de uma ciência matemática mista como “fenômenos” não era uma prática tão comum entre os matemáticos. A tradição “experimental” que lidava com os “fenômenos” não estava diretamente ligada com a tradição das matemáticas mistas que usavam o método axiomático. E mesmo quando haviam praticantes de ambas as artes, existiam reconhecidas diferenças entre as ciências matemáticas e a filosofia natural, e também evidentes dificuldades envolvidas em uma possível associação entre as duas. As “hipóteses” e os “fenômenos” seriam dois tipos de enunciados bastante distintos, do ponto de vista ontológico. As ciências mistas, embora tomassem emprestado enunciados da experiência, assumiam esses enunciados na estrutura axiomática como enunciados *matemáticos*, e portanto eles deixavam de ser considerados no seu aspecto original. Quando consideramos a *natureza* perdemos a possibilidade de usar o método matemático; quando usamos o método matemático, perdemos a possibilidade de considerar a *natureza*. Assim, à primeira vista, empregar “fenômenos” no método axiomático não seria uma prática aceitável.⁶⁰⁴

Contudo, do que foi exposto na *Parte I* desse trabalho, vimos que misturar esses dois campos não era um problema para Newton. Pela tese da “mecânica universal” do Prefácio a distinção geralmente atribuída entre o *mundo* e a *geometria* é totalmente artificial. Com efeito, as próprias distinções tradicionais entre “hipóteses”, “fenômenos”, “ciências mistas”, e “filosofia natural” são artificiais. Rigorosamente falando, há matemática em todos os fenômenos naturais, embora só consigamos expressar matematicamente alguns deles. E, portanto, é perfeitamente possível considerar os primeiros princípios de uma ciência mista como “fenômenos”, ou, de outro modo, aplicar o método axiomático das ciências demonstrativas nos “fenômenos” da filosofia experimental. Basta que se selecione os fenômenos em que somos capazes de perceber e expressar as suas quantidades matemáticas. Aparentemente, por essa razão Newton tinha um particular interesse pelos fenômenos que estavam expressos matematicamente, e ainda mais por aqueles cujas quantidades matemáticas expressas estavam dentro de uma boa margem segurança.

⁶⁰⁴ Barrow lembra que Aristóteles não admitia argumentos heterogêneos, isto é, tais como aqueles retirados de ciências de naturezas distintas. *Usefulness*, p.98.

Portanto, os enunciados astronômicos no início do Livro III são “fenômenos”, pelos critérios da filosofia experimental. Por outro lado, são “hipóteses”, no sentido das ciências mistas aristotélicas: *princípios* a partir dos quais uma ciência demonstrativa pode ser construída num estilo axiomático. E o mesmo se pode dizer acerca das regras dos choques e das leis do movimento. O que Newton procurou fazer das proposições de 1 a 7 do Livro III foi precisamente seguir o estilo demonstrativo do método axiomático a partir desses “fenômenos” até a gravidade universal. Conforme vimos no capítulo 10, cada um das primeiras sete proposições do Livro III pode ser “desmontada” na forma de deduções. Seguindo as orientações dos *Segundos Analíticos*, para uma “demonstração” ser válida deve ser possível expressá-la na forma de simples silogismos.⁶⁰⁵ Desse modo, Newton procurou apresentar todas as proposições como deduzidas a partir dos fenômenos. Agora, se todas as demonstrações de Newton foram perfeitas em relação ao seu padrão de referência é outra questão. Como sabemos Newton enfrentou algumas dificuldades principalmente na segunda parte da proposição 5.

As proposições 1 e 2 certamente foram deduzidas dos fenômenos de 1 a 4, ou seja, da lei das áreas e dos períodos para os satélites de Júpiter e Saturno, e para os planetas primários. A proposição 3 (caso da Lua), por sua vez, já teve seus percalços, mas podemos até conceder que tenha sido deduzida da lei das áreas e da precessão de 3 graus da órbita da Lua. A proposição 4 (força centrípeta da Lua é igual a força da gravidade) foi deduzida da proposição 3 e do fenômeno da queda dos corpos na superfície da Terra (com o auxílio das Regras 1 e 2). A primeira parte da proposição 5 foi obtida por uma generalização indutiva do resultado da proposição 4 para Júpiter, Saturno e o Sol. A segunda parte da proposição 5, pela apresentação de Newton seria apenas uma generalização da proposição 4 para todos os demais planetas, primários e secundários; porém vimos que não se trata exatamente disso. Foi nesse ponto que se introduziu a atração mútua entre os planetas, e aparentemente Newton não conseguiu apresentar esse conteúdo como uma dedução a partir dos fenômenos. No entanto, não se pode argumentar que foi uma conclusão arbitrária e desvinculada dos fenômenos. Pelo contrário, procuramos mostrar todo percurso que Newton percorreu na transição para a busca de uma causa física da gravidade, e como ele se certificou que essa causa fosse rigorosamente compatível com os fenômenos e as quatro proposições anteriores. Para concluir a segunda

⁶⁰⁵ Comentando sobre a natureza da demonstração Barrow diz: “(...) o termo demonstração é concebido de diferentes maneiras. Primeiramente, para qualquer silogismo científico particular, de acordo com a definição de Aristóteles, uma demonstração é um *silogismo produzindo ciência*; essa pode ser nomeado *demonstração simples*. Em segundo lugar, para um sistema de mais silogismos conectados juntamente numa certa série, e conspirando conjuntamente para a prova de uma proposição; esse tipo de demonstração pode ser nomeada de *demonstração composta*”. *Usefulness*, p.94. Itálicos meus.

parte da proposição 5, Newton se fundamentou nos fenômenos magnéticos, nos fenômenos do movimento dos corpos nos fluidos, e nos fenômenos Kepler, nos fenômenos das irregularidades do movimento da Lua, e nos fenômenos do movimento do mar.⁶⁰⁶ Pode ser que Newton não tenha conseguido expressar essa proposição exatamente como as outras, mas não há dúvidas de que ela estava fortemente fundamentada nos fenômenos.⁶⁰⁷ A proposição 6 foi deduzida da segunda parte da proposição 5, dos fenômenos do pêndulo e dos fenômenos do movimento dos corpos nos fluidos, e depois foi generalizada por indução. Por fim, a proposição 7 foi generalizada para todos os corpos e para toda a matéria pela Regra 3.

Portanto, analisando as considerações de Newton a partir do contexto da filosofia experimental inglesa do início da modernidade e da tradição aristotélico-euclidiana das ciências demonstrativas percebemos que a expressão ou “dedução a partir dos fenômenos” (“*deducuntur ex phaenomenis*”) é coerente com o projeto dos *Principia* e particularmente com o que ele se propôs a fazer no Livro III. Apesar de algumas dificuldades, pode-se dizer que as proposições foram “deduzidas a partir dos fenômenos e tornadas gerais pela indução”. Com efeito, as próprias generalizações indutivas foram embutidas numa forma *dedutiva* no sistema axiomático com a prévia formulação das “Regras para Filosofar” para esse fim. Assim, poderíamos parafrasear a célebre sentença do Escólio afirmando que as proposições do Livro III foram *deduzidas a partir dos fenômenos e das regras indutivas*.

Para completar o esclarecimento da expressão “dedução a partir dos fenômenos” será proveitoso agora escrever algumas palavras sobre o “*hypotheses non fingo*”, mostrando a relação entre as duas expressões e esclarecendo porque também essa última seria coerente com o projeto de Newton nos *Principia*.

13.2 HYPHOTESES NON FINGO

Da mesma maneira que a expressão “dedução a partir dos fenômenos”, a declaração “não invento hipóteses” é uma das mais conhecidas e ao mesmo tempo polêmicas não apenas dos *Principia*, mas de toda obra de Newton. Talvez o principal motivo para as polêmicas surja do vívido contraste entre um dos exemplares de investigação da natureza mais bem sucedidos da história da ciência (os *Principia*) e a aparente negação de uma das práticas mais correntes do empreendimento cinetífico (a utilização de hipóteses). A polêmica geralmente fica em

⁶⁰⁶ Mas Duhem e Popper têm razão quando afirmam que não é possível obter a gravidade universal dos fenômenos de Kepler. Mais adiante voltarei a isso.

⁶⁰⁷ Mais à frente volto a esse ponto.

torno da questão: ao declarar *hypotheses non fingo* estava Newton realmente rejeitando o uso de todo tipo de hipóteses na filosofia natural?

Essa discussão tem uma longa história. Vale a pena fazer um breve sumário. No séc. XVIII, após o bem sucedido exemplo dos *Principia*, os filósofos naturais ingleses, herdeiros da ciência newtoniana, aparentemente abraçaram o anti-hipoteticismo como um ideal metodológico de investigação da natureza.⁶⁰⁸ Por outro lado, no séc. XIX, William Whewell, renomado filósofo e historiador da ciência inglês, denunciou que o maior erro de Newton foi rejeitar prematuramente todas as hipóteses.⁶⁰⁹ Nos meados do séc. XX, Koyré concluiu que Newton não seria capaz de cometer tamanho erro metodológico e por essa razão os seus pronunciamentos mais radicais sobre as hipóteses e indução não deveriam ser levados muito a sério.⁶¹⁰ Nas últimas décadas do séc. XX, Cohen e outros historiadores que o seguiram enfatizaram que os pronunciamentos metodológico do Escólio Geral foram escritos em meio à polêmica entre cartesianos, leibnizianos e newtonianos e, portanto, o alvo do *hypotheses non fingo* era principalmente descredibilizar a hipótese dos vórtices e as críticas de Leibniz à gravidade universal.⁶¹¹ E no início desse século, Shapiro, Guicciardini, Ducheyne, entre outros, passaram a sugerir que Newton realmente perseguia desde o início da sua carreira o projeto de uma filosofia natural livre de hipóteses.⁶¹² Portanto, quando o problema parecia estar caminhando para um desfecho, aparentemente retorna ao ponto de partida. Então, persiste a questão: o que Newton pretendia dizer com a expressão *hypotheses non fingo* no Escólio Geral aos *Principia*? Estaria ele realmente rejeitando todas as hipóteses? Qual é – afinal – o posicionamento de Newton em relação ao uso das hipóteses na filosofia natural?

Para oferecer um adequado encaminhamento para as questões propostas acima será conveniente dividir o percurso a seguir em três etapas. Primeiro, apresentarei algumas observações preliminares que se relacionam direta ou indiretamente com o tema das “hipóteses” na filosofia natural inglesa e particularmente na filosofia natural de Newton. Em seguida, atentarei para alguns detalhes do pronunciamento de Newton sobre as hipóteses no quinto parágrafo do Escólio Geral. Por fim, na seção seguinte, ofereci algumas conclusões e encaminhamentos de entendimento para as questões relativas a esse celebrado texto de encerramento dos *Principia*. Começemos, então, com as observações preliminares.

⁶⁰⁸ McMullin, 2001.

⁶⁰⁹ Whewell, 1860.

⁶¹⁰ Veja Laudan, 2000, p.44.

⁶¹¹ Cohen, 1966. Veja também Barra, 1995.

⁶¹² Embora não tenham esclarecido exatamente “livre de hipóteses” em que sentido, ou pelo menos em que sentido de “hipóteses”. Veja Shapiro, 2004; Guicciardini, 2009; e Ducheyne, 2012.

13.2.1 Filosofia Experimental e Filosofia Especulativa

A primeira observação preliminar que gostaria de fazer sobre as questões propostas no fim da seção anterior é acerca do contexto da polêmica acerca das hipóteses na filosofia natural no séc. XVII. É preciso enfatizar que a controvérsia sobre as “hipóteses” na filosofia natural de modo algum começou com o próprio Newton. Peter Anstey mostrou convincentemente que a referência pejorativa a “hipóteses” surgiu pelo menos desde a década de 1650 com a polêmica entre a filosofia experimental inglesa e a assim considerada “filosofia especulativa”.⁶¹³ Não são poucas as referências a essas duas correntes filosóficas mesmo antes de Newton entrar em cena, e não obstante – segundo Anstey – essa polêmica foi largamente ignorada pelos historiadores da filosofia natural inglesa do início da modernidade.

A controvérsia entre a “filosofia experimental” e a “filosofia especulativa” pode ser discernida já na famosa oposição de Bacon entre a “especulação idólatra” e a promoção da “derivação do conhecimento natural a partir dos experimentos”.⁶¹⁴ Em 1664, Henry Power chamou Bacon de “patriarca da filosofia experimental”⁶¹⁵ e acusou os filósofos que não seguiam os preceitos experimentais de “conjecturalistas vazios” e propagadores de “falácias”.⁶¹⁶ Na década de 1660 o conflito entre as filosofias já era patente. Em 1665, no prefácio do *Micrographia*, Hooke chamou a “filosofia experimental” de “real” filosofia, e discorreu sobre as suas vantagens sobre a “filosofia do discurso e da disputa”.⁶¹⁷ Em 1667, Oldenburg escreveu a um correspondente da *Sociedade Real* afirmando que “a *Royal Society* busca o avanço de todas as ciências e artes úteis, e não por meio de meras *especulações*, mas por exatas e confiáveis observações e experimentos”.⁶¹⁸ Em 1668, Joseph Glanvill escreveu sobre os “experimentadores modernos” que rejeitaram a filosofia antiga como um “labirinto de palavras” que “não produzia qualquer avanço”, e que buscavam o aumento do conhecimento experimental, sem o qual “nossas *hipóteses* são apenas *sonhos e romances*, e a nossa ciência mera *conjectura e opinião* (...) que descrevem *mundos imaginários* da nossa

⁶¹³ Anstey, 2005.

⁶¹⁴ Ibid, p.217.

⁶¹⁵ Power, 1664, Prefácio.

⁶¹⁶ Ibid, p.82.

⁶¹⁷ “The *real*, the *mechanical*, the *experimental* Philosophy, which has this advantage over the Philosophy of *discourse* and *disputation*, that whereas that chiefly aims at the subtilty of its Deductions and Conclusions, without much regard to the first ground work, which ought to be well laid on the Sense and Memory; so this intends the right ordering of them all, and the making them serviceable to each other (...)”. Hooke, 1665, Prefácio. Shapiro interpretou, ao meu ver, equivocadamente o “mecânico” dessa passagem, que não está relacionado necessariamente ao mecanicismo de Descartes, Leibniz e outros, mas com o sentido de “mecânico” de Bacon no *Novum Organum*, que remete aos experimentos derivados das “artes mecânicas”.

⁶¹⁸ Oldenburg to Norwood, 10 February 1667/8, Oldenburg 1965–1986, IV, p. 168, apud Anstey, 2005. Itálico meu.

própria autoria”.⁶¹⁹ Em 1666, Samuel Parker esclareceu que preferia a filosofia experimental promovida pela *Royal Society* sobre a filosofia aristotélica, porque ela “descartou todas as hipóteses particulares e se sujeitou a exatos experimentos e observações (...)”.⁶²⁰ E considerações semelhantes podem ser encontradas em Sprat (1667), Cavendish (1668), entre outros.

No fim do séc. XVII, a distinção entre a “filosofia experimental” e “filosofia especulativa” estava firmemente consolidada. Em 1692 já constava em manuais de ensino, como o de John Dunton: “A filosofia deve ser considerada sob dois títulos, Natural e Moral: o primeiro (...) deve ser novamente subdividido em filosofia *Especulativa e Experimental*”. (...) Sobre essa distinção que oferecemos (...) nós devemos, tanto quanto possível, excluir a primeira (...)”.⁶²¹ Mesmo seguindo uma linha diversa de Dunton, em *The Method to Science* (1696) John Sergeant faz semelhante distinção entre filósofos experimentais e especulativos:

Os métodos que eu passo a examinar são de dois tipos: aquele do filósofo especulativo e experimental; o primeiro deles pretende proceder pela razão e princípios; o último por indução; e ambos tem o objetivo de promover o avanço da ciência.⁶²²

A filosofia experimental se apresentava sobretudo como uma substituta da filosofia escolástica que passou a ser entendida como fundada sobre especulações, conjecturas ou “hipóteses”, promovendo somente um amontoado de disputas vazias e sem sentido. Em 1692 William Molyneux escreveu sobre isso:

Não posso me omitir de expressar minha percepção acerca desse excelente método da *filosofia experimental*, que agora, pelo seu exemplo e encorajamento, realmente prevaleceu universalmente (...). É surpreendente considerar como as escolas no passado foram invadidas por jargões sem sentido, os quais chamavam de Filosofia (...). Os comentadores de Aristóteles (...) transformaram a Física num amontoado de disputas, administrando todos os conhecimentos dos corpos e movimentos por *conjecturas hipotéticas*, confirmadas por argumentos plausíveis, de engenhosidade retórica, ordenados numa forma silogística, e respondendo objeções de maneira semelhante. Mas eles nunca estudaram para provar suas opiniões por *experimentos*.⁶²³

Os comentadores de Aristóteles transformaram a filosofia natural num amontoado de “conjecturas hipotéticas”, afirma Molyneux. A filosofia experimental representava o novo e

⁶¹⁹ Glanvill, 1668. Grifos meus.

⁶²⁰ Parker 1666, p. 45–46. Grifos meus.

⁶²¹ Dunton, 1692, p.vi-vii.

⁶²² Sergeant, 1696.

⁶²³ Molyneux, 1692. Grifos meus.

“excelente método” da fazer filosofia, no qual os argumentos são provados por “experimentos”.

Mas a rejeição dos filósofos experimentais não era somente contra as infundadas especulações da filosofia antiga e escolástica. Mesmo algumas correntes modernas incorriam nos mesmos erros que os antigos. O sistema cartesiano, por exemplo, se tornou um tipo de modelo arquetípico de uma filosofia especulativa. Em 1697 Blackmore escreveu:

O surgimento de *hipóteses* na filosofia tem, para mim, pouco mais crédito do que erigir um sistema de astrologia; e os julgamentos e decisões que são concedidas sobre elas me parecem precárias e incertas. Por um tempo estive enamorado pelo *Sistema Cartesiano*, mas a minha paixão se extinguiu (...). Estou agora inclinado a pensar que é uma injúria para os homens de bom senso e sagacidade natural ser impelido por quaisquer *hipóteses* antes de entrar na prática da Física. Pois isso obstrui a liberdade do seu julgamento, e introduz um forte bloqueio no seu pensamento (...). [As] observações da natureza devem ser realizadas primeiro, antes de qualquer hipótese ser estabelecida.⁶²⁴

Embora Descartes fosse um moderno e tivesse fornecido notáveis contribuições para a nova filosofia natural durante a revolução científica, o desconforto pelo seu método filosófico foi gradativamente crescendo na Inglaterra. Anstey afirma que “incrivelmente, como os escolásticos, [Descartes] passou a representar o jeito errado de fazer filosofia natural (...). De várias maneiras ele era tão culpado da filosofia natural especulativa quanto os antigos”.⁶²⁵ Até mesmo alguns adeptos da teoria dos vórtices reconheciam criticamente o aspecto especulativo da filosofia natural cartesiana. Em suas notas sobre a vida de Descartes (1691), Huygens descreveu as hipóteses cartesianas como “conjecturas e ficções”.⁶²⁶ E em outro lugar afirmou que Descartes apenas disseminou “ídolos fantasiosos” e discorreu sobre “conjecturas em vez de verdades”. É notável Huygens se utilizar aqui de uma terminologia baconiana ao avaliar a filosofia cartesiana.⁶²⁷

Desse modo, não apenas a filosofia antiga era rejeitada pelos filósofos experimentais ingleses sob o rótulo de “especulativa” ou “hipotética”, como também as filosofias modernas

⁶²⁴ Blackmore, 1697, Prefácio. Grifos meus.

⁶²⁵ Anstey, 2005, p.231. Aqui vale destacar que não estou fazendo qualquer juízo sobre a relação da filosofia cartesiana com a experiência. Estou apenas destacando a avaliação dos filósofos experimentais ingleses. Particularmente, penso que a filosofia natural cartesiana parcialmente estava fundada na experiência, mas não tinha restrições tão severas para a especulação quanto alguns filósofos experimentais pareciam ter.

⁶²⁶ Huygens, *Oeuvres complètes*, vol. 10, p. 405, apud Anstey, 2005, p.225.

⁶²⁷ Bacon também chamou as especulações de “ídolos fantasiosos” no aforismo 43 do Livro I do *Novum Organum* onde discorre sobre os “ídolos do comércio”: “But words plainly force and overrule the understanding, and throw all into confusion, and lead men away into numberless empty controversies and idle fancies”. (Bacon, 2011, p.264). Tão notável quanto seria Newton utilizar a mesma expressão de Bacon na Regra 3 dos *Principia*. Na tradução do Cohen lemos: “Certainly idle fancies ought not to be fabricated recklessly against the evidence of experiments”. Mas não fui capaz de compreender de onde Cohen tirou a expressão “idle fancies”, que não consta no original em latim.

que não se fundamentavam nas “observações e experimentos”. Mas aqui é preciso fazer uma ressalva. A rejeição dos filósofos experimentais ingleses pelas hipóteses especulativas não era uma unanimidade. Conforme argumenta Anstey, havia uma diversidade de baconianismos na *Royal Society* e na Inglaterra moderna. Alguns seguiam a linha de Boyle e Sprat, por exemplo, que, embora firmemente alicerçados na filosofia experimental, buscavam uma posição conciliadora entre as hipóteses e experimentos. Acerca disso vale lembrar que Boyle escreveu um ensaio com o sugestivo título *Da Utilidade da Filosofia Especulativa e Experimental uma para a outra*.⁶²⁸ Outros, como Oldenburg, rejeitavam firmemente devaneios especulativos por primarem pelo programa de “história natural” de Bacon. Outros, ainda, seguiam a linha de Hooke, que reconhecia uso de hipóteses como guias de pesquisa, e usavam hipóteses eventualmente, embora justificando ao leitor quando recorriam a esse recurso.⁶²⁹ Por fim, haviam aqueles que rejeitavam as hipóteses por manterem o ideal de uma filosofia experimental demonstrativa. De qualquer modo, o que todos tinham em comum era o forte compromisso com a experiência, e mesmo aqueles que não eram radicalmente contra as hipóteses não aprovavam a especulação totalmente livre e sem rígidas restrições da experiência.

As observações dos parágrafos anteriores sobre o contexto de rejeição dos filósofos experimentais ingleses (de um modo geral) pela filosofia especulativa deve ser suficiente para mostrar que de modo algum Newton foi o precursor da polêmica sobre o uso das “hipóteses” na filosofia natural. Esse ponto é significativo porque diverge da difundida opinião de Laudan, McMulin e Shapiro, que com o *hypotheses no fingo* Newton teria promovido um fatídico desvio numa relativamente sofisticada metodologia hipotético-dedutiva no séc. XVII, até mesmo entre os ingleses.⁶³⁰ Anstey argumenta que observando com mais cuidado a polêmica entre a filosofia experimental e especulativa na Inglaterra fica claro que os pronunciamentos do matemático de Cambridge, muito longe de serem os causadores desse cenário, foram apenas uma resposta a ele.⁶³¹ Essa conclusão é importante porque nos leva à minha segunda observação preliminar.

A segunda observação preliminar que ofereço é sobre o posicionamento de Newton perante controvérsia entre a filosofia experimental e especulativa no início da sua carreira. Em

⁶²⁸ Veja Boyle 1772, vol. 14, p. 342.

⁶²⁹ “Pode parecer que estou condenando o meu próprio percurso nesse tratado; no qual pode haver talvez algumas expressões que pareçam mais positivas do que as Suas prescrições permitiriam”, mas elas devem ser “entendidas apenas como Conjecturas e Questões (que Seu método não desautoriza totalmente)”. Hooke (1665) to *Royal Society* [A2v], apud Anstey, 2005, p.224.

⁶³⁰ Laudan, 1981; B. Shapiro, 1983; McMullin, 2001.

⁶³¹ Anstey, 2005, p.233.

1672, em um dos seus primeiros trabalhos publicados – um breve estudo sobre a teoria das cores e refração, vinculado no *Philosophical Transactions* – o jovem professor lucasiano assumiu claramente o lado da filosofia experimental dos seus compatriotas, posicionando-se também contrariamente às especulações e hipóteses:

Difícilmente um naturalista esperaria ver essa ciência [das cores] se tornar matemática e, contudo, eu ousou afirmar que há nela tanta certeza quanto em qualquer outra parte da *Optica*. Pois o que apresentarei sobre ela não é uma *hipótese*, mas a mais rigorosa consequência; não é uma *conjectura*, inferindo “isso é assim porque não poderia ser de outro modo”, ou porque satisfaz todos os fenômenos (o tópico universal dos filósofos), mas é *evidenciado pela mediação de experimentos*, concluindo diretamente e sem qualquer suspeição de dúvidas.⁶³²

Alguns meses mais tarde ele voltou a escrever num manuscrito sobre a refração da luz num prisma:

Para a confirmação de tudo isso não é preciso alegar mais do que é demonstrável matematicamente pelos princípios anteriores. Mas eu devo acrescentar ainda que aqueles que querem se dar ao trabalho [ing. *take the pains*] podem pelo testemunho dos seus sentidos se assegurar que essas explicações não são *hipotéticas*, mas infalivelmente verdadeiras e genuínas.⁶³³

Nas passagens acima fica claro, em primeiro lugar, que Newton está alinhado com os filósofos experimentais da sua época na crítica à filosofia natural especulativa característica do escolasticismo. Na primeira passagem ele enfatiza que o resultado que apresenta “não é uma hipótese”, ou uma “conjectura” que argumenta somente *por absurdo*, inferindo que “isso é assim porque não poderia ser de outro modo”. Na segunda passagem ele insiste novamente que as “explicações não são hipotéticas”, destacando – assim como na primeira passagem – a rigorosa dependência nos “experimentos” ou no “testemunho dos sentidos”. Nitidamente se percebe que a preocupação é deixar evidente para o leitor que os estudos não se entregam a especulações e estão em estrita concordância com a experiência.

Mas das passagens acima também fica claro que Newton está alinhado especificamente ao grupo de filósofos ligados ao ideal de uma filosofia experimental *demonstrativa*. Ele defende que a confirmação dos seus resultados é “demonstrável matematicamente” e levam a conclusões “infalivelmente verdadeiras e genuínas”. E

⁶³² *Correspondence*, vol. 1, p. 96-97. Oldenburg excluiu essa passagem no trabalho publicado no *Philosophical Transactions*.

⁶³³ MS Add. 3970, f. 525r, apud Shapiro, 2004, p.217. Esse manuscrito foi escrito para ser lido na *Royal Society*, mas Newton o alterou. Newton alterou essa passagem para: “Agora, todas essas coisas se seguem das propriedades da Luz através de um modo matemático de raciocinar, de modo que a verdade pode ser manifesta por meio de experimentos”. Veja f. 510v para a versão inalterada de 1675, que foi lida na *Royal Society*.

reconhece que dificilmente um filósofo experimental “naturalista”⁶³⁴ “esperaria ver essa ciência [das cores] se tornar matemática (...)”, retirando “consequências” com tanta “certeza quanto em qualquer outra parte da óptica”. Esses trechos sugerem que, ao menos no início da sua carreira, Newton estava bastante convencido da possibilidade de se construir uma filosofia experimental demonstrativa com o auxílio da matemática. E se as passagens acima não são suficientes para certificar esse ideal, a terceira aula do *Lectioes Opticae* (1671-1672) não deve deixar a menor dúvida:

Embora as cores pertençam à Física, a sua ciência deve, não obstante, ser considerada matemática, na medida em que elas podem ser submetidas ao tratamento matemático. Com efeito, uma vez que uma ciência exata das cores parece ser uma das coisas mais difíceis dentre aquelas que a filosofia necessita, espero mostrar – por assim dizer, pelo exemplo – quão valiosa é a matemática na filosofia natural. Portanto, encorajo os geômetras a investigarem a natureza mais rigorosamente, e aqueles devotados a ciência natural a primeiro aprender geometria. Desse modo, os primeiros não dispendirão todo o seu tempo em especulações sem valor para a vida humana, nem os últimos trabalharão assiduamente com um método absurdo, falhando perpetuamente em atingir seu objetivo. De fato, com a ajuda dos filósofos geômetras e geômetras filósofos, em vez das *conjecturas* e *probabilidades* que estão sendo espalhadas por todos os lados, poderemos finalmente alcançar uma ciência da natureza apoiada na mais alta evidência.⁶³⁵

Nesse trecho é possível perceber a insatisfação de Newton não apenas como a filosofia natural de maneira geral, mas como a própria filosofia experimental. Como foi mencionado há pouco, o ideal de uma filosofia experimental demonstrativa na Inglaterra estava sendo substituído por uma adesão a algum tipo de *probabilismo*. É nítida a crença de Newton de que nem mesmo a concessão do probabilismo precisa ser aceita. É possível construir uma filosofia experimental demonstrativa com o auxílio da matemática. Com a ajuda dos “filósofos geômetras” e dos “geômetras filósofos” a filosofia natural pode ser livre das “conjecturas e probabilidades” – poderíamos dizer, das “hipóteses” – e ser sustentada sobre “a mais alta evidência”. Ao que tudo indica, esse projeto foi colocado em prática não com os estudos sobre as cores e a refração da luz, mas com os estudos sobre o movimento planetário nos *Principia*. E isso nos leva à minha terceira observação.

A terceira observação preliminar que ofereço é que os *Principia* são a concretização do projeto de construção de uma filosofia experimental demonstrativa. Aparentemente, a obra magna de Newton foi motivada sobretudo por dois problemas. Primeiro, o problema da determinação da causa dos movimentos planetários, que é, na verdade, um desdobramento

⁶³⁴ Acredito que com o adjetivo “naturalista” Newton se referia a aqueles filósofos que preconizavam o programa baconiano da “história natural”.

⁶³⁵ Newton, 1984, p. 87-89. Grifos meus.

subsidiário do problema mais amplo sobre o verdadeiro sistema do mundo. Segundo, por um problema metodológico. A filosofia natural havia se perdido num limbo especulativo e probabilista. A solução seria o desenvolvimento de uma filosofia natural *experimental* e *demonstrativa*. Ao que parece, por ocasião do seu sucesso na resolução do problema de Hooke, Newton julgou o momento oportuno para colocar em prática o seu projeto metodológico. Essa motivação pode ser percebida discretamente já no prefácio à primeira edição dos *Principia*. Ele encaminha o seu tratado manifestando a esperança de que os seus princípios “possam lançar luz nesse método de filosofia, ou em outro ainda mais verdadeiro”. Sobre o objetivo metodológico dos *Principia*, no entanto, nada mais se diz. Mas também isso fazia parte do projeto. O método devia ser evidenciado “pelo exemplo”. Os *Principia*, portanto, é a concretização do projeto de uma filosofia experimental demonstrativa esboçado no *Lectiones Opticae*.

A quarta e última observação preliminar que gostaria de encaminhar antes de entrar em alguns outros detalhes dos pronunciamentos sobre as hipóteses no Escólio Geral, é acerca das críticas de Leibniz aos *Principia*. Essas críticas também têm como pano de fundo a polêmica entre a filosofia experimental e a filosofia especulativa.

Em 1710 – cerca de 24 anos depois da primeira publicação dos *Principia* – Leibniz escreveu *Essais de Theodicée*, no qual direcionou algumas críticas à teoria da gravidade universal. Não é certo quando exatamente Newton tomou conhecimento dessa crítica. Mas é certo que entre 1711-1712, à mesma época da preparação e revisão da segunda edição dos *Principia*, ele tomou ciência da carta que Leibniz escreveu ao matemático Hartsoeker, em que voltou a criticar a teoria da gravidade universal. Resumidamente, na carta Leibniz afirmou que o princípio de que “todos os corpos se atraem mutuamente” é uma “ficção inventada para sustentar uma opinião mal fundada”, e que o conceito de uma gravidade “sem qualquer mecanismo” não passa de uma “qualidade oculta, e tão oculta que é impossível que algum dia se esclareça (...)”.⁶³⁶ Conforme destacou Shapiro, o que mais atingiu Newton nessa crítica não foi o questionamento sobre a plausibilidade de uma ação sem qualquer mecanismo intermediário que pressuponha contato. Leibniz tocou num ponto nevrálgico da filosofia de Newton, praticamente o projeto da sua vida, que era a contrução de uma ciência da natureza segura, demonstrativa, e solidamente alicerçada na experiência. Segundo Leibniz, nos *Principia* Newton estaria oferecendo exatamente aquilo que mais criticava: especulações e hipóteses. Uma “ficção inventada” ou uma mera “opinião mal fundada”. Talvez até com certa

⁶³⁶ Leibniz, 1722, p.457.

dose de maldade, o filósofo alemão estava dizendo que Newton, então dono da cadeira de presidente da *Royal Society* (vale lembrar, a maior propagadora da filosofia experimental na Europa), e os *Principia*, uma das mais influentes amostras da assim chamada filosofia experimental, não apenas contrariara a sua própria pretensão de rigor experimental incorrendo em especulações infundadas, como – o que é pior – retrocedeu para as qualidades ocultas do aristotelismo, a mesma filosofia por anos tão duramente criticada pela própria *Sociedade Real*. Portanto, o pano de fundo da crítica de Leibniz é a controvérsia que já existia pelo menos desde a década de 1650 na Inglaterra, e que a essa altura se encontrava no auge. Como já foi mencionado, no fim do séc. XVII até alguns manuais de ensino da Inglaterra já ofereciam a distinção entre filosofia experimental e especulativa, e frequentemente vinculavam essa última de forma depreciativa. Para os ingleses, certamente Leibniz era um dos principais representantes desse tipo de filosofia. E por isso o conteúdo das críticas de Leibniz aos *Principia* pode ser entendido como uma provocação. Foi de um dos principais representantes da filosofia especulativa que partiu a crítica de que o conceito central dos *Principia* não passava de uma especulação sem fundamento. O filósofo alemão parece não apenas querer divergir das ideias de Newton; parece querer macular a sua imagem perante os próprios filósofos experimentais ingleses.

Essas quatro observações preliminares bastam para delinear a moldura dos pronunciamentos de Newton no Escólio Geral. Passarei, agora, à segunda etapa dessa discussão. A análise de alguns detalhes relacionados ao quinto parágrafo do escólio.

13.2.2 A defesa da filosofia experimental dos *Principia*

Realizadas as observações preliminares sobre a relação das hipóteses com a controvérsia entre a filosofia experimental e a filosofia especulativa no círculo dos filósofos naturais ingleses, pode-se agora compreender mais claramente os pronunciamentos de Newton no quinto parágrafo do Escólio Geral, e particularmente a sua declaração *hypotheses non fingo*. Vale a pena lembrar o quinto parágrafo do Escólio Geral parágrafo novamente:

Ainda não fui capaz de deduzir dos fenômenos a razão para essas propriedades da gravidade, e não invento hipóteses. Porque o que quer que não seja deduzido dos fenômenos deve ser chamado de *hipótese*; e hipóteses, quer metafísicas, quer físicas, quer de qualidades ocultas, quer mecânicas, não têm lugar na *filosofia experimental*. Nessa filosofia, as proposições são deduzidas a partir dos fenômenos e tornadas gerais pela indução. A impenetrabilidade, mobilidade e o impetus dos corpos, e as leis do movimento, e a lei da gravidade foram encontradas por esse método.⁶³⁷

Gostaria de chamar a atenção para dois detalhes dessa passagem. Em primeiro lugar, para os termos destacados por Newton. “Hipótese” e “Filosofia Experimental”. Esse detalhe nos revela de imediato que o objetivo da descrição oferecida nessa passagem – pelo menos do ponto de vista literal – não é necessariamente esclarecer os passos seguidos nos *Principia*, mas o método da “filosofia experimental”. A “lei da gravidade” surge como um exemplo das aquisições desse método, assim como também a “impenetrabilidade”, a “mobilidade”, e outros conteúdos que sequer foram objeto de investigação nos *Principia*. Em outros termos, em face da crítica de Leibniz de que Newton estaria inventando “ficções” e até mesmo retrocedendo para especulações como as “qualidades ocultas” aristotélicas, a resposta do Escólio Geral poderia assim ser parafraseada: *essa filosofia é experimental. Fundamenta-se solidamente na experiência. E é por essa exata razão que até hoje não foi atribuída uma causa para a gravidade. Ficções e especulações são os “vórtices” que vocês defendem. Nessa filosofia nós não inventamos hipóteses.* A resposta de Newton está perfeitamente inserida no contexto do debate entre filosofia experimental e especulativa que foi esclarecido anteriormente.

O segundo detalhe que gostaria de chamar a atenção é que nessa passagem Newton não apenas ingressa no debate sobre a filosofia experimental e especulativa, como ele se arrisca a oferecer um critério para distingui-las. Ele afirma que “o que quer que não seja deduzido dos fenômenos deve ser chamado de *hipótese*”. Ou seja: uma “hipótese” é tudo aquilo que não pode ser “deduzido a partir dos fenômenos”. Então é como se dissesse: *uma vez que Leibniz ingressou nessa questão é importante se esclareça para ele o que é uma filosofia genuinamente experimental. Na filosofia experimental todas as proposições devem ser “deduzidas a partir dos fenômenos” e generalizadas por indução. E qualquer proposição que não seja deduzida a partir dos fenômenos deve ser considerada uma hipótese especulativa. Das proposições “metafísicas” até “mecânicas”, se não puder ser deduzida a partir dos fenômenos, é apenas uma “hipótese”.*

Newton estaria apresentando alguns critérios para distinguir as proposições experimentais das hipóteses. E aqui parece que o alvo do seu discurso não é somente Leibniz.

⁶³⁷ CW, p.943.

Ele está se dirigindo igualmente a todos os filósofos experimentais. Embora fosse solidamente fundamentada na experiência, ao que parece a filosofia experimental não havia desenvolvido critérios claramente definidos para avaliar se um conteúdo estava ou não de acordo com a experiência. Essa era uma das dificuldades relacionadas à filosofia experimental. Tacitamente eram admitidos como “fenômenos” aqueles conteúdos que eram imediatos e consensualmente aceitos como de acordo com a experiência; também eram aceitos como “fenômenos” aqueles enunciados que não eram imediatos, porém poderiam ser reproduzidos por meio de experimentos determinados. Mas e quanto às conclusões mais complexas? E quanto a enunciados ou proposições mais elaboradas? Quais eram os critérios para decidir se estavam de acordo com a experiência? Por meio de uma rápida inspeção em algumas polêmicas que envolviam essa decisão na época, pode-se arricar dizer que não havia qualquer critério consolidado.

No entanto, após a impressionante realização dos *Principia*, e na condição de presidente da *Royal Society*, além de certamente ser a maior persolidade da filosofia experimental da Inglaterra naquele período, Newton se sentiu autorizado para arbitrar sobre o assunto. “O que quer que não seja deduzido dos fenômenos deve ser chamado de *hipótese*”. Ele arrisca propor um critério para a filosofia experimental, definindo de um modo mais claro quais tipos de proposições poderiam ser aceitas nessa filosofia, e quais aquelas que deveriam ser consideradas como “hipóteses”. Para ser aceita na filosofia experimental, uma proposição deveria poder ser expressa como uma “dedução a partir dos fenômenos”. Uma “hipótese” seria qualquer proposição que não pode ser expressa (ou justificada) a partir dos enunciados fenomênicos que consensualmente podem ser admitidos como mantendo concordância com a experiência. Em outras palavras, uma hipótese seria qualquer proposição que não possa ser “desmontada” em silogismo básicos cujas premissas são enunciados fenomênicos, e/ou enunciados deduzidos de fenômenos, e/ou as simples regras de indução, conforme ilustrado nas sete primeiras proposições do Livro III dos *Principia*. Para usar a linguagem de Newton, qualquer proposição que não pode ser expressa dessa maneira não foi “provada pelos experimentos”. De fato, numa carta a Roger Cotes, professor plumiano de astronomia e filosofia experimental da universidade de Cambridge, e também revisor juntamente com Newton da segunda edição dos *Principia*, Newton esclareceu o sentido em que usou o termo “hipótese”, seguindo uma direção semelhante à conclusão acima apresentada:

A palavra hipótese é aqui usada por mim para denotar uma tal proposição que não é um fenômeno nem é deduzida de quaisquer fenômenos, mas assumida ou suposta sem qualquer prova experimental.⁶³⁸

Não é difícil perceber, portanto, que com as exigências da “dedução a partir dos fenômenos” e do “*hypotheses non fingo*” Newton está criando um critério para a “filosofia experimental”.⁶³⁹ Partindo dessa interpretação, a questão principal não seria o que Newton quer dizer com “hipóteses” ou “dedução a partir dos fenômenos”, mas se seria possível que um filósofo experimental seguisse esse critério antes dos *Principia*, ou seja, sem recorrer aos *princípios matemáticos* que Newton estabeleceu. Parece-me que antes dos *Principia*, supor um tal critério para a filosofia experimental seria bastante improvável. Mas outra questão talvez mais interessante seria se perguntar se o próprio Newton foi capaz de seguir esse critério. De imediato, responderia que nem mesmo ele foi capaz de cumpri-lo, rigorosamente falando. Analisadas dessa perspectiva, essas passagens do Escólio Geral se constituiriam em um critério um tanto idealizado para a filosofia experimental; um alvo a ser perseguido, típico de um filósofo com ideais de construção de uma filosofia natural demonstrativa. Nos comentários e rascunhos da *Óptica*, por exemplo, obra em que Newton não conseguiu atingir o mesmo patamar demonstrativo dos *Principia*, ele preferiu usar expressões mais módicas, como “argumento a partir dos fenômenos”, ou “conclusões tiradas dos experimentos”.⁶⁴⁰ Mas a despeito de qualquer coisa, se percebe com clareza que, seja como for, os argumentos devem estar solidamente sustentados nos fenômenos; e o ideal é que pudessem ser “deduzido a partir dos fenômenos”, como nos *Principia* se conseguiu fazer (ou quase se conseguiu).

Essa interpretação da passagem do Escólio Geral está em harmonia com o prefácio da segunda edição escrito por Roger Cotes. No seu longo prefácio, o professor plumiano de astronomia deixa claro o pano de fundo da tensão entre a filosofia experimental e a filosofia especulativa. Ele abre o seu texto afirmando que “aqueles que têm se aplicado ao estudo da ciência natural podem ser divididos em três classes”. Os filósofos escolásticos, que seguem uma doutrina “derivada de Aristóteles e dos Peripatéticos”, e que fundamentam as suas explicações em “qualidades ocultas”, estando mais preocupados com “os nomes das coisas do que com as próprias coisas”, e em inventar “jargões filosóficos” do que com o aprendizado da

⁶³⁸ *Correspondence*, vol.5, p.397.

⁶³⁹ E aqui também se esclarece porque Newton decidiu alterar a terminologia aristotélica na segunda edição dos *Principia*. Em primeiro lugar, essa alteração sinalizava a sua forte filiação com a filosofia experimental na Inglaterra, mas em segundo lugar, nessa tradição o termo “hipótese” estava aparentemente comprometido com a distinção entre uma proposição ou teoria que foi “provada” pelos fenômenos, e uma proposição que não foi “provada”. Enquanto não fosse provada pela dedução a partir dos fenômenos ela deveria continuar com o estatuto de “hipótese”.

⁶⁴⁰ Shapiro (2004) mostrou bem isso.

filosofia. Uma segunda classe de filósofos – que ele não nomeou – que devem ser louvados por rejeitarem a filosofia escolástica, e por considerarem que toda a matéria é homogênea, e que todos os corpos “são formados de partículas muito simples com atributos facilmente compreensíveis”, mas incorrem também erros semelhantes aos escolásticos. Cotes esclarece que

quando eles tomam a liberdade de imaginar os tamanhos e as formas das partículas da maneira que querem, assumindo as suas incertas posições e movimentos, e, avançando ainda mais longe, inventam certos fluidos ocultos que permeiam os poros dos corpos livremente, uma vez que são dotados de uma sutileza onipotente, e são acionados por movimentos ocultos; quando eles fazem isso, estão se desviando em *sonhos*, ignorando a verdadeira constituição das coisas, que é obviamente investigada em vão a partir de falsas *conjecturas*, quando ela dificilmente pode ser encontrada mesmo pelas mais certas observações. Aqueles que tomam por fundamento das suas *especulações* as *hipóteses*, mesmo quando eles procedem rigorosamente de acordo com as leis da mecânica, estão meramente compondo um *romance*, talvez elegante e charmoso, mas não obstante um romance.⁶⁴¹

Não é difícil perceber que essa segunda classe de filósofos que Roger Cotes se refere são aqueles que podem ser representados por Descartes e Leibniz. Com efeito, não fica qualquer dúvida acerca disso quando lemos o rascunho de uma carta de Newton a Cotes, pouco antes da conclusão das revisões da segunda edição dos *Principia*. Newton escreve:

A *filosofia experimental* reduz os fenômenos a regras gerais e considera as regras como gerais quando elas se sustentam como gerais nos fenômenos. Para objetar [essas regras] não é suficiente que se diga que um fenômeno contrário pode ocorrer; para fazer uma objeção legítima, um fenômeno contrário deve efetivamente ser produzido. A *filosofia hipotética* consiste em explicações imaginárias das coisas e argumentos imaginários a favor ou contra essas explicações, ou contra os argumentos dos filósofos experimentais fundados na indução. O primeiro tipo de filosofia é seguido por mim; o último por Descartes, Leibniz e outros.⁶⁴²

Esse rascunho é interessante por várias razões. Primeiro, porque se percebe claramente o pano de fundo da controvérsia entre a filosofia especulativa e a filosofia experimental. Nessa carta, Newton chama a filosofia especulativa de “filosofia hipotética”. Segundo, porque ele fornece uma esclarecedora delineação da “filosofia hipotética”, não deixando dúvidas que se trata da mesma filosofia considerada “especulativa” pelos seus contemporâneos adeptos da filosofia experimental. Terceiro, porque ele classifica explicitamente Descartes e Leibniz como seguidores dessa filosofia. Portanto, a segunda classe de filósofos que Cotes encaminha no seu prefácio, embora sem nomear, são aqueles representados principalmente pelos dois referidos filósofos.

⁶⁴¹ *Prefácio (2ed)*. Grifos meus.

⁶⁴² *Correspondence*, vol. 5, p. 398–390.

O professor de astronomia termina a sua classificação apresentando um terceiro grupo de filósofos, aqueles para os quais “a filosofia natural é baseada em experimentos”. Sobre essa última classe de filósofos, Cotes fornece uma esclarecedora caracterização:

Embora também defendam que a causa de todas as coisas deve ser derivada dos princípios mais simples, eles não assumem como princípio o que não tenha sido rigorosamente provados pelos fenômenos. Eles não imaginam hipóteses, e nem as admite na ciência natural a não ser como questões cuja a verdade pode ser discutida.⁶⁴³

Dessas passagem fica bastante evidente que o foco do Escólio Geral é enfatizar que a filosofia dos *Principia* é uma filosofia *experimental*, e que essa filosofia pode ser distinguida da filosofia especulativa por não “inventar hipóteses”, assumindo como princípio somente aquelas proposições que podem ser “provadas pelos experimentos”. E usando critérios mais afeitos ao ideal de uma filosofia experimental demonstrativa, como é o caso de Newton nos *Principia*, a filosofia experimental pode ser distinguida daquela hipotética em razão de todas as suas proposições poderem ser “deduzidas a partir dos fenômenos”. Esclarecidos esses detalhes do escólio de Newton, resta agora – a partir de toda a discussão precedente – apresentar última etapa do percurso proposto. Encaminhar algumas conclusões gerais sobre o “*hypotheses non fingo*” e a “dedução a partir dos fenômenos”.

13.2.3 Do *hypotheses non fingo* ao nascimento de uma ciência empírica

A partir da discussão oferecida nas seções anteriores é possível retirar algumas conclusões sobre a famosa passagem do Escólio Geral. Em primeiro lugar é possível concluir que seria um erro supor que o objetivo do quinto parágrafo do escólio é descrever o procedimento seguido por Newton no Livro III, como aparentemente Pierre Duhem e vários outros que o acompanharam interpretaram.

Duhem afirmou que “o princípio da gravidade universal, muito longe de ser derivável por generalização e indução a partir das leis observacionais de Kepler, formalmente contradiz essas leis. Se a teoria de Newton está correta, as leis de Kepler são necessariamente falsas”.⁶⁴⁴ Karl Popper seguiu a mesma linha, afirmando “que é impossível derivar a teoria de Newton tanto a partir da teoria de Galileu quanto da teoria de Kepler. Porque nem a inferência dedutiva nem a inferência indutiva podem proceder a partir de premissas consistentes para

⁶⁴³ *Prefácio (2ed).*

⁶⁴⁴ Duhem, 1991, p.193.

uma conclusão que formalmente contradiz essas premissas”.⁶⁴⁵ Embora eles tenham razão em afirmar que a gravidade universal não pode ser estritamente deduzida das leis de Kepler, ou mesmo das leis de Kepler e de Galileu, aparentemente esses filósofos levantaram essa problemática porque interpretaram a expressão “dedução a partir dos fenômenos” como uma descrição do que Newton teria feito no Livro III dos *Principia*. No entendimento deles, o então presidente da *Royal Society* estaria dizendo que “deduziu” a gravidade universal dos “fenômenos” que abrem o Livro III, que correspondem principalmente à segunda e terceira leis de Kepler. Entretanto, conforme vimos anteriormente, com a expressão “dedução a partir dos fenômenos” Newton não estava afirmando que deduziu a gravidade universal dos fenômenos de Kepler; ele estava delineando a filosofia subjacente aos *Principia*, que é uma *filosofia experimental*, que se fundamenta solidamente nos fenômenos, ou melhor, na experiência. E disso decorre que cada uma das proposições que são apresentadas no Livro III estão fundamentadas nos fenômenos e na indução.⁶⁴⁶ Agora, se a gravidade universal pode ou não ser deduzida das leis de Kepler é outro problema que não tem necessária relação com a expressão “dedução a partir dos fenômenos”.⁶⁴⁷

Da discussão das seções anteriores também é possível concluir que as “hipóteses” de que Newton fala pouco têm a ver com as “hipóteses” que supõem Laudan, Shapiro, McMullin e outros. Esses autores se reportam às “hipóteses” tomando como o referência o “método hipotético-dedutivo”; ou seja, eles estão pensando no uso de hipóteses no processo de *descoberta* na investigação da natureza. Mas de modo algum a rejeição de Newton pelas “hipóteses” pode ser confundida com a sua utilização no processo de *descoberta* na investigação do mundo natural. Newton usou abundantemente as hipóteses na investigação que culminou nos *Principia*. Não pode haver a menor dúvida sobre isso. Foi o teste da hipótese de Hooke – que um movimento orbital poderia ser representado pela composição de dois movimentos, um inercial e outro centrípeto – que resultou na construção da geometria mecânica de forças discutida nas partes 1 e 2 desse trabalho. Foi o teste da hipótese de que a proporção da força centrípeta dos planetas obedece a lei do inverso do quadrado da distância que resultou no tratado *De Motu* e nas três primeiras seções do Livro I. Foi o teste da hipótese da ação do Sol sobre a Lua que resultou nos estudos relativos ao problema dos três corpos, e nos estudos das “órbitas giratórias”, que forneceram os resultados sobre o movimentos dos

⁶⁴⁵ Popper, 1983, p.140.

⁶⁴⁶ Além disso, é bastante questionável que o sentido que esses filósofos do séc. XIX e XX estava entendendo a “dedução” era próximo daquele aplicado por Newton, inspirado no organon aristotélico, e ainda com certa dose de relativização.

⁶⁴⁷ Veja Barra, 2017.

apsides das órbitas planerárias. Foi o teste da hipótese de que a força da gravidade era a causa da força centrípeta da Lua que resultou na proposição 4 do Livro III, e no famoso “teste da Lua”. Foi o teste da hipótese dos vórtices e da hipótese vibratória para a causa da gravidade que resultou nos estudos do Livro II. Foi o teste da hipótese do magnetismo para a causa da gravidade que resultou nos estudos da seção 11 do Livro I. Foi o teste da hipótese da gravidade do todo surgir da gravidade das partes que resultou nos estudos da seção 12 do Livro I. E mesmo no Escólio Geral, no último parágrafo, Newton conclui os *Principia* oferecendo uma nova hipótese para a causa da gravidade por meio de algum tipo de “espírito” ou fenômeno elétrico.

Não é sem razão que Blake defendeu – ainda que talvez de uma forma um tanto exagerada – que Newton foi o “fundador do método hipotético-dedutivo”. Todavia, ainda que não o tenha sido, certamente foi um dos mais hábeis manipuladores desse procedimento.⁶⁴⁸ Portanto, não haveria nada mais distante da realidade do que supor que com o *hypotheses non fingo* Newton estivesse rejeitando o uso da hipóteses na investigação do mundo natural. No debate entre Newton e Leibniz no Escólio Geral não está em questão a legitimidade do uso de hipóteses durante o processo de investigação da natureza. O que está em questão é a *aceitação* dessas hipóteses. Ou, a admissão dessas hipóteses sem que hajam sólidos fundamentos empíricos que a sustentem; sem que haja qualquer “comprovação” da experiência. Usando uma linguagem mais familiar à filosofia da ciência contemporânea, o problema não seria o uso das hipóteses no “contexto de descoberta”, mas a sua aceitação no “contexto de justificação”.⁶⁴⁹ No contexto de justificação elas só poderiam ser aceitas caso fossem testadas e “comprovadas”.⁶⁵⁰ A última sentença do Escólio Geral deixa esse ponto cristalino. Ao fornecer alguns detalhes sobre a hipótese elétrica para a causa da gravidade, Newton termina com a seguinte adversativa: “mas essas coisas não pode ser explicadas em poucas palavras; além disso, não há um número suficiente de experimentos para determinar e demonstrar precisamente as leis que governam as ações desse espírito”. Para testar a hipótese da causa elétrica da gravidade, Newton precisaria ter mais informações sobre as leis que governam os fenômenos elétricos. Na ausência dessas informações, essa hipótese deveria continuar com esse estatuto, e a causa da gravidade, sendo considerada como desconhecida.⁶⁵¹

⁶⁴⁸ Blake, 1960a. Veja também Laudan, 2001, p.44.

⁶⁴⁹ Reinchenbach, 1938.

⁶⁵⁰ Os critérios para “comprovação” ou “confirmação” de uma hipótese serão discutidos somente no capítulo 18 do volume II.

⁶⁵¹ Isso significa que à exemplo de Hooke, Newton admitia as “hipóteses” como “questões” ou como “guias de pesquisa”. A esse respeito vale lembrar que a *Óptica* possui uma parte especulativa que é intitulada “Queries”

Ora, as observações do parágrafo anterior nos levam a outra conclusão importante. As considerações de Newton sobre o *hypotheses non fingo* e a “dedução a partir dos fenômenos” têm contornos muito mais *epistemológicos* do que *metodológicos* (no sentido que hoje entendemos tanto a epistemologia quanto a metodologia da ciência). Em outras palavras, para Newton as “hipóteses” são proposições que não tem o mesmo *nível epistemológico* que os “fenômenos”, ou que as proposições que foram “deduzidas dos fenômenos”. Acerca disso é pertinente notar outro detalhe no debate entre Newton e Leibniz. O debate entre os dois pensadores continua, mesmo após o Escólio Geral ter sido publicado, por meio de cartas a outros interlocutores. Uma análise do conteúdo dessas cartas revela que a discussão se resume em torno da questão: pode a exigência da explicitação de um “mecanismo” de ação de uma causa servir como objeção para a gravidade universal? Newton defende que não. Leibniz defende que sim.⁶⁵² Para Newton, a elucidação do mecanismo da gravidade só pode ser oferecido com base nos fenômenos. Se no momento não há experimentos que permitam esclarecer o suposto mecanismo, devemos manter silêncio a esse respeito. Admitir *a priori* que todos os fenômenos devam obrigatoriamente ser explicados pelo mecanismo conhecido do *contato*, e que não possa haver qualquer outra forma de interação dele distinto na natureza, é uma *hipótese*, e portanto não pode ser usada como objeção de uma teoria que já foi provada pelos fenômenos.⁶⁵³ Essas duas propostas simplesmente não estão no mesmo nível epistemológico para serem comparadas.⁶⁵⁴

A conclusão acima também está subentendida no comentário à Regra 3, discutido no capítulo 12. Newton declara: “Certamente fantasias inventadas aleatoriamente não devem ser sustentadas contra a evidência dos experimentos (...)”. Uma vez que esse texto é da segunda edição, deve haver poucas dúvidas que o que Newton tem em mente quanto se refere a “fantasias inventadas aleatoriamente” são as mesmas “hipóteses” que ele enfatiza que não

(Questões). Mas o que é admitir uma hipótese como “guia de pesquisa” senão assumi-la como uma hipótese para ser testada?

⁶⁵² As observações de Leibniz foram estão em Leibniz, 1722. Parte das respostas de Newton foram publicadas no *Commercium Epistolicum* (Newton, 1983). Veja também Shapiro, 2004.

⁶⁵³ Newton não defendeu que a gravidade atua sem qualquer mecanismo, como Leibniz o acusou em sua carta. Ele apenas não tinha informações empíricas suficientes para chegar a uma conclusão a respeito disso, como procurou esclarecer posteriormente no Escólio Geral. No *Commercium Epistolicum* isso fica ainda mais claro. Ele declara em terceira pessoa que Newton “não afirma se a causa da gravidade é mecânica ou não é mecânica (...)”, afirma, na verdade, que as conclusões surgem da “evidência que emerge dos experimentos e fenômenos, e enceram quando se carece de tais evidências (...)”. Newton, 1983, p.312.

⁶⁵⁴ Mas Newton também leu mau as observações de Leibniz. Aparentemente, o filósofo alemão não estava defendendo que todos os fenômenos deveriam necessariamente ser explicados pelo contato (ou percussão), mas que um mecanismo inteligível fosse fornecido. Sem o esclarecimento desse mecanismo não estaríamos diante de uma legítima explicação, e atribuir a causa a uma propriedade primária ou a Deus era um subterfúgio ainda pior do que simplesmente declarar que desconhece o mecanismo. Veja a carta completa do filósofo alemão em Leibniz, 1722.

inventa no Escólio Geral. Por conseguinte, ele está afirmando que uma “hipótese” não pode ser sustentada contrariamente a uma proposição evidenciada pela experiência. Ou em outros termos, uma “hipótese” não pode se comparada a essa última proposição; não tem o mesmo nível epistemológico que ela. Não pode ser considerada como *conhecimento*, estritamente falando.

O mesmo tema também pode ser percebido no rascunho da carta à Roger Cotes que foi citado anteriormente, que agora merece ser lido a partir dessa perspectiva do desnível epistemológico entre as hipóteses e as proposições sustentadas nos fenômenos:

A filosofia experimental reduz os fenômenos a regras gerais e considera as regras como gerais quando elas se sustentam como gerais nos fenômenos. *Para objetar [essas regras] não é suficiente que se diga que um fenômeno contrário pode ocorrer; para fazer uma objeção legítima, um fenômeno contrário deve efetivamente ser produzido.* A filosofia hipotética consiste em *explicações imaginárias* das coisas e argumentos imaginários a favor ou contra essas explicações, ou contra os argumentos dos filósofos experimentais fundados na indução.⁶⁵⁵

Nessa carta Newton esclarece que somente um “fenômeno contrário” pode servir como uma “legítima objeção” para uma proposição ou uma “regra” que também é retirada dos fenômenos. Nenhuma “hipótese”, nem mesmo um fenômeno imaginado (ou possível) pode ser mobilizado contra um argumento sustentado nos fenômenos. Na filosofia experimental esses dois tipos de enunciados não estão em nível de igualdade.

E um último texto que se relaciona tanto com o comentário da Regra 3 quanto com o rascunho da carta para Roger Cotes é o enunciado da Regra 4, que, como já sabemos, foi inserida na terceira edição dos *Principia* (1726). Vale a pena citar novamente:

Na filosofia experimental, as proposições formuladas por indução a partir dos fenômenos coletados devem ser consideradas como exatamente verdadeiras, ou aproximadamente verdadeiras, *não obstante qualquer hipótese contrária*, até que outros fenômenos tornem essas proposições ou mais exatas ou sujeitas a exceções.⁶⁵⁶

Nenhuma “hipótese contrária” pode abalar as “proposições formuladas por indução a partir dos fenômenos”, ou simplesmente as proposições sustentadas pela experiência, que devem ser consideradas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras. Na filosofia experimental somente “outros fenômenos” podem servir como objeção, e ainda assim uma única objeção não poderia desfazer uma proposição derivada da indução.⁶⁵⁷

⁶⁵⁵ *Correspondence*, vol. 5, p. 398–390. Grifos meus.

⁶⁵⁶ Regra 4. Grifos meus.

⁶⁵⁷ Veja mais sobre isso no volume II.

Essas observações se alinham, evidentemente, com o debate entre Leibniz e Newton. A “hipótese mecânica” – a hipótese que todas as causas na natureza devem necessariamente ser explicadas pelo mecanismo do *contato* – não pode ser usada como objeção à gravitação universal. Leibniz insiste que, de qualquer modo, esse princípio de atração mútua não foi deduzido dos fenômenos e isso leva Newton a introduzir a substituir a “Hipótese 3” pela Regra 3 na segunda edição, reconstruindo no comentário a essa regra a última inferência que culminou na gravitação universal. Aparentemente, o objetivo de Newton nessa regra era enfatizar que a inferência que levou à proposição 7 do Livro III realmente foi obtida pela indução, o que não havia ficado claro na primeira edição.

Essas evidências são suficientes para mostrar que a polêmica sobre o *hypotheses non fingo*, e a “dedução a partir dos fenômenos” tem contornos mais epistemológicos do que metodológicos. Mas essa conclusão também sugere outra igualmente relevante. A própria controvérsia entre a *filosofia experimental* e a *filosofia especulativa* tem contornos mais epistemológicos do que metodológicos.

Anstey reconheceu que é tentador enxergar a distinção entre a filosofia experimental e filosofia especulativa como equivalente à distinção contemporânea entre empirismo e racionalismo.⁶⁵⁸ Mas é preciso notar que, tomadas como categorias de pesquisa, a filosofia experimental e especulativa são necessariamente mais amplas e complexas que as categorias do empirismo e racionalismo. A filosofia experimental, por exemplo, abrange um universo maior de conteúdos do que a *filosofia empirista*, pois se trata da própria filosofia natural que era praticada na Inglaterra, em todos os seus múltiplos aspectos. O hoje chamado *empirismo moderno* representa apenas um recorte do aspecto epistemológico dos debates da época. Com efeito, foi a filosofia empirista que nasceu da filosofia experimental, e não o contrário. Foram os filósofos naturais ingleses, na sua rejeição pela filosofia natural escolástica e especulativa que promoveram uma ampla reforma a filosofia natural buscando fundamentá-la solidamente na experiência. O empirismo inglês de Locke, Berkeley e outros surgiu da tentativa de fundamentar esse movimento. Mas ainda que a filosofia natural experimental e a filosofia chamada especulativa sejam movimentos mais amplos e complexos que o empirismo e racionalismo, ao que parece o ponto central da controvérsia repousava mais sobre os aspectos epistemológicos da questão. Que tipo de conhecimento poderia ser considerado legítimo, ou qual deles tinha primazia sobre o outro. Ainda que nem todos os filósofos experimentais

⁶⁵⁸ Anstey, 2005.

fossem contra a especulação, a grande maioria buscava ao menos uma nítida separação entre a especulação e os conhecimentos da experiência.⁶⁵⁹

Em face da conclusão do último parágrafo é possível chegar, agora, em outra que talvez seja a mais importante dessa seção. O debate entre a filosofia experimental e a filosofia especulativa na Inglaterra moderna representa o surgimento de uma nova forma de investigação da natureza, que se opunha tanto à filosofia natural escolástica quanto à filosofia natural representada por Descartes e Leibniz. A nova forma de investigação da natureza representada pela filosofia experimental era caracterizada por uma oposição principalmente à indistinção entre as hipóteses e os conhecimentos da experiência no processo de construção dos conhecimentos sobre a natureza.

Não há dúvida de que tanto Descartes quanto Leibniz tinham na mais alta importância os conhecimentos derivados da experiência. Todavia não há dúvidas também que eles não tinham qualquer constrangimento em ingressar em especulações quando os conhecimentos da experiência atingiam os seus limites. Não obstante, para os filósofos experimentais – de maneira geral – esses domínios precisavam ser nitidamente distinguidos, e não poderiam ser considerados num mesmo nível epistemológico. Ao misturarem indiscriminadamente esses dois domínios, Descartes e Leibniz se tornavam tão inadequados quanto os escolásticos. A filosofia experimental inglesa, portanto, representava uma nova abordagem metodológica no estudo da natureza que distinguia e restringia o ingresso de especulações na investigação das coisas naturais, reconhecendo essas especulações somente como “hipóteses” potencialmente confirmáveis, mas que até passarem pelo rígido crivo da experiência não desfrutariam do mesmo estatuto epistemológico que as demais proposições consideradas “comprovadas” empiricamente. Essa caracterização sugere fortemente que esse novo modo de investigação da natureza – que se opunha tanto à filosofia natural escolástica quanto à filosofia natural moderna do continente – está muito mais próximo do que hoje certamente chamaríamos “ciência empírica”. Uma forma de investigação que procura se fundamentar rigorosamente na experiência, que admite somente os conhecimentos que se submetem a esses critérios, e que persegue o ideal de uma rígida distinção e separação dos conhecimentos da experiência e daqueles da especulação filosófica. Aparentemente – e reconheço isso não sem uma certa surpresa – a tensão entre a filosofia experimental e a filosofia especulativa dos modernos são as primeiras manifestações da separação entre a própria *filosofia* e aquilo que veio a ser chamado nos séculos que se seguiram aos *Principia de ciência natural*.

⁶⁵⁹ Boyle, por exemplo, não se opunha as especulações, mas nitidamente as distinguia dos conhecimentos experimentais, e as conferia um papel de auxiliar no projeto da filosofia experimental.

As observações precedentes certamente nos levam a uma reinterpretação significativa do *hypotheses non fingo*. Essa sentença não seria mais do que uma declaração que hoje poderia ser traduzida como: *eu faço ciência ‘empírica’*. *A especulação, seja da antiga filosofia natural, seja da filosofia que alguns continuam fazendo, não tem lugar nesse novo modo de investigar a natureza.*

No Escólio Geral, Newton estaria simplesmente reafirmando o seu compromisso com esse novo modo de investigar a natureza que se desenvolveu na Inglaterra do séc. XVII, ao qual ele aderiu desde o início da sua carreira nas décadas de 1660-1670. Os pronunciamentos do *hypotheses non fingo* e da “dedução a partir dos fenômenos” seriam faces da mesma moeda da filosofia experimental (ou da *ciência empírica*) e de fato são coerentes com o projeto dos *Principia* desde o seu primeiro esboço no *Lectiones Opticae*. O ideal de filosofia natural “livre de hipóteses” não passa de um ideal de separação da especulação filosófica da ciência da natureza. Pouco tem a ver com o método hipotético-dedutivo.⁶⁶⁰ Isso significa que quando Laudan, McMullin e outros sugerem que o sucesso dos *Principia* gerou uma euforia anti-hipoteticista nos filósofos naturais ingleses do séc. XVIII (associando esse anti-hipoteticismo com o método hipotético dedutivo), percebe-se que ou eles não compreenderam que essa euforia anti-hipoteticista estava mais ligada a um movimento anti-filosofia na ciência natural, ou, foram os filósofos naturais ingleses das gerações seguintes aos *Principia* que não compreenderam os pronunciamentos de Newton no Escólio Geral. Sou mais propenso a optar pela primeira possibilidade, admitindo que a euforia desses filósofos era mais pelos primeiros sinais de vida daquilo que hoje chamamos de “ciência” do que propriamente pelos *Principia*, que foi mais um impulsionador desse movimento que já existia antes dele.⁶⁶¹ Não obstante, há motivos para acreditar que essa euforia se intensificou principalmente após o tratado de Newton.

Aparentemente, a filosofia experimental padecia do mesmo problema que as matemáticas mistas. Havia uma certa dificuldade em abordar o principal tema relativo ao estudo da natureza, qual seja, a *causa* dos fenômenos naturais. Relembrando das lições de Barrow sobre Aristóteles, uma discussão apenas é verdadeiramente *científica* se discorrer sobre a *causa* das coisas.⁶⁶² Evidentemente, esse preceito poderia ser direcionado não apenas para as matemáticas mistas, mas também para a própria filosofia experimental. Era muito

⁶⁶⁰ A relação exata do método de Newton com o procedimento H-D é esclarecida no capítulo 18 do volume II.

⁶⁶¹ Anstey (2005), por exemplo, afirma que McMullin ignorou a distinção moderna entre filosofia experimental e especulativa anterior aos *Principia*.

⁶⁶² Interpretando Aristóteles, também Sanderson, Smith, entre outros ensinavam que “ciência” é o conhecimento da *causa* das coisas.

difícil – quiçá impossível – discutir a causa de qualquer coisa sem entrar na via especulativa. Esse parece ser o entendimento de Descartes, Leibniz, Boyle, entre outros. Nenhum deles negava a importância da experiência na filosofia natural, e no caso de Boyle até a considerava em primeiro plano, mas de todo modo as *causas* dos fenômenos naturais simplesmente pareciam inacessíveis à experiência imediata. Assim, para filósofos como Descartes a filosofia experimental na sua versão mais radical simplesmente não teria o componente *científico* mais fundamental e, portanto, não desfrutaria do estatuto de uma genuína filosofia natural.⁶⁶³ No entanto, os *Principia* mostraram sobretudo que a filosofia genuinamente experimental pode avançar para uma análise das *causas* dos fenômenos sem recorrer à especulação, e isso mesmo em se tratando de causas inacessíveis à experiência imediata. Isso seria possível de ser feito com o auxílio da matemática. Conforme foi mostrado na seção 1.3, havia um debate sobre a cientificidade da matemática desde o século XVI, e para matemáticos como Barrow e Hobbes, por exemplo, não havia dúvidas de que a matemática envolvia o conceito de *causa*. Portanto, os filósofos experimentais com ideais demonstrativos acreditavam que a matemática poderia ser empregada com sucesso para “demonstrar” as *causas* dos fenômenos sem que fosse necessário o recurso à especulação. Os *Principia* foram precisamente a prova que os filósofos experimentais ingleses precisavam de que esse projeto era viável. A prova de que a filosofia experimental era uma genuína *ciência da natureza*, capaz de discutir sobre as causas dos fenômenos, e poderia conquistar a sua emancipação da filosofia especulativa. É compreensível, portanto, que a “euforia” dos filósofos experimentais pelo surgimento dessa nova *ciência empírica* tenha se intensificado sobretudo depois dos *Principia*. O projeto de uma ciência natural empírica livre da especulação filosófica foi impulsionado e estabelecido pelo sucesso do tratado de Newton.

Mas acerca de como, exatamente, Newton construiu essa ciência empírica o Escólio Geral pouco informa. E mesmo quando fala em “deduzir dos fenômenos”, a ênfase de Newton parece recair sobre os “fenômenos”, e não sobre o “deduzir”. Recai mais sobre o aspecto *empírico* do seu trabalho.

A essa altura estamos em condições de retornar ao início da seção em que introduzi essa discussão sobre o parágrafo “metodológico” do Escólio Geral (seção 13.1). Naquele ponto havia sido mencionado, em primeiro lugar, que os pronunciamentos desse escólio de fato eram coerentes com o programa de Newton nos *Principia*. Mas em segundo lugar mencionei que os elementos destacados no Escólio Geral tinham menos o objetivo de

⁶⁶³ A carta de Descartes a Mersene sobre Galileu citada no primeiro capítulo é significativa a esse respeito. A análise de Galileu não era satisfatória, para Descartes, porque falhava em explicar a causa das coisas.

descrever os *Principia* do que descrever a sua filosofia experimental subjacente. Ou seja, o consagrado texto conclusivo foca sobretudo no caráter empirista da obra, e em face do que foi exposto anteriormente podemos compreendê-lo como uma das mais contundentes declarações a favor da separação entre a filosofia especulativa e ciência empírica na história da ciência. Ainda assim, nem o discurso e nem o projeto da *ciência empírica* foram originados por Newton. O aspecto mais original na obra de Newton está no *como* ele concretizou esse projeto que outros já perseguiam. É isso que tentarei resumir no próximo capítulo.

14 O MÉTODO DA ANÁLISE E SÍNTESE DOS *PRINCIPIA*

14.1 O PREFÁCIO À SEGUNDA EDIÇÃO E O MÉTODO DA ANÁLISE E SÍNTESE

No prefácio à segunda edição dos *Principia*, Roger Cotes apresentou um longo e bastante instrutivo resumo de quase 15 páginas sobre essa obra. No entanto, antes de apresentar o resumo, ele se propôs a fazer algumas breves considerações sobre a abordagem de Newton, ressaltando que algumas coisas precisavam ser ditas acerca do “método dessa filosofia”. Nessa seção, interessa-nos justamente essas considerações iniciais de Cotes sobre o método. Parte dessas considerações já foram apresentadas no fim do capítulo anterior. Em primeiro lugar, ele distingue as três classes de filósofos que estudam a natureza: os *filósofos escolásticos*, os *filósofos especulativos* e os *filósofos experimentais*. Em segundo lugar, ele esclarece a epistemologia empirista dos filósofos experimentais, enfatizando que eles se fundamentam unicamente na experiência e não imaginam hipóteses. Por fim, ele enfatiza que os filósofos experimentais “procedem por um método duplo: analítico e sintético”. Essa última parte é a que não foi mencionada anteriormente, e que agora convém apresentar. Referindo-se ao método analítico e sintético dos filósofos experimentais, Cotes afirma:

A partir de certos fenômenos selecionados eles deduzem pela análise as forças da natureza e as mais simples leis dessas forças, a partir das quais fornecem, então, a constituição do restante dos fenômenos pela síntese. Esse é um modo incomparavelmente melhor de filosofar que o nosso celebrado autor considerou que deveria abraçar em preferência de todos os outros. Somente esse [método] julgou digno de ser cultivado e enriquecido pelo dispêndio do seu trabalho. Acerca desse método de filosofar, portanto, ele forneceu o mais ilustre exemplo, a saber, a explicação do sistema do mundo deduzido com sucesso da teoria da gravidade. Que a força da gravidade agia em todos os corpos universalmente outros já tinham suscitado e imaginado, mas Newton foi o primeiro e o único que foi capaz de demonstrá-lo a partir dos fenômenos, e assim estabelecer essa teoria sobre uma sólida fundação.⁶⁶⁴

Essa passagem é a única parte dos *Principia* em que surge uma referência explícita ao método da análise e síntese. Embora o próprio Newton não o tenha feito, não há qualquer dúvida de que essa observação de Cotes é coerente com o que Newton professava. São vastos os manuscritos e mesmo textos publicados em que ele menciona expressamente esse método.⁶⁶⁵ E como foi mostrado na seção 2.7.1, a descrição de Newton acerca do procedimento que iria seguir no Livro III, partindo dos fenômenos dos movimentos para as forças, e em seguida das forças para os movimentos também estava plenamente de acordo

⁶⁶⁴ Prefácio (2ed).

⁶⁶⁵ Basta mencionar a famosa passagem da questão 31 da *Óptica*. Na sequência ela será citada.

com a concepção geral do conhecido método. Não há dúvidas, portanto, que ele seguiu esse método. Resta agora oferecer alguns detalhes adicionais sobre esse procedimento.

O assim chamado “método da análise e síntese” é um procedimento que era utilizado pelo menos desde a antiguidade.⁶⁶⁶ Alguns historiadores relacionam o seu surgimento com Platão, num contexto que estaria relacionado com a geometria. Portanto, um método ligado originalmente com a geometria grega. Mas é possível que as suas origens sejam ainda anteriores a Platão, e não necessariamente ligadas à geometria, podendo apenas ter se notabilizado mais na aplicação nesse campo. A etimologia do termo grego “análise” (*analyzein*) está relacionado com “dissolver”, “quebrar em partes”. No *Concise Oxford Dictionary of Etymology*, por exemplo, o verbete “análise” é definido como a decomposição “em elementos mais simples (opp. *síntese*)”. No *Oxford Dictionary of Philosophy*, a “análise” é definida como “o processo de quebra de um conceito em partes mais simples, de modo que a estrutura lógica seja mostrada”.⁶⁶⁷ Essas definições não são incompatíveis com a geometria, uma vez que muitos dos problemas geométricos antigos se resumiam em determinar o modo de construção de uma figura geométrica que já era perfeitamente discernida pela razão. A resolução do problema envolvia, naturalmente, a decomposição da figura em partes que a constituem, seguida da sua posterior construção exata. Mas se o método da análise e síntese surgiu como um método matemático, ou se era um método geral e foi aplicado à matemática, ou ainda se era uma forma intuitiva de investigar as coisas e se transformou posteriormente num método formal, é uma questão a se investigar, e aqui não haverá condições de aprofundar. Basta saber que é um método antigo, e que desde muito cedo estabeleceu suas relações com a matemática.

Além disso, vale a pena mencionar que Aristóteles fez várias vezes analogias do método da análise e síntese com a investigação na filosofia natural, e com a forma como conhecemos as coisas. Novamente, se de fato se tratava de uma mera analogia com um método matemático, ou se o próprio método à época não era restrito à matemática requer maiores pesquisas. Mas o fato é que Aristóteles fez essas relações, e aparentemente esse movimento gerou a formação de uma tradição de filósofos escolásticos que aplicavam o método da análise e síntese na filosofia natural. A primeira menção explícita a esse método foi feita pelo filósofo escolástico inglês Robert Grosseteste (1168-1253), que fez extensivos comentários às obras de Aristóteles, e que o traduziu como “*Resolutio*” e “*Compositio*”, em

⁶⁶⁶ Não haverá condições de oferecer uma discussão detalhada desse método e das suas origens. Para mais detalhes o leitor poderá consultar por exemplo Hittinka e Remes, 1974; e Otte e Panza, 2001. Aqui oferecerei um breve sumário.

⁶⁶⁷ Otte e Panza, 2001.

latim.⁶⁶⁸ Roger Bacon (1220-1292) – discípulo de Grosseteste – reconheceu também o papel da experiência e a importância da matemática nesse método, e propôs um projeto que envolvia uma espécie de fusão entre o aristotelismo e o platonismo (ou pitagorismo), que foi mais adiante adotado por Galileu e teve efeitos significativos durante a revolução científica.⁶⁶⁹ Do séc. XIII ao início do século XVII houve uma proliferação de tratados de lógica, e esses tratados consideravam o método da análise e síntese de modos muito variados, cada autor recriando à sua maneira esse método sob as mais diversas inspirações, alguns inspirados pelo neoplatonismo, outros fundamentados no *Organon* aristotélico, outros incorporando uma orientação mais empiristas, outros ainda, uma orientação demonstrativa. No início do séc. XVII já haviam dezenas desses tratados nas universidades britânicas, cada qual apresentando a sua própria concepção de análise e síntese. Para alguns, a análise era um método de descoberta e a síntese um mero método de ensino ou apresentação; para outros a síntese não era mera apresentação da análise, mas uma etapa que também oferecia novas informações. Para alguns, no momento da apresentação a análise poderia ser descartada; para outros a análise não poderia ser descartada. E assim por diante.

Evidentemente, surgem algumas questões diante dessa ampla delineação do método da análise e síntese. Pelo menos quatro dessas questões me interessam particularmente aqui, embora os limites desse volume não permitam um grande aprofundamento em cada uma delas. Vale, ao menos, esboça-las. Primeiro, qual é o paralelo que se pode fazer entre o método da análise e síntese na tradição matemática e na tradição da filosofia natural? Segundo, o que a diversidade de concepções do método da análise e síntese na tradição da filosofia natural tinham em comum? Terceiro, entre as diversas concepção de análise e síntese vigentes na filosofia natural no séc. XVII, qual delas Newton seguia, ou pelo menos mais o inspirou? E por fim, quarto, qual era o entendimento que o próprio Newton tinha do método da análise e síntese, e das relações desse método na matemática e na filosofia natural?

Vários comentadores tentaram mostrar que a inspiração de Newton na sua concepção de análise e síntese na filosofia natural foi Pappus e Euclides.⁶⁷⁰ De fato, não há dúvidas que essas foram as suas fontes na tradição matemática, como Guicciardini bem mostrou.⁶⁷¹ No entanto, é questionável que esses autores tenham sido as suas principais influências também na filosofia natural. J. E. McGuire and Martin Tamny, por exemplo, sugeriram que Newton

⁶⁶⁸ Crombie, 1953, p.52-66. Veja também Losee, op. cit., p.28.

⁶⁶⁹ *The Opus Majus*, parte IV. Veja também Fisher, 1971, p.375.

⁶⁷⁰ Veja Hintikka e Remes, 1974, p. 107–108. Westfall, 1980, p.377–381; Dear, 1995, p. 240; Ducheyne, 2012, p.6.

⁶⁷¹ Guicciardini, 2009.

provavelmente se familiarizou com o método da análise e síntese, num contexto filosófico, com os *Elementos de Filosofia*, de Thomas Hobbes (1656). E, de fato, no capítulo intitulado “Sobre o Método”, Hobbes discorre acerca do método analítico e sintético, e usa uma linguagem que é muito próxima à linguagem de Newton. Ele afirma que esse método é “o menor caminho para encontrar os Efeitos por meio das suas Causas conhecidas, ou as Causas por meio dos Efeitos conhecidos”.⁶⁷² Especificamente, o “método analítico”, ou o “método da invenção” é o processo pelo qual se investiga as causas desconhecidas a partir de determinadas “aparências” ou “fantasmas” (*phantasm*), que são efeitos conhecidos; o “método sintético”, ou “método da demonstração”, é o processo no qual tentamos mostrar “de que maneira particular as causas devem ser compostas para a produção de um certo efeito”. Mas como destacou Ducheyne, embora seja possível que Newton tenha se inspirado em Hobbes, não há qualquer evidência histórica de que ele tenha lido os *Elementos de Filosofia*. Por outro lado, Ducheyne mostra que há outras obras que discorrem sobre o método na análise e síntese que inequivocamente Newton estudou no seu período de formação em Cambridge.⁶⁷³ Dentre essas obras, ele destaca *Aditus ad Logicae*, de Samuel Smith (1613), como o texto que mais se assemelha aos pronunciamentos de Newton. Maurizio Mamiani também mostrou que Newton certamente estudou *Logicae Artis Compendium*, de Robert Sanderson (1615), e que esta obra o influenciou, pelo menos na composição das *Regras para Filosofar*. Essas duas obras de lógica e método tem significativas semelhanças com o projeto de Newton nos *Principia*. Adiante se apresentará uma sinopse dessas obras, mas antes disso comecemos perguntando sobre a diferença (ou a semelhança) entre o método da análise e síntese na matemática e na filosofia natural.

Suscintamente, o que caracteriza o método da análise e síntese na matemática, e o que o caracteriza na filosofia natural? A compreensão e caracterização do método da análise e síntese na matemática moderna tem como sua principal fonte o Livro 7 da *Collectio* de Pappus. Numa enigmática passagem, Pappus procura esclarecer o método da análise dos antigos, e acaba fornecendo uma delineação desse procedimento na geometria:

⁶⁷² Hobbes, 1656, p.48-49; ou Hobbes, 1994, p. 65-66. Veja também, Jesseph, 2006.

⁶⁷³ Ele consultou a biblioteca de Newton e analisou as anotações e grifos que o próprio matemático fez nos livros. Ducheyne, 2012, p.6-18.

Isso que é chamado de *Domínio da Análise* (...), tomado como um todo, é um recurso especial que foi preparado (...) para aqueles que querem adquirir uma capacidade para resolver problemas na geometria (...). A sua abordagem é por análise e síntese. A análise é o caminho daquilo que se busca, como se já estivesse estabelecido, pela via de suas consequências, até aquilo que está estabelecido pela síntese. Em outras palavras, na análise nós assumimos o que é procurado como se já estivesse sido alcançado, e se procura pela coisa da qual isso se segue, e, em seguida, pelo que vem antes disso, e assim regredindo até que se chegue a algo que já é conhecido, ou que ocupe a posição de primeiro princípio. Nós chamamos este tipo de método “análise”, ou como se diz *anapalin lysis* (redução regressa). Na síntese, de maneira inversa, nós assumimos o último resultado da análise como já alcançado, e, dispondo agora na ordem natural, como precedente o que antes foi consequente, e ajustando-os uns aos outros, nós chegamos ao fim da construção daquilo que se buscava. É isso que chamamos de síntese.⁶⁷⁴

Embora a interpretação da passagem não seja simples, nela é possível compreender várias facetas do método da análise e síntese na geometria dos antigos. Em primeiro lugar, é possível compreender que na tradição geométrica antiga a “análise” era um *método de descoberta*, ou um método de resolução de problemas (“um recurso especial para aqueles que querem adquirir capacidade para resolver problemas na geometria...”). Em segundo lugar, a análise aparentemente funcionava no sentido inverso da “ordem natural”, partindo daquilo que é “procurado” (como se conhecido estivesse) para aquilo que é dado, ou “conhecido”. Em terceiro lugar, a síntese simplesmente invertia os passos da análise, seguindo, portanto, o sentido natural: partia daquilo que então havia sido descoberto, e por meio de consequências, chegava naquilo que era buscado, ou desconhecido. E em quarto lugar, somente a síntese tinha o rigor da prova. Ou seja, depois de descoberta a solução pela análise, essa etapa não entrava na demonstração; somente a síntese era necessária.

Diante das considerações de Pappus é tentador entender a etapa da análise como semelhante a “técnica” comum pela qual um matemático, ao se deparar com um difícil problema, tenta encontrar a solução invertendo o sentido da resolução natural, partindo da resposta já conhecida, ou suposta, em direção aos dados iniciais do problema. E após encontrar a resposta, que leva precisamente aos dados conhecidos inicialmente, ele inverte a ordem de apresentação descartando o procedimento previamente feito que tinha uma função meramente de “descoberta” da solução correta. Ainda que a análise não seja precisamente essa “técnica”, acredito que guarda uma analogia significativa com ela.

Esboçado o método da análise e síntese na matemática, cabe agora perguntar quais seriam as diferenças com sua contraparte na filosofia natural. Ducheyne oferece um ótimo resumo do que ele chama de “importante assimetria” entre a análise e síntese na tradição matemática e na filosofia natural. Ele afirma que “na tradição matemática a análise consiste

⁶⁷⁴ Pappus, Book 7 of the *Collection*, p. 82–84, apud Guicciardini, 2009, p. 34.

em raciocinar a partir do que é procurado em direção ao que é conhecido”.⁶⁷⁵ Na tradição de filosofia natural a análise “consiste em raciocinar a partir do que é conhecido, o efeito, para o que é procurado, a causa”.⁶⁷⁶ Na tradição matemática a análise “é considerada útil apenas no nível heurístico e não no nível de demonstração”.⁶⁷⁷ Na concepção de Newton da análise e síntese na filosofia natural “tanto a análise quanto a síntese são métodos de demonstração”.⁶⁷⁸ Por fim, na tradição matemática “a síntese é simplesmente o reverso da análise”.⁶⁷⁹ Na filosofia natural, “a síntese não é simplesmente a reversão da análise”, uma vez que diferentes informações podem surgir nessa etapa.⁶⁸⁰

Pela interpretação de Ducheyne é difícil estabelecer uma analogia direta entre a análise e síntese na matemática e na filosofia natural. Embora é certo que há alguns paralelos evidentes (os métodos têm duas etapas, uma etapa é pelo menos aproximadamente o reverso da outra, etc), tanto a análise quanto a síntese parecem seguir em direções diametralmente opostas nesses dois campos do conhecimento. Na matemática, por exemplo, a análise parte do desconhecido para o conhecido; na filosofia natural, do conhecido para o desconhecido. Mas aqui cabe um questionamento. É no mínimo extravagante o entendimento que na análise (da tradição matemática) se parte daquilo que alguém “procura” em direção ao que é conhecido. Como alguém pode partir do que procura (e, portanto, não conhece) para aquilo que é conhecido? Ou seja, como alguém pode partir do que é desconhecido para o que é conhecido? Como isso seria possível? Naturalmente, só pode haver duas possibilidades. A primeira possibilidade é que na análise se supõe uma hipótese para o desconhecido e se procura chegar ao conhecido. Quando a hipótese for correta os passos dedutivos levarão ao que se já conhecia inicialmente. A segunda possibilidade é que se procura resolver um problema cuja solução já se sabe (como antecipei mais acima). Mas nesse caso, o que se procura descobrir não é propriamente a *solução*, mas *como construir a solução* a partir de certas premissas fornecidas. Acredito que a descrição pappiana do processo de análise bem pode enquadrar ambas as possibilidades. De todo modo, o que fica claro é que nessas duas possibilidades a análise pode satisfatoriamente ser entendida como o processo que parte do conhecido para o desconhecido, e não o contrário. No primeiro caso, o processo de análise, ou de descoberta da solução, seria partir das premissas conhecidas, e formular ou testar hipóteses que levarão regressivamente às premissas iniciais. Essencialmente, o processo é do conhecido (as premissas iniciais) para o

⁶⁷⁵ Ducheyne, 2012, p.6-18

⁶⁷⁶ Ibid.

⁶⁷⁷ Ibid.

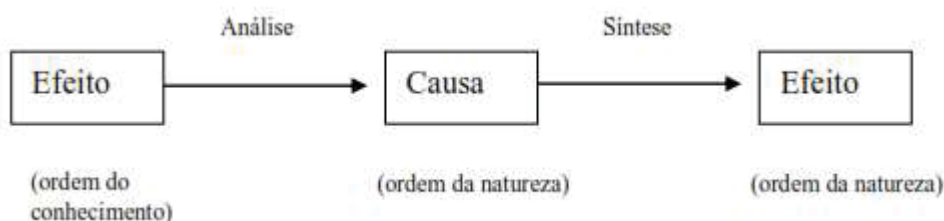
⁶⁷⁸ Ibid.

⁶⁷⁹ Ibid.

⁶⁸⁰ Ibid.

desconhecido (a solução obtida pelo teste das hipóteses). Do mesmo modo, no segundo caso, o processo seria do conhecido para o desconhecido. O “conhecido” seriam as premissas iniciais e a solução, que já se conhece; o “desconhecido”, por sua vez, não seria a *solução* em si, mas o “como construir a solução”. O procedimento no sentido regresso, nesse caso, é somente o meio utilizado para descobrir o modo de construção. Em ambos os casos, a análise pode ser entendida como o processo de descoberta do conhecido para o desconhecido. Aliás, como em todo e qualquer problema.

Ora, o entendimento da análise esboçado no parágrafo anterior seria coerente com a caracterização que tanto Robert Sanderson, como Samuel Smith (e mesmo outros) fazem da etapa da análise na filosofia natural. Em termos genéricos, a análise seria a etapa que parte do *conhecido* para o *desconhecido*. E assim seria também em qualquer outro campo do conhecimento. A diferença fundamental entre a análise e síntese na matemática e na filosofia natural estaria no tipo específico de conhecimento envolvido. Sanderson, Smith, Wallis, entre outros que definem o método aqui discutido, seguem a conhecida distinção aristotélica da *ordem do conhecimento* e *ordem das coisas* (ou *ordem da natureza*). Na filosofia natural, por exemplo, o “conhecido” são os “efeitos” como percebidos pelos sentidos, ou seja, são as “aparências”, ou os “fantasmas” – na terminologia de Hobbes – que não se confundem com as coisas em si mesmas (*ordem da natureza*). A análise, nesse domínio, seria a etapa que parte dos efeitos aparentes (na *ordem do conhecimento*) em direção às causas desconhecidas das coisas (na *ordem da natureza*), e a síntese seria a etapa que parte da causa descoberta (na *ordem da natureza*) para os efeitos na *ordem da natureza*. O diagrama abaixo pode ser útil:



Essa distinção aristotélica suscitada por Smith e Sanderson é relevante porque cria uma significativa assimetria na etapa da análise e na etapa da síntese na filosofia natural.⁶⁸¹ Em outros termos, a aplicação do método da análise e síntese na filosofia natural é relativamente mais complexa que na matemática. Na matemática, o nível epistêmico tende a coincidir com o nível da natureza. Portanto, a síntese é a mera reversão da análise. No caso da

⁶⁸¹ Veja Sgarbi, 2013.

filosofia natural, o nível epistêmico não coincide com o nível das coisas e, portanto, a síntese não é a mera inversão dos passos da análise. Por outro lado, há um expressivo paralelo no método da análise e síntese na matemática e na filosofia natural. O processo da análise sempre seria o processo do conhecido para o desconhecido. Quando na geometria se procura a solução do problema acerca de como uma determinada curva pode ser traçada de modo exato, o geômetra está partindo do conhecido (a curva, ou o *efeito* que ele já conhece) em direção ao desconhecido (o modo de construção, ou a *causa* da curva). Se ele não conhecesse a curva o problema sequer poderia ser proposto. Aparentemente, há uma analogia também na *direção* do processo de análise e síntese, diferente do que Ducheyne sugere. E no caso da *geometria mecânica* a analogia é mais evidente, uma vez que se pode perfeitamente falar em causas e efeitos nesse campo, como Barrow mostrou nas suas *lectures*.

Há evidências de que Newton também admitia uma significativa analogia entre a análise e síntese na matemática e filosofia natural. Num rascunho para o prefácio da primeira edição da *Óptica*, por exemplo, ele estabelece um claro paralelo entre a aplicação desse método nos dois domínios considerados, e reconhece a maior complexidade no caso da filosofia natural:

*Como os matemáticos tem dois métodos para fazer as coisas, que chamam de composição e resolução, [i.e., síntese e análise] e em todas as dificuldades recorrem ao método de resolução [ou análise], antes da composição [ou síntese], assim também na explicação dos fenômenos da natureza métodos semelhantes devem ser usados, e aquele que espera ter sucesso deve proceder a resolução antes da composição. Porque a explicação dos fenômenos [da natureza] são problemas muito mais difíceis que aqueles da matemática ~~abstrata~~.*⁶⁸²

E na famosa questão 31 da *Óptica*, Newton também demonstra conceber um paralelo significativo na aplicação do método da análise e síntese na matemática e na filosofia natural:

*Assim como na matemática, assim também na filosofia natural a investigação das coisas difíceis pelo método da análise deve sempre preceder o método da composição [i.e., da síntese]. Essa análise consiste em fazer experimentos e observações, retirando conclusões gerais por indução, e não admitindo qualquer objeção contra as conclusões senão aquelas tomadas dos experimentos e outras verdades certas (...). Porque as hipóteses não devem ser consideradas na filosofia experimental (...). Por meio desse tipo de análise podemos proceder dos compostos para os ingredientes, e dos movimentos para as forças que os produzem; e em geral, dos efeitos para as causas, e das causas particulares para as causas mais gerais até o argumento terminar no mais geral. Esse é o método da análise. E o método da síntese consiste em assumir as causas descobertas e estabelecê-las como princípios por meio dos quais se explicará os fenômenos deles procedentes, e se provará as explicações.*⁶⁸³

⁶⁸² CUL Add. Ms.3970, f.480v [grifos meus], cf. f.242rv, f.244v, f.288r, apud Ducheyne, 2012, p.20. Esses manuscritos estão disponíveis em McGuire, 1970. Cancelados de Newton.

⁶⁸³ *Opticks*, p.380. Grifos meus.

A questão 31 da *Óptica* também é útil aos nossos propósitos porque menciona outros dois elementos vinculados ao método da análise e síntese na filosofia natural que surgem nos trabalhos de Sanderson e Smith (embora de modos distintos). O primeiro elemento é que o processo de análise inicia com “experimentos e observações”, isto é, com a experiência. O segundo elemento é que ele progride das “causas particulares” gradativamente até as “causas mais gerais”. Sobre o primeiro elemento cabe dizer que tanto Sanderson quanto Smith eram filósofos rigorosamente empiristas.⁶⁸⁴ Mais exatamente, eles eram filósofos que aqui temos classificado como perseguindo o ideal de uma filosofia experimental *demonstrativa*. Nesse sentido, os seus tratados de lógica enfatizam a experiência, mas ao mesmo tempo procuram aplicar critérios demonstrativos do organon aristotélico. Portanto, eles escrevem expressamente em “demonstrar” as causas a partir dos efeitos. Sobre o segundo elemento, ambos também criaram algum tipo de hierarquia distinguindo causas mais particulares e causas mais gerais. Vale a pena fazer um rápido panorama de alguns tópicos que eles apresentam nos seus tratados.

No *Aditus ad Logicae*, Smith começa definindo que “ciência” é o conhecimento das coisas, e conhecer genuinamente algo é conhecer a sua *causa*.⁶⁸⁵ Distingue, em seguida, as “causas próximas” das “causas últimas”, e impõe quatro exigências para a ciência: primeiro, o conhecimento da causa última; segundo, o conhecimento da causa próxima; terceiro, o reconhecimento da conexão entre causa e efeito; e quarto, a certeza de que o efeito não tem qualquer outra causa.⁶⁸⁶ Seguindo Aristóteles, ele afirma que o instrumento primário da ciência é a “demonstração”, o qual é um silogismo fundado em premissas verdadeiras, deduzindo conclusões necessariamente verdadeiras.⁶⁸⁷ Além disso, a demonstração procede do conhecido para o desconhecido, e pode ser de dois tipos: demonstração *quo*, e demonstração *propter quid*. A primeira procede do efeito de acordo com o que é “mais conhecido por nós” (*ordem do conhecimento*) e conclui com uma causa que não é próxima ao efeito; a segunda procede *a priori* de acordo com “o que é mais conhecido por natureza” (*ordem da natureza*) e descobre a “causa próxima”.⁶⁸⁸ Portanto, a demonstração que Smith propõe é daquilo que é ‘mais conhecido por nós’ (*ordem do conhecimento*) para aquilo que é “mais conhecido por natureza” (*ordem da natureza*), ou seja, dos efeitos sensíveis para as

⁶⁸⁴ Veja Sgarbi, 2013.

⁶⁸⁵ Smith, *Aditus ad logicam*, p.97, apud Sgarbi, 2013, p.148.

⁶⁸⁶ Ibid.

⁶⁸⁷ Ibid.

⁶⁸⁸ Ibid, p.149.

causas das coisas. A experiência, portanto, tem papel fundamental no tratado de Smith. Prova disso é que ele dedica um capítulo inteiro esclarecendo o papel da indução no processo demonstrativo, “o único instrumento capaz de estabelecer e descobrir os princípios, que são conhecidos *per se* a partir da sensação, a fonte de todo o conhecimento”.⁶⁸⁹ Acerca disso, Sgarbi afirma que Smith “claramente enfatiza a importância da parte empírica do método científico, que inicia com o que é ‘mais conhecido por nós’, ou seja, com a experiência”.⁶⁹⁰

No caso do tratado *Logicae Artis Compendium*, de Sanderson, o objetivo da lógica é prover um adequado instrumento para o conhecimento científico.⁶⁹¹ Um dos principais assuntos da lógica é a “demonstração”. A demonstração, por sua vez, é um silogismo que leva ao conhecimento científico, o qual é o conhecimento de uma coisa por meio da sua causa própria. Portanto, assim como Smith, Sanderson também segue Aristóteles definindo a “ciência” como o conhecimento das *causas*. Ele também distingue, como Smith, as causas em “causa próxima” e causa última, chamando a segunda de “causa remota”. Todavia, na hora de esclarecer em mais detalhes os tipos de demonstração e qual delas produz conhecimento verdadeiramente científico, Sanderson diverge de Smith. Para Sanderson, nem a demonstração *quod*, nem a demonstração *propter quid* produzem conhecimento científico. O conhecimento científico somente é adquirido por meio da demonstração *potissima*, que resulta de um processo em três etapas: a “análise”, o “regresso”, e a “conversão em definições” (*analysis, regressus, conversio in definitionem*).⁶⁹² Segundo Sgarbi, a etapa do *regressus* consiste num processo cognitivo da mente que vai do confuso conhecimento empírico das causas pelas sensações até se tornarem claras no intelecto pela distinção entre causas e efeitos. Uma vez se tornando claro a causa e efeito ela se converte numa definição. A etapa da análise é o processo direcionado do efeito até a primeira causa, vinculados numa cadeia causal. Chegar nessa primeira causa é a finalidade da pesquisa científica.⁶⁹³ Após descrever a estrutura da demonstração científica, Sanderson oferece um esclarecimento do método da ciência. O método é duplo. Um método de descoberta ou da invenção; e um método do ensino. O método da descoberta investiga os princípios do conhecimento e procede a partir dos “mais conhecido por nós” para o que é desconhecido, avançando da experiência sensível para aquilo que é “mais conhecido por natureza”. O método do ensino segue o percurso inverso.⁶⁹⁴ Por fim, o método da descoberta de Sanderson tem quatro etapas, culminando na última etapa da

⁶⁸⁹ Ibid, p.150.

⁶⁹⁰ Ibid.

⁶⁹¹ Ibid, p.153.

⁶⁹² Sanderson, 1816, p.139. Veja também Sgarbi, 2013, p.154.

⁶⁹³ Sgarbi, op.cit, p.154.

⁶⁹⁴ Ibid, p.155.

indução, a qual, por sua vez, pode ser de três tipos. À exemplo de Smith, fica claro também a tentativa de Sanderson em aliar os métodos demonstrativos com um firme ideal de pavimentar os fundamentos para a construção de uma ciência empírica.

Retornando à questão 31 da *Óptica*, não é difícil perceber que vários elementos que figuram nas obras de Smith e Sanderson, que Newton estudou com cuidado no seu período formativo em Cambridge, também emergem na sua concepção do método da análise e síntese. Em particular, chamei a atenção para o compromisso com a experiência, o ideal de uma ciência natural demonstrativa, a distinção entre causas próximas e remotas, e um objetivo de prosseguir das causas mais particulares para a causas mais gerais. Outras semelhanças certamente podem ser encontradas, mas para os nossos propósitos já é suficiente para firmar esse ponto. Todavia, o que ficou bem claro, não apenas do panorama oferecido nos parágrafos anteriores, mas no que foi discutido anteriormente nesse capítulo, é que o método da análise e síntese entendido como um método específico utilizado em filosofia natural é uma categoria pouquíssimo informativa. Isso porque praticamente cada proponente desse método apresentava a sua própria versão particular do procedimento. Em outras palavras, o “método da análise e síntese” se tornou praticamente uma expressão equivalente a “método”, no qual cada filósofo oferecia o seu próprio método de descoberta, ou a sua própria maneira de descobrir o desconhecido a partir do conhecido. Buridan, Zabarella, Galileu, Hobbes, Wallis, Descartes, Smith, Sanderson, e inúmeros outros, cada um tinha o seu próprio entendimento desse procedimento.

Desse modo, ainda que hajam algumas semelhanças entre o método que Newton chama de análise e síntese com as descrições de Hobbes, Smith, ou Sanderson, é bastante provável que Newton tenha formulado a sua própria concepção desse procedimento, com base em variadas inspirações. No entanto, o que talvez seja de maior relevância em considerar essas influências é o projeto já referido de Newton em produzir uma filosofia experimental *demonstrativa*. Esse projeto o alinhava com uma corrente de filósofos que enxergavam o método da análise e síntese de modo demonstrativo. Como Sanderson e Smith. Nessas grandes linhas, é possível perceber claramente o que eles possuíam em comum. Mas precisamente nesse ponto é possível perceber que esses autores falharam em evidenciar como, exatamente, seria possível proceder de maneira de fato demonstrativa dos efeitos para as causas. E esse é o ponto em que se concentram a maior parte dos desacordos e controvérsias. Certamente isso levou ao descrédito de muitos filósofos experimentais as possibilidades de desenvolver esse projeto demonstrativo. Vale lembrar também que nos *Princípios de Filosofia*, Descartes procedeu dedutivamente tanto quanto possível. Poucos devem discordar

que na terceira parte do seu tratado, Descartes formulou a hipótese dos vórtices a partir dos princípios mecânicos e das leis da natureza estabelecidas na primeira parte. Em seguida, deduziu as consequências dessa hipótese. Ali também se percebe ao menos a sombra do método da análise e síntese. No entanto, Descartes não evidenciou, e muito menos *demonstrou* a etapa da *análise*. E provavelmente não porque não quisesse, mas porque acreditava que simplesmente não era possível. O que Sanderson e Smith estão dizendo é que é possível demonstrar as causas a partir dos efeitos. Mas também eles, não são capazes de mostrar exatamente como seria feito isso, limitando-se a fornecer algum papel à indução na formulação desses princípios.

Esclarecer o método particular da análise e síntese de Newton é, portanto, esclarecer como ele foi capaz de construir uma *análise demonstrativa*, ou ao menos parcialmente demonstrativa. É isso o que pretendo mostrar a seguir. Na última seção desse capítulo, e também desse volume, ofereço um esboço do método da análise e síntese de Newton, ou simplesmente um esboço do método dos *Principia*.

14.2 A ANÁLISE DEMONSTRATIVA DOS *PRINCIPIA*

Nessa seção pretendo oferecer um breve esboço do método da análise e síntese dos *Principia*. Como é a seção que encerra esse volume, será conveniente apresentar esse esboço a partir dos comentários metodológicos de Newton da primeira e segunda edição, e principalmente a partir do seu próprio procedimento ao longo de toda obra. Para que esse esboço fique mais claro, encaminho primeiramente um resumo dos fundamentos metafísicos e epistemológicos sobre os quais Newton se apoiou na formulação do seu tratado.

Sobre os fundamentos *metafísicos* dos *Principia*, as principais passagens em que estes se encontram estão no prefácio à primeira edição, nas “Definições”, nas “Regras para Filosofar” e no “Escólio Geral”. A partir desses textos, vários pressupostos podem ser sinteticamente enumerados. Primeiro, há um Deus que também é o mecânico supremo do universo. Segundo, há seres como nós, que partilhamos com Deus da mesma capacidade de construir. Terceiro, todas as construções ou criações podem ser consideradas como dispositivos “mecânicos”, frutos da aplicação da “arte mecânica”. Quarto, apenas “o mais perfeito dos mecânicos” pode construir com exatidão perfeita em qualquer grau de complexidade. E quinto, nós conseguimos trabalhar com exatidão perfeita apenas nas construções geométricas.

Dos pressupostos do parágrafo anterior se seguem algumas consequências. Em primeiro lugar, a *mecânica* é exata. Em segundo lugar, a *natureza* é uma construção mecânica exata, organizada da maneira mais simples possível, e regular (estruturada por meio de leis exatas). Em terceiro lugar, a geometria nasce da mecânica, e representa as construções que somos capazes de realizar com perfeita exatidão. E em quinto lugar, há pontos de contato entre a geometria e o mundo. Todas essas consequências podem ser resumidas na tese da “mecânica universal” do prefácio de Newton à primeira edição: tudo surge da arte mecânica, desde a geometria até a complexa máquina da natureza.

Da tese da mecânica universal, por sua vez, também se seguem importantes consequências que estão diretamente relacionadas com método dos *Principia*. Em primeiro lugar, há pelo menos uma parte do mundo que somos capazes de conhecer com mais segurança por meio da experiência. Como se sabe, há um abismo separando o *mundo* (nível ontológico) e a nossa *percepção do mundo* (nível epistêmico). Aquilo que conhecemos pela experiência não necessariamente corresponde às coisas do mundo. Evidentemente, esse “abismo epistêmico” gera uma dificuldade para um empreendimento que busca justamente investigar as causas da natureza. Mas pela tese da mecânica universal é possível compreender que o mundo possui propriedades *matemáticas*, ou melhor, o mundo possui uma parte que se sobrepõe à nossa *geometria*, uma vez que essa própria geometria corresponde à parcela daquilo que podemos construir de mais exato em analogia à perfeição mecânica da natureza. Desse modo, quando alguém coleta, pela experiência, as quantidades e proporções geométricas do mundo, está coletando justamente aquilo que há de mais objetivo do que se pode conhecer dele. Apenas para fornecer uma ilustração simples, se pela experiência obtemos duas informações geométricas que poderiam ser expressas de maneira simplificada por dois números, 8 e 2, informações estas que não correspondem à realidade absoluta coisas, que poderiam ser referidas, por exemplo, pelos números 12 e 3, ainda assim poderíamos estabelecer um ponto de contato entre a experiência e a realidade absoluta por meio das proporções geométricas envolvidas na *relação* entre essas duas coisas. Por exemplo, a *relação* matemática (ou razão) entre os números 8 e 2 (que são as informações no nível epistêmico) será $8/2 = 4$; a mesma relação entre as coisas propriamente ditas (no nível ontológico), que será $12/3 = 4$. Ou seja, 8 está para 2 assim como 12 está para 3.

Não é difícil perceber que o raciocínio desenvolvido acima apenas faz sentido em razão da tese da mecânica universal. A matemática (ou a geometria) não é a imposição de uma ideia estranha ao mundo; ela faz parte do mundo. Está embutida nele. Evidentemente que nem sempre a aferição das quantidades obtidas pelos sentidos será perfeita, em virtude de

todas as dificuldades conhecidas desse processo. No entanto, o que se enfatiza aqui é as *relações* ou as *proporções geométricas* entre as coisas seriam as informações mais seguras que se poderiam obter pela experiência acerca da realidade do mundo. Apenas pela matemática tais informações poderiam ser obtidas. Portanto, como disse no parágrafo anterior, da tese da mecânica universal se segue, em primeiro lugar, que há pelo menos uma parte do mundo que somos capazes de conhecer com mais segurança por meio da experiência. A parte *matemática*.

Mas em segundo lugar, da tese da mecânica universal também se segue que os mecanismos de funcionamento do mundo (ou seja, as operações de causa e efeito) são regidos por leis mecânicas que também possuem ao menos uma parte geométrica (i.e, que se sobrepõem a nossa geometria), e que podem ser satisfatoriamente discernidas pela experiência. Refiro-me às *leis da natureza*. Se a natureza tem uma estrutura mecânico-matemática, as leis da natureza são mecânico-matemáticas. E como as leis da natureza são *relações* específicas entre as propriedades mecânico-matemáticas do mundo, e as próprias propriedades são *relações* entre coisas do mundo que podem ser conhecidas de forma segura pela experiência, então as leis mecânico-matemáticas da natureza podem ser conhecidas por meio da experiência. Dessa conclusão surgiu o plano básico dos *Principia*. Uma vez sendo possível investigar e determinar as propriedades mecânico-matemáticas dos fenômenos da natureza pela experiência, torna-se possível também deduzir rigorosamente as leis que relacionam causas e efeitos de determinados fenômenos. Em linhas gerais, são essas as consequências que servem de diretrizes para o método de Newton nos *Principia*, e que surgem dos fundamentos metafísicos estabelecidos no prefácio.

No que se refere aos fundamentos *epistemológicos* dos *Principia*, pode-se dizer que eles se resumem naquilo que tanto Newton, no Escólio Geral, quanto Roger Cotes, no prefácio à segunda edição, chamaram de “filosofia experimental”. No entanto, é preciso enfatizar que os fundamentos epistemológicos do *Principia* não estão presentes apenas nessas passagens, evidentemente, mas de um modo geral eles surgem ao longo de todo tratado, nas opções e procedimentos adotados por Newton, naquilo que ele apresenta e deixa de apresentar, e em especial no “escólio das leis do movimento” e nas “Regras para Filosofar”. Depois do percurso desse trabalho não deve ter restado dúvidas de que a epistemologia dos *Principia* é fundamentalmente empirista. Todo conhecimento se inicia pela experiência, como se afirma na Regra 3. Os conhecimentos universais são construídos pela indução. Como ponto de partida se admite que o nosso conhecimento é válido, portanto a indução também é válida, e conduz ao progresso do conhecimento. Aparentemente, esses princípios revelam uma crença

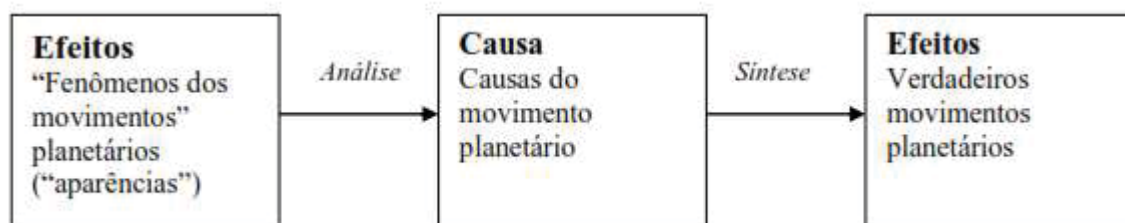
na eficácia do modo espontâneo de funcionamento da nossa razão na construção natural dos conhecimentos, dos quais não devemos nos desviar. Portanto, a investigação da natureza deve ser fundamentada rigorosamente na experiência e na indução, e qualquer formulação que não tenha esses fundamentos, útil que possa ser, não tem o mesmo nível epistemológico daquelas que têm.

Mas uma epistemologia radicalmente fundada na experiência não implica que Newton tenha uma crença ingênua que os conhecimentos da experiência são certos e indubitáveis. Isso fica claro no *Escólio das Definições*. Além disso, a adoção dessa epistemologia também não implica numa crença que não seja possível avançar o conhecimento *além da experiência*. Isso não apenas é possível como também é um dos objetivos dos *Principia*. É possível avançar para além da experiência. E é possível por meio da *dedução*. Pelo processo dedutivo é possível partir de premissas verdadeiras e chegar em conclusões verdadeiras. Assim, a começar de pontos de partida seguros da experiência é possível progredir dedutivamente para conclusões igualmente seguras que não necessariamente estão ao alcance da experiência. É claro que toda dificuldade se resume em obter esses pontos de partida seguros da experiência. Mas pela tese da mecânica universal vimos que com o auxílio da matemática é possível obtê-los.

Estabelecidos esses fundamentos metafísicos e epistemológicos é possível construir, agora, um esboço do método seguido por Newton nos *Principia*. Newton ilustrou a aplicação do seu método a partir de um problema concreto partilhado tanto pela astronomia quanto pela filosofia natural. O problema sobre a definição do verdadeiro sistema do mundo. Conforme vimos na seção 8.1, esse problema poderia ser considerado como a maior questão científica do séc. XVII. Não podia ser resolvido nem pelas observações astronômicas (ou seja, pelos dados diretos da experiência), nem pela especulação filosófica, que admitia tantas hipóteses quanto se pudesse imaginar, sem qualquer possibilidade de uma definição entre elas. Newton, portanto, desejava usar o seu método para oferecer uma solução definitiva para esse problema, o que evidentemente implicava que ele não poderia recorrer a uma explicação especulativa.

Em grandes linhas, para solucionar esse problema, Newton lançou mão da estrutura básica do conhecido método da análise e síntese, que fora adotado como padrão por uma parte dos filósofos naturais e matemáticos da época. Ele iria partir dos *efeitos aparentes* para as causas desses efeitos, pela análise; em seguida, pela síntese, iria deduzir *a priori* os efeitos verdadeiros a partir das suas causas. No problema específico do sistema do mundo, ele iria partir dos “fenômenos dos movimentos” dos planetas (i.e, das “aparências”) em direção às

causas (verdadeiras) desses movimentos, para em seguida deduzir os “verdadeiros movimentos” planetários a partir dessas causas.



Além de decidir seguir a estrutura básica do método da análise e síntese para abordar o problema do sistema do mundo, Newton adotou uma versão *demonstrativa* desse método. Em outros termos, não apenas a síntese, mas igualmente a análise deveria ser demonstrativa, de modo que se pudesse garantir que a causa descoberta era a verdadeira causa dos movimentos planetários. Naturalmente, sem a garantia de que a causa encontrada fosse verdadeira o problema não poderia ser considerado como resolvido. Ou seja, a dedução *a priori* dos efeitos pela síntese não apresentaria necessariamente os verdadeiros movimentos planetários.

O grande problema metodológico de Newton, portanto, estava subscrito à etapa da *análise*. Como proceder uma análise genuinamente *demonstrativa*? Ao menos seria possível fazer isso? Como vimos, pelos pressupostos da mecânica universal seria possível defender que *sim*. A descrição do método de Newton, por conseguinte, se resume quase que exclusivamente em evidenciar como ele procedeu na etapa da análise.

A etapa da análise consiste em partir do conhecido em direção ao desconhecido. É o processo de descoberta das causas desconhecidas dos movimentos planetários a partir dos efeitos conhecidos, a saber, os seus movimentos aparentes. Para proceder demonstrativamente desses movimentos aparentes para as causas se fizeram necessárias duas investigações. Primeiro, uma investigação e seleção detalhada dos dados astronômicos disponíveis que estão rigorosamente de acordo com a experiência, ou seja, devidamente expurgados de todo e qualquer elemento especulativo, e com um especial interesse para aqueles dados mecânico-matemáticos (que oferecem um ponto de contato com o mundo). Segundo, seria necessária uma investigação empírica para determinar as leis mecânico-matemáticas que relacionam as causas e efeitos dos movimentos dos corpos em geral. Essa segunda investigação seria importante para que se pudesse estabelecer as premissas universais a partir das quais se poderia efetuar o processo dedutivo.

Com relação à primeira investigação, o material de que Newton dispunha era extenso. A astronomia sempre trabalhou paralelamente à matemática, e o aspecto empírico também sempre teve relativo destaque. Restou a Newton coletar esse material e selecionar o que se adequava aos seus critérios e objetivos. Como vimos na seção 9.2, Newton se fiou principalmente nos fenômenos matematizados, ou melhor, na parte matemática dos fenômenos, com destaque especial para as regularidades de Kepler, hoje conhecidas como segunda e terceira leis de Kepler.

Com relação à segunda investigação, no entanto, a situação foi mais complicada. Embora houvessem tentativas anteriores de determinação das leis mecânico-matemáticas que relacionassem as causas e efeitos dos movimentos em geral, ainda não havia um consenso sobre essas leis e, portanto, elas não estavam definitivamente estabelecidas. Desse modo, foi necessário que Newton ingressasse numa investigação empírica para estabelecer efetivamente essas leis. Como sabemos, essas leis foram chamadas de “leis do movimento”, mas bem poderiam ser chamadas de “leis da natureza”, “princípios mecânicos” (como Newton as chamou em outras ocasiões), ou “princípios mecânico-matemáticos”, como as chamei nesse volume. Vale a pena delinear também a trajetória de Newton nesse particular.

Os princípios mecânicos deveriam informar as regularidades das proporções geométrico-matemáticas envolvidas nas operações de causa e efeitos entre os corpos no mundo. Mas como saber quando os corpos estão sofrendo uma operação de causa e efeito? Aparentemente Newton partiu de alguns pressupostos da filosofia mecânica e da simplicidade da natureza, pelos quais todos os fenômenos poderiam ser reduzidos à matéria, movimento e interação entre matéria. Da experiência seria possível concluir que os estados naturais dos corpos são o repouso e movimento uniforme em linha reta, e que qualquer mudança nesses estados naturais implica, necessariamente, numa ação de um corpo sobre outro (i.e., numa operação de causa e efeito gerada pela ação de um corpo sobre outro). Desses pressupostos, e de uma minuciosa investigação empírica (envolvendo principalmente experimentos de colisões entre corpos), Newton determinou as duas leis mecânico-matemáticas que relacionam a causa e o efeito dos corpos. A segunda e a terceira leis do movimento. Há uma relação de proporcionalidade entre a quantidade de matéria dos corpos e as suas mudanças de movimentos durante uma interação; e as ações dos corpos uns sobre os outros são sempre mútuas, iguais, e em sentidos contrários. Essas leis do movimento não dependiam da assim chamada “hipótese mecânica”, que todas as ações entre os corpos ocorriam por meio do contato, embora também não excluísse essa possibilidade. Apenas asseriam que qualquer alteração nos dois estados naturais dos corpos implicava numa ação causal, mesmo não

perceptível, cuja proporção matemática poderia ser determinada pela proporção da alteração dos seus efeitos, ou melhor, da sua quantidade de movimento.

Essa proporção matemática vinculada à ação de um corpo sobre outro foi chamada por Newton de “força”. Esse procedimento metodológico na elaboração das leis do movimento foi fundamental no encaminhamento posterior do projeto dos *Principia*. A “força” não corresponde à “causa física” que envolve sempre corpos agindo uns sobre os outros; a força é a *proporção matemática* relacionada a esses corpos interagindo. Ou melhor, é a parte geométrico-matemática da operação que ocorre no mundo. Ainda que não se perceba quais corpos exatamente estão interagindo no mundo, pela alteração das proporções geométrico-matemáticas relativas ao estado natural dos corpos é possível conhecer a “parte matemática” da “causa”. McMullin chamou essa causa de “causa dinâmica” que Newton teria inaugurado com a sua obra.⁶⁹⁵ Fica claro agora que essa “causa dinâmica” não é propriamente uma “causa”, mas a “quantidade matemática” associada à causa, ou a proporção da alteração do estado natural dos corpos. É uma *informação específica* sobre a causa dos movimentos. Ainda sobre o processo que resultou na formulação das leis do movimento, vale notar que nele também figurou uma generalização indutiva: as conclusões obtidas para os corpos particulares colidindo por meio de em pêndulos foram generalizadas para todo e qualquer corpo agindo sobre o outro no universo.

Os “princípios matemático-mecânicos”, portanto, foram determinados. Mas para proceder às deduções ainda seria necessário mais um passo. As leis do movimento haviam sido formuladas com base em ações *instantâneas* entre corpos. Estavam relativamente distantes dos fenômenos dos movimentos planetários que sugeriam ações *contínuas*, que geravam alterações contínuas nos movimentos naturais dos planetas. Desse modo, Newton ainda precisava desenvolver esses princípios mecânicos de modo que eles pudessem ser mais adequadamente aplicados aos fenômenos dos movimentos planetários. Foi nesse ponto que se desenvolveu o que nesse trabalho chamei de uma “geometria mecânica de forças” análoga à natureza. Uma geometria mecânica cujos axiomas de construção são análogos às leis do movimento do mundo. Todavia esse era um problema *matemático*. Como construir uma geometria que pudesse produzir curvas variadas, possivelmente círculos e elipses que obedecessem certas proporções a partir dos axiomas estabelecidos? Na solução desse problema, Newton foi auxiliado pela hipótese de Hooke. Essa geometria mecânica poderia ser construída por meio da composição de dois movimentos, um deles uniforme em linha reta, e o

⁶⁹⁵ McMullin, 2001.

outro acelerado em direção a um centro fixo. Newton testou essa hipótese matemática e obteve a confirmação da compatibilidade que precisava. Uma geometria mecânica de forças foi construída, portanto, com o auxílio da hipótese de Hooke.

Agora Newton estava em condições de realizar a análise demonstrativa dos fenômenos dos movimentos planetários em direção às causas desses movimentos. Da parte matemática dos fenômenos astronômicos, ou melhor, das proporções matemáticas das regularidades relacionadas aos fenômenos dos movimentos planetários, Newton rigorosamente deduziu a lei geométrico-matemática vinculada à causa desses movimentos. Deduziu a lei de alteração das proporções matemáticas dos estados naturais dos corpos inicialmente supostos. Em outras palavras, das propriedades matemáticas dos movimentos orbitais dos planetários se deduziu as propriedades matemáticas da causa que gera esses movimentos. Uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância a partir de um centro.

Aqui cabem duas observações. Primeiro, que a determinação dessa “parte matemática” da causa é robusta. Isso porque, como já foi mencionado, Newton partiu daquilo que há de mais próximo do mundo que a experiência é capaz de captar. As proporções matemáticas dos fenômenos. Segundo, que essa “força centrípeta” não pode ser considerada a “causa física” dos movimentos orbitais. Como já esclareci, ela é apenas *uma informação* sobre a causa. Uma informação privilegiada, não obstante. Pois a partir dela é possível prosseguir a investigação com muito mais segurança em direção à “causa física” do movimento orbital dos planetas. Mais precisamente, a informação da proporção geométrico-matemática exata da causa do movimento orbital dos planetas, em primeiro lugar, elimina de imediato as hipóteses incompatíveis matematicamente com essa proporção; ou melhor, elimina não apenas hipótese incompatíveis matematicamente, mas hipóteses *impossíveis* do ponto de vista matemático. Em segundo lugar, restringe as hipóteses *possíveis* a concordarem precisamente com essa proporção; em terceiro lugar, possibilita uma investigação gradativa das causas mais próximas e particulares, para as causas mais remotas ou gerais. A análise de Newton a partir daqui, portanto, procederá sobretudo de maneira hipotético-dedutiva; mas uma vez que o resultado procurado é *matemático*, esse processo se assemelha muito à análise matemática, em que se parte do procurado (assumido como dado, uma *hipótese*) e se retrocede até o que já se conhece, no caso a lei do inverso quadrado e as consequências dela. Naturalmente, assim como na matemática esse processo poderia ser invertido numa forma dedutiva e natural, como aliás Newton tentou fazer nos *Principia*. No entanto, como já possível perceber nessa altura do trabalho, “os problemas na filosofia natural são muito mais difíceis que na matemática”, e

é claro que esse processo não se desenvolveu perfeitamente como talvez Newton tivesse inicialmente imaginado. De qualquer modo, a primeira hipótese se adequou bem a esse plano.

A hipótese para a “causa próxima” da força centrípeta atuando na Lua em direção ao centro da Terra foi a *gravidade*. Com o “teste da Lua” Newton mostrou que essa hipótese era compatível com a informação da proporção matemática conhecida da causa. A causa próxima da força centrípeta da Lua foi, portanto, determinada. Por indução se expandiu essa causa para outros planetas. Em seguida, passou-se a investigar a causa da gravidade dos planetas. A hipótese dos vórtices e a hipótese vibratória foram descartadas em virtude das impossibilidades matemáticas a elas relacionadas. Por outro lado, a hipótese da atração interplanetária se demonstrou não apenas possível matematicamente, mas compatível com a informação da proporção matemática relacionada à causa. Assim, foi determinado que a causa gravidade é a atração mútua dos planetas. Em seguida, passou-se a investigar a causa da atração mútua dos planetas. Determinou-se que a hipótese de *todos os corpos* se atraírem mutuamente é compatível matematicamente com a informação prévia da causa. Nessa etapa ainda se acrescentou que a força centrípeta é proporcional à quantidade de matéria. Ademais, perguntou-se sobre a causa da atração mútua entre todos os corpos. A hipótese de que essa atração surja da atração de *cada partícula de matéria* também se mostrou compatível com as informações matemáticas anteriormente estabelecidas. A atração mútua entre todos os corpos é causada, portanto, pela atração mútua entre toda a matéria. Por fim, perguntou-se sobre a causa da atração mútua entre toda a matéria. As hipóteses possíveis (éter, espíritos elétricos, etc) não possuíam um número de experimentos suficientes para serem confrontadas com as informações matemáticas estabelecidas sobre a causa. O processo ascendente das causas precisou ser aí interrompido. Encerrou-se a etapa da análise. Das “aparências”, Newton chegou às causas. A causa dos movimentos orbitais dos planetas é uma atração entre cada partícula de matéria que gera, por sua vez, uma atração entre o Sol e os planetas, ou entre os planetas e satélites, que obedece às proporções geométrico-matemáticas estabelecidas na dedução inicial da análise.

Em seguida ocorreu a etapa da síntese, que não guarda maiores complicações. Deduziu-se *a priori* os verdadeiros movimentos planetários, como se mostrou no capítulo 11. Mas o que mais nos interessa aqui é mesmo a etapa da análise. Como Newton foi capaz de realizar essa etapa de modo demonstrativo ou, pelo menos, parcialmente demonstrativo. Como foi esboçado no parágrafo anterior, isso somente foi possível pelo uso da matemática. Não apenas pelo *uso* da matemática, mas pelas concepções metafísicas e epistemológicas relacionadas a esse uso. Principalmente pela sua concepção particular acerca de como o

mundo e a geometria estão relacionados. Acredito que essa foi a contribuição realmente original de Newton no processo da análise demonstrativa. Mostrar como esse projeto poderia ser levado à efeito com o auxílio da matemática. Ou melhor, mostrar como a tradição das ciências matemáticas e da matematização da natureza poderia ser articulado com a tradição da filosofia experimental a fim de construir uma *análise demonstrativa*.⁶⁹⁶

Para encerrar essa seção gostaria de comentar duas questões. A primeira é se nos *Principia* Newton realmente conseguiu concretizar o seu projeto metodológico de construir uma filosofia experimental demonstrativa, e se não conseguiu, o que ele fez em vez disso. A segunda pergunta é se Newton descobriu de fato alguma “causa”, uma vez que ele não foi capaz de chegar ao fim da cadeia causal. E se não foi, ele ainda estaria fazendo genuinamente filosofia natural?

Sobre a primeira questão, se Newton conseguiu concretizar o projeto metodológico de construir uma filosofia experimental demonstrativa nos *Principia*, eu diria que ao menos *parcialmente*. No capítulo 10 ficou claro que Newton enfrentou algumas dificuldades na demonstração da gravitação universal, particularmente na demonstração da proposição 5. Ou seja, poder-se-ia questionar o quanto os *Principia* realmente representa uma filosofia experimental *demonstrativa*. Da mesma forma, poder-se-ia questionar se seria possível manter ao menos o mesmo patamar demonstrativo em outros campos e assuntos, como por exemplo nos estudos das cores e da refração (que compõem a *Óptica*). Apenas pelo foi apresentado até aqui, não é possível apresentar uma resposta definitiva para essa questão. Mas independente disso, pode-se dizer que ainda que Newton não tenha alcançado esse objetivo, sem dúvida ele foi capaz de não apenas restringir significativamente a especulação sobre as causas dos fenômenos, mas de oferecer um substancioso programa metodológico nas quais elas são investigadas por etapas, das menos gerais para as mais gerais, por meio da matemática. Dessa perspectiva, seria possível afirmar que mesmo que Newton não tenha sido capaz de oferecer estritamente uma filosofia experimental demonstrativa, ainda assim ele ofereceu uma substituição à altura, algo que na terminologia atual talvez pudéssemos designar adequadamente de a uma *ciência empírico-matemática*. Uma ciência capaz de oferecer, a um só tempo, a alforria da investigação da natureza em relação à filosofia, e um programa de investigação das causas naturais com o auxílio da matemática. Isso me leva à segunda questão.

⁶⁹⁶ Nos capítulos 16 e 17 prossigo o desenvolvimento desse ponto e de outros dessa seção.

Newton descobriu efetivamente alguma “causa”, uma vez que ele não foi capaz de chegar ao fim da cadeia causal? Para Aristóteles e Descartes desconfio que a resposta seria um sonoro *não*. No caso específico de Descartes, lembro a seção 1.3.3, em que numa carta a Mersene o filósofo francês reclama que Galileu falhou por não explicar as coisas até o final e, por consequência, constrói “sem qualquer fundação”. Comparando com o caso de Newton, é conveniente lembrar o que escreveu René Thom, quando resumiu a principal diferença entre cartesianos e newtonianos na filosofia natural:

Descartes, com seus vórtices, seus átomos engatados e coisas do gênero, explicou tudo e calculou nada; Newton, com a lei do inverso quadrado da gravitação calculou tudo, e explicou nada.⁶⁹⁷

Acredito que para os critérios da filosofia natural, definida pelo antigo cânone aristotélico, não fornecer a causa última da gravidade era falhar em explicar os fenômenos naturais. Portanto, apesar de todos os esforços de Newton na investigação da natureza ele não estaria fazendo genuína filosofia natural. Por outro lado, os vórtices de Descartes se constituiriam numa legítima causa para os fenômenos da natureza. Totalmente adequado aos padrões daquilo que até então se considerava ser a filosofia natural. Mas acerca Newton poderia responder: *se a causa fornecida por meio desse novo método de filosofar não se adequa aos critérios de uma genuína ‘filosofia natural’, pior para a filosofia natural! Porque é desse modo que a natureza deve ser investigada daqui para frente. As ‘causas últimas’ são o fim de um processo que pode levar séculos de investigação. Mas ao final, teremos chegado em respostas seguras.*

A essa altura estou certo de que essa tentativa de Newton em criar uma filosofia experimental demonstrativa gerou um programa que impulsionou o surgimento do empreendimento que hoje chamamos de “ciência”, como um campo separado da filosofia; e que foi o sucesso desse programa que extinguiu a filosofia natural como até então se conhecia nos séculos que se seguiram. Estou certo de que esse programa só se estabeleceu definitivamente depois dos *Principia*. Depois do primeiro genuíno exemplar daquilo que hoje podemos chamar de uma *ciência empírico-matemática*.

⁶⁹⁷ Thom, R., *Structural Stability and Morphogenesis*, 1972, p.5, apud Féher, 1986.

CONCLUSÃO

O objetivo dessa pesquisa acadêmica era investigar o método dos *Principia* tanto da perspectiva histórica quanto da perspectiva da filosofia da ciência, para retirar, em seguida, algumas aplicações e reflexões sobre o problema da racionalidade científica. Nesse volume percorremos a primeira parte desse percurso, investigando o método dos *Principia* do ponto de vista *histórico*. Convém resumir, nesse momento, as principais conclusões que até aqui foram alcançadas. A primeira e principal conclusão encontrada foi que Newton efetivamente elaborou um novo programa de investigação da natureza distinto dos seus antecessores e contemporâneos. Naturalmente, isso pode ser percebido de pronto pela própria retórica de Newton e de seus colaboradores. No prefácio aos *Principia*, por exemplo, ele já havia feito referência a um “método mais verdadeiro” de filosofar; no esolio final da seção 11, ele qualificou o seu método como um “modo mais seguro” de investigar os fenômenos naturais; no esolio geral, ele volta a se referir ao “método dessa filosofia”; e no prefácio à segunda edição, o seu editor menciona “o modo incomparavelmente melhor de filosofar” do nosso “celebrado autor”. Não resta dúvidas de que tanto Newton quanto seus colaboradores tinham plena convicção que um novo programa de investigação da natureza havia sido lançado. No entanto, para os propósitos aqui almejados, a propaganda de Newton e seus asseclas não é, evidentemente, suficiente para estabelecer esse ponto, razão pela qual procurei, ao longo desse volume, compreender, analisar e caracterizar esse novo programa de investigação para além da retórica do matemático inglês, adentrando dos detalhes da sua prática, e procurando distinguir essa prática das abordagens dos seus antecessores e contemporâneos.

O resultado da investigação mencionada acima elucidou o programa metodológico dos *Principia* e a sua contribuição fundamental à ciência da sua época. No que consiste, precisamente, essa contribuição? Já sabemos que Newton não foi o primeiro a usar a matemática no estudo da natureza. Um sofisticado programa de matematização da natureza estava em pleno desenvolvimento quando o *Principia* foi escrito; e, rigorosamente falando, a aplicação da matemática na investigação do mundo natural já estava presente desde a antiguidade. Da mesma forma, Newton não foi o primeiro a construir um projeto estritamente empirista para a ciência. Os seus compatriotas ingleses já desenvolviam esse projeto por pelo menos um século antes dos *Principia*. Também não é possível defender que Newton foi o precursor do uso de experimentos no estudo da natureza, ou teve participação significativa na elaboração da visão de mundo mecanicista dos modernos, que já tinha suas bases bem estabelecidas por Boyle, Galileu, Descartes e outros. Sequer é possível dizer que as ideias

sobre análise e síntese, hierarquia das causas, eram originais de Newton, pois todas estavam já bem elaboradas nos manuais de filosofia natural aristotélica. Finalmente, nem mesmo a proposta para resolver o problema do sistema do mundo investigando as causas dos movimentos planetários foi uma ideia original de Newton, uma vez que sabemos que esse projeto foi originalmente sugerido por Kepler. O que Newton fez, então? Qual foi a sua contribuição? Como se poderia defender que ele iniciou um “novo programa de investigação da natureza” se nenhuma dessas iniciativas partiu dele?

O que se pode dizer com segurança é que o papel de Newton foi “articular” todas essas tradições independentes num programa de pesquisa único e consistente. Newton não promoveu somente a síntese de várias teorias e conceitos físicos de sua época, como geralmente se propõe; ele promoveu a síntese de várias tradições metodológicas distintas em um único e coeso programa de investigação da natureza. É possível dizer que Newton articulou pelo menos três tradições metodológicas relativamente independentes no século XVII: (1) a tradição da filosofia experimental inglesa; (2) a tradição das ciências matemáticas (pura e mista); (3) a tradição da filosofia natural aristotélica. É claro que já havia alguma inter-relação essas tradições no séc. XVII. A tradição da matematização da natureza dos modernos já estava associando as ciências matemáticas com a experimentação sob o pano de fundo de uma filosofia de orientação mais empirista e uma metafísica mecanicista. A obra de Galileu é um exemplo claro disso. Mas ainda assim as tradições das ciências matemática e da filosofia experimental eram bastante heterogêneas, e isso tornava as iniciativas de mobilizar os conhecimentos dessas áreas uma tarefa difícil, criando uma complicação natural de comunicação com os possíveis interlocutores dos princípios desenvolvidos. É o que percebemos, por exemplo, nas comunicações entre Descartes e Galileu, entre copernicanos e seus críticos, além de muitos outros exemplos. O que Galileu está fazendo é matemática ou filosofia natural? O que Copérnico está fazendo é astronomia ou cosmologia? Eles estavam trabalhando na fronteira de domínios considerados distintos e, por isso, não eram bem compreendidos.

Tornou-se imperativo, portanto, uma reorganização das fronteiras das várias tradições de pesquisa no século XVII. Mesmo em plena revolução científica, o programa de investigação da natureza que imperava era o sistema aristotélico. Embora não houvesse dúvidas entre os modernos que esse programa precisava ser superado, e apesar de não serem poucas as tentativas de codificar um novo método mais adequado às demandas da nova ciência emergente, levando em consideração a experimentação, a matemática, a visão mecanicista de mundo, nenhuma das propostas teve êxito em substituir – ou reformar –

definitivamente o programa aristotélico. É claro que um programa tão longo e bem estabelecido, difundido entre as universidades europeias, dificilmente seria substituído somente a partir das críticas que ele sofria; era necessário mais do que destruí-lo; era necessário construir outro à sua altura, outro que pudesse lidar com os desafios do novo tempo. Sem um programa robusto, contundente, de longo prazo, e que convincentemente se mostrasse mais eficiente que o antigo programa, dificilmente essa substituição ocorreria.

A partir da pesquisa até aqui realizada é possível concluir que a publicação dos *Principia* de Newton foi um grande passo para a substituição do programa aristotélico. Diferente da maioria dos filósofos que se propuseram a essa tarefa antes dele, Newton não procurou sistematizar o seu programa metodológico. Não procurou formular os princípios de um novo método. Não procurou explicitar os seus pressupostos filosóficos e metodológicos. Ele apenas *mostrou* como o programa funcionaria, e isso a partir da resolução do problema científico mais difícil da sua época. E o sucesso dos *Principia* em resolver esse problema tornou praticamente inócua qualquer disputa verborrágica sobre o melhor programa para substituir a antiga filosofia natural.

Nos *Principia*, Newton tomou o melhor de cada mundo. Da filosofia natural aristotélica, ele manteve o objetivo de um programa de investigação da natureza: determinar as *causas* dos fenômenos naturais. O seu programa não alterou o objetivo básico da filosofia natural. Tampouco alterou os fundamentos metodológicos desse programa. Ele manteve alguns aspectos da lógica e método: o método da análise e síntese, a hierarquia das causas, a separação de ordem da natureza e ordem do conhecimento, entre outras coisas. A grande diferença estava principalmente na etapa da *análise*. Ele propôs uma análise *demonstrativa*. Não era possível um programa sério de investigação da natureza em que fosse permitido a livre especulação e invenção de causas sem qualquer critério para estabelecer qual deveria ser aceita. Essa proliferação de hipóteses deveria ser desfeita por uma análise mais rigorosa, que conduzisse a causas que poderiam ser reconhecidas como estabelecidas. É nesse ponto que entram as demais tradições já existentes que Newton mobilizou. Os princípios da *filosofia experimental* associados às técnicas das *ciências matemáticas* deveriam ser incorporados ao método da análise e síntese, em especial, na etapa da análise, a fim de que esta pudesse ocorrer de maneira demonstrativa (ou o mais próximo possível disso). A análise deveria partir rigorosamente dos conhecimentos da experiência (não de princípios metafísicos, por exemplo), e com especial atenção às propriedades matemáticas desses conhecimentos, para usar as técnicas da lógica e da tradição das ciências matemáticas para avançar em direção às causas. Nesse ponto exato entrava a tradição de matematização da natureza dos modernos.

Desvelar as “propriedades matemáticas” dos fenômenos não era uma tarefa simples. Contudo, esse programa já estava em plena operação por filósofos como Galileu, Kepler, Huygens, entre outros.

Mas a análise demonstrativa mencionada no parágrafo anterior não faria qualquer sentido se tudo isso não fosse feito sob o pano de fundo de uma visão *mecânico-pitagórica* da natureza. Aceitar a visão de mundo mecanicista da natureza tornava possível compreender que todos os fenômenos naturais poderiam ser explicados reduzindo-os ao mecanismo básico de contato. Aceitar a visão de mundo pitagórica implicava em compreender que o mundo tem uma estrutura matemática e, portanto, a matemática é instrumento adequado para captar o funcionamento do mundo. Associadas, essas duas visões de mundo poderiam ser compreendidas como uma metafísica que permitia entender que todos os fenômenos naturais poderiam ser reduzidos a um mecanismo básico de *contato*, mas que esse próprio mecanismo é regido por leis matemáticas exatas, ou melhor, por leis *mecânico-matemáticas* exatas, de modo que a determinação dessas leis deve ser um caminho anterior e necessário para a determinação do mecanismo causal nos fenômenos em que não temos acesso empírico direto. E, nesse sentido, as *leis mecânico-matemáticas* podem ser consideradas até mais essenciais que o próprio *contato*. Newton fundou seu programa, portanto, com base numa metafísica que adotava a visão de uma estrutura *mecânico-matemática* do mundo.

Sintetizando os dois parágrafos anteriores, os elementos básicos do novo programa de investigação da natureza apresentado nos *Principia* poderiam ser resumidos por: (1) uma *metafísica mecânico-pitagórica*; o mundo não teria apenas uma estrutura matemática, ou mecânica; o mundo teria uma estrutura *mecânico-matemática*, e além disso seria *cognoscível*, e organizado por leis *mecânico-matemáticas* de máxima simplicidade;⁶⁹⁸ (2) uma *epistemologia rigorosamente empirista*, que todo conhecimento deve ser construído a partir da experiência; mas não limitado à experiência, pois dado que o mundo é *mecânico-matemático* seria possível ir além da experiência sensível com o auxílio da matemática; (3) um *tratamento abstrato dos fenômenos*; possuindo o mundo uma estrutura *mecânico-matemática*, o tratamento abstrato dos fenômenos não seria uma concessão indesejada, mas nos levaria mais próximo da essência do mundo, que é *mecânico-matemática*; (4) uma *metodologia que busca as causas verdadeiras dos fenômenos*; uma metodologia que admite

⁶⁹⁸ A cognoscibilidade do mundo era supostamente um dos princípios do neopitagorismo. Sobre o princípio neopitagórico “a semelhança é conhecida pela semelhança”, afirma Cardona (2016): “Os pitagóricos, acredita-se, aspiravam a semelhança de Deus. Eles consideravam que a alma humana é semelhante à alma do universo vivo. Graças a essa similaridade a alma pode conhecer o mundo. Esse princípio era partilhado por quase todos os pensadores pré-socráticos”. Embora admita que não necessariamente Newton acreditava na cognoscibilidade do mundo pelos mesmos motivos que os pitagóricos.

que é possível determinar as causas do mundo que não temos acesso empírico direto com o auxílio de princípios mecânico-matemáticos extraídos dos fenômenos.

Portanto, Newton articulou as tradições mencionadas acima num programa coerente que era capaz de determinar gradualmente as causas dos fenômenos naturais, mesmo aquelas causas cujo acesso empírico direto não era possível, sendo antes penetráveis somente à especulação filosófica. Por isso mesmo se pode defender que o “método de filosofar” dos *Principia* era inédito; não havia qualquer programa capaz de oferecer esses resultados antes dele, nem a filosofia experimental de Bacon e dos ingleses, nem a ciência matemática praticada por Barrow ou Galileu, e muito menos a filosofia natural de Descartes ou Leibniz. Foi os *Principia* de Newton que propôs um programa empírico capaz de acessar causas que não estão no alcance da experiência imediata sem recurso à especulação. A primeira e principal conclusão desse volume, portanto, é que Newton efetivamente elaborou um novo programa de investigação da natureza distinto dos seus antecessores e contemporâneos.

A segunda conclusão que gostaria de enfatizar é sobre os pronunciamentos metodológicos de Newton. Pela caracterização do programa de Newton realizada ao longo desse volume é possível concluir que não há incoerência entre os pronunciamentos metodológicos de Newton e a sua prática efetiva nos *Principia*. Ou melhor, não há qualquer incoerência relevante o suficiente para justificar as críticas historicamente atribuídas a ele nesse ponto. O que aqui poderia ser chamado de *problema da incoerência* deve ser melhor classificado como o *mito da incoerência*. A suposta ingenuidade metodológica de Newton é um retumbante equívoco. Newton sabia exatamente do que estava falando. O seu prefácio à primeira edição ressaltou a articulação de uma metafísica mecanicista e pitagórica com a tradição das ciências matemáticas e o método da análise e síntese; o escólio final da seção 11 do Livro I ressaltou o modo como a matemática poderia ser utilizada para restringir as hipóteses possíveis; e os famosos últimos parágrafos do escólio geral ressaltaram a filosofia empirista dos *Principia* e a sua articulação com a tradição das ciências matemáticas. Ou seja, esses pronunciamentos de Newton ressaltaram precisamente os elementos que se fundiram para a construção do programa da ciência empírico-matemática. Desse ponto de vista, o célebre “*hypotheses non fingo*” não foi uma sentença equivocada, ou mal formulada, que pouco tinha a ver com o que efetivamente foi feito nos *Principia*, ou ainda incluída com uma agenda estranha aos propósitos desse tratado, como muitos defenderam; ao contrário, trata-se de uma sentença chave, que sintetiza o espírito da nova ciência proposta nessa obra magna. Trata-se de uma das mais contundentes declarações em defesa do novo programa de investigação da natureza que surgiu com os *Principia*, um programa que não mais aceitava o

uso livre e sem restrições de hipóteses especulativas no domínio da ciência natural. Sem dúvida essa declaração mal interpretada pelos seus sucessores mais imediatos, mas ela marca o surgimento de uma nova era, de uma nova forma de investigar a natureza, marca o surgimento que uma ciência estritamente empírica, que pode se chamar genuinamente de “ciência” graças à sua fusão peculiar com a matemática. Marca a derrocada do longo programa da *filosofia natural* e o surgimento do programa de uma *ciência natural*, com os seus consequentes e conhecidos desdobramentos na separação entre a ciência e a filosofia nos séculos seguintes. A “dedução dos fenômenos”, e o “não invento hipóteses”, dessa perspectiva, não passam das características básicas dessa nova ciência.

É claro que as conclusões mencionadas acima levantam questionamentos sobre como esse programa foi recepcionado e incorporado pela geração posterior, a partir do séc. XVIII. Não há como ter uma percepção clara do que o programa dos *Principia* realmente representou para a história do pensamento científico sem ter uma ideia ao menos panorâmica da assimilação dessa obra nos séculos que se seguiram. Ainda que não houvesse qualquer programa semelhante aos *Principia* no séc. XVII, a questão que se faz é se ele foi de alguma forma seguido ou incorporado pelos seus sucessores. E embora seja praticamente consensual o entendimento que os *Principia* foi incorporado em certa medida pela ciência posterior, resta em aberto a questão de *em que medida* ele foi incorporado ou modificado, e até quando foi seguido, ou quando se tornou obsoleto. Naturalmente, não há como refletir sobre essas questões sem avançar para o desenvolvimento ciência empírico-matemática nos séculos subsequentes. Além disso, outra questão que se levanta a partir desse estudo é sobre a solidez dos fundamentos apresentados por Newton para sustentar a sua teoria, a partir de parâmetros mais atuais. Ou como podemos avaliar os fundamentos da racionalidade da ciência dos *Principia* e do seu programa metodológico, quando vistos em retrospecto. Evidentemente, para entrar nessas últimas questões precisamos proceder uma análise do método dos *Principia* de Newton da perspectiva da filosofia da ciência, além de ingressar em um estudo das repercussões históricas dessa obra. Mas essa análise seria uma elaboração longa demais para introduzi-la aqui, razão pela qual a ofereço em um volume adicional. No que se refere o presente volume, espero ter ficado estabelecido a caracterização histórica do programa da ciência empírico-matemática dos *Principia* – um programa capaz de determinar gradualmente causas mais essenciais dos fenômenos por meio de conhecimentos empírico-matemáticos – e que esse programa se distingue nitidamente das iniciativas metodológicas anteriores.

REFERÊNCIAS

ACHINSTEIN, P. (Ed). **Science Rules: A historical introduction to scientific methods**. John Hopkins University Press, 2004.

ANSTEY, P. R. Experimental versus Especulative Natural Philosophy. In: ANSTEY, P. R.; SCHUSTER J.A. (Eds); **The Science of Nature in the Seventeenth Century: Patterns of Change in Early Modern Natural Philosophy**. Studies in History and Philosophy of Science, vol. 19. Springer, 2005. p.215-242.

ANSTEY, P. R.; SCHUSTER J.A. (Eds); **The Science of Nature in the Seventeenth Century: Patterns of Change in Early Modern Natural Philosophy**. Studies in History and Philosophy of Science, vol. 19. Springer, 2005.

AQUINAS, T. **Basic Writings of St. Thomas Aquinas**. A.C. Pegis (trans.), New York: Random House, 1945.

ARISTOTLE. *Analytica Posteriora*. In: MCKEON, R. **The Basic Works of Aristotle**. Edited by Richard McKeon. The modern library. New York, 1941.

ARISTOTLE. *Mechanical Problems*. In: HETT, W.S. **Aristotle Minor Works**. With an English translation by W.S. Hett, MA. Cambridge, Massachusetts. Harvard University Press. Willian Heinemann, London, 1955.p.329-411.

ARISTOTLE. **Metaphysics: Books M and N**. Trad. Julias Annas. Claredon Press. Oxford, 1976

ARISTOTLE. **Physics: Book I and II**. Trad. Willian Charlton. Claredon Press. Oxford, 1970

ARISTOTLE. **Physics: Books III and IV**. Translated with Introduction and Notes by Edward Hussey. Claredon Press. Oxford, 1993.

ARISTÓTELES. **Do céu**. Tradução do grego e notas de Edson Bini. São Paulo: Edipro, 2014.

ARISTÓTELES. **Física I-II**. Prefácio, introdução, tradução e comentários de Lucas Angioni. Editora Unicamp, 2009.

ARCHIMEDES. *On floating bodies*. In: HEATH, T. L. **The Works of Archimedes**. Edited in Modern Notation with Introductory Chapters by Thomas L. Heath. Cambridge University Press, 1897a. p.253-300.

ARCHIMEDES. On the equilibrium of planes or the centres of gravity of planes. In: HEATH, T. L. **The Works of Archimedes**. Edited in Modern Notation with Introductory Chapters by Thomas L. Heath. Cambridge University Press, 1897b. p.189-220.

ARCHIMEDES. The sand-reckoner. In: HEATH, T. L. **The Works of Archimedes**. Edited in Modern Notation with Introductory Chapters by Thomas L. Heath. Cambridge University Press, 1897c. p.221-232.

ARNAULD, A; P. NICOLE (1696). **Logic: Or, the art of thinking**. Containing, besides comum rules, several new observations appropriate for forming judgement. Translated and edited by Jill Vance Buroker. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

ARTHUR, R. T. W. Newton's Fluxions and Equably Flowing Time. **Studies in History and Philosophy of Science**. Vol. 26, 1995. p. 323–351.

AYER, A. J (ed). **Logical Positivism**. The Free Press. New York. 1959.

BACON, F. **The new organon and related writings**. Edited with an introduction by Fulton H. Anderson. Indianapolis, New York: The Bobbs-Merrill Company, 1960.

BACON, F. **The Philosophical Works of Francis Bacon**. Reprinted from the texts and translations, with the notes and prefaces of Ellis and Spedding. Edited with an introduction by John M. Robertson. Routledge Revival, New York, 2011.

BACON, F. **Novum Organum**. Tradução e notas: José Aluysio Reis de Andrade. Acrópolis. Fonte Digital: O Dialético www.odialetico.hpg.com.br. 2002.

BARNES, E. C. Prediction versus Accommodation. **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**, 2021. Disp. em <http://plato.stanford.edu/archives/fall2021/accommodation/>

BARRA, E. S. O. A primazia das relações sobre as essências: as forças como entidades matemáticas nos *Principia* de Newton. **Scientiæ Studia**, v. 8, n. 4. São Paulo, 2010. p. 547-569.

BARRA, E. S. O.; SANTOS, R. B. Duhem's Analysis of Newtonian Method and the Logical Priority of Physics over Methaphysics. **Transversal: International Journal for the Historiography of Science**. No.2. Dossier Pierre Duhem. 2017.

BARRA, E. S. O. Em que sentido Newton pode dizer 'hypothesis non fingo'? **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, CLE/UNICAMP - Campinas - SP, vol. 5, n. 1/2, 1995. p. 221-245.

BARROW, I. **The Geometrical Lectures of Isaac Barrow:** Translated, with Notes and Proofs, and a Discussion on the Advance Made Therein of the Work of his Predecessors in the Infinitesimal Calculus by James M. Child. London: Open Court, 1916.

BARROW, I. **The Mathematical Works of Isaac Barrow.** Edited by William Whewell. Cambridge: Cambridge University Press, 1860.

BARROW, I. **The Usefulness of Mathematical Learning Explained and Demonstrated:** Being Mathematical Lectures Read in the Publick Schools at the University of Cambridge. Translated by John Kirkby. London: for Stephen Austen, 1734.

BECHLER, Z. Introduction: Some Issues of Newtonian Historiography. In: BECHLER, Z. (eds) **Contemporary Newtonian Research.** Studies in the History of Modern Science, vol 9. Springer, Dordrecht, 1982. P.1-20.

BÉLLIS, A. Harmonics. (Trad. Emoretta Yang and Catherine Porter). In: BRUNSCHWIG, J; LLOYD, G. E. R. (Ed.). **Greek Thought: a guide to classical Knowledge.** Translation under direction of Catherine Porter. The Belknap Press of Harvard University Press. London, England, 2000. p.312-327.

BESANT, W. H. **Conic Sections Treated Geometrically.** Ninth edition revised and enlarged. Cambridge: Printed by J. & C. F. Clay. University Press, 1895.

BIENER, Z.; SCHLIESSER, E. (Eds). **Newton and Empiricism.** Oxford: Oxford University Press, 2014.

BLACKMORE, R. **King Arthur.** An heroick poem in twelve books. London, 1697.

BLAKE, R. M. Isaac Newton and the Hypothetical method. In: BLAKE, R. M; DUCASSE, J. C.; MADDEN, E. H.; (Eds). **Theories of Scientific Method: The Renaissance Through the Nineteenth Century.** Gordon and Breach, 1960a. p.119-143.

BLAKE, R. M; DUCASSE, J. C.; MADDEN, E. H.; (Eds). **Theories of Scientific Method: The Renaissance Through the Nineteenth Century.** Gordon and Breach, 1960b.

BOYLE, R. **The Works of the honorable Robert Boyle.** In six volumes to which is prefixed the life of the autor. Ed. T. Birch. A new edition. Vol 1. London, 1772.

BOYLE, R. **The Works of Robert Boyle.** Ed. M. Hunter & E.B. Davis. (14 vols). Vol.2. London, Pickering & Chato, 1999-2000.

BRACKENRIDGE, B. **The Key to Newton's Dynamics: the Kepler problem and the Principia.** Berkeley: The University of California Press, 1995.

BRUNSCHWIG, J; LLOYD, G. E. R. (Ed.). **Greek Thought: a guide to classical Knowledge**. Translation under direction of Catherine Porter. The Belknap Press of Harvard University Press. London, England, 2000.

BRUNSCHWIG, J. Epistemology. (Trad. Catherine Porter and Dominique Jouhaud). In: BRUNSCHWIG, J; LLOYD, G. E. R. (Ed.). **Greek Thought: a guide to classical Knowledge**. Translation under direction of Catherine Porter. The Belknap Press of Harvard University Press. London, England, 2000. p.72-93

BUCHWALD, J. Z.; COHEN, I. B.(eds); **Isaac Newton Newton's Natural Philosophy**. Edited by Jed Z. Buchwald and I. Bernard Cohen. The MIT Press, 2001.

BUCHWALD, J.; FOX, R. (eds). **The Oxford Handbook of History of Physics**. Oxford: Oxford University Press, 2013.

BUNGE, M. **Racionalidad y realismo**. Madrid: Alianza, 1985.

BURIDAN, J. Questions on the Eight Books of the Physics of Aristotle. In: CLAGETT, M. **The Science of Mechanics in the Middle Ages**. Madison, Wis.: University of Wisconsin Press, 1959.

BUTTS, R.E.; PITT, J.C. (Eds). **New Perspectives on Galileo**: Papers Deriving from and Related to a Workshop on Galileo held at Virginia Polytechnic Institute and State University, 1975. D. Reidel Publishing Company. Boston, 1978.

CARDONA, C.A. Neopythagoreanism in the work of Johannes Kepler. **Manuscrito**, Campinas, v.39, n.3, p.91-120, Sept.2016. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-60452016000300091&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 13 de Maio de 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-6045.2016.v39n3.cs>.

CASINI, P. Newton: The Classical Scholia. **History of Science**, Vol. 22, 1984. p. 1-58.

CENTORE, F. F. **Robert Hooke's Contributions to Mechanics**: A study in seventeenth century natural philosophy. Martinus Nijhoff. 1970.

CHANDRASEKHAR, S. **Newton's Principia for the Common Reader**. Oxford: Clarendon Press, 1995.

CHILD, J. M. Preface. In: BARROW, Isaac. **The Geometrical Lectures of Isaac Barrow**: Translated, with Notes and Proofs, and a Discussion on the Advance Made Therein of the Work of his Predecessors in the Infinitesimal Calculus by James M. Child. London: Open Court, 1916.

CLAGETT, M. **The Science of Mechanics in the Middle Ages**. Madison, Wis.: University of Wisconsin Press, 1959.

COHEN, H. F. A Historical-Analytical Framework for the Controversies over Galileo's Conception of Motion. In: PALMERINO, C.R.; THIJSSSEN, J.M.M.H (Ed.). **The reception of Galilean Science of Motion in Seventeenth Century Europe**. Kluwer Academic Publishers, 2004. p.83-98.

COHEN, I. B. **A Guide to Newton's *Principia***. In: NEWTON, I. *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*, translated by I. Bernard Cohen and Anne Whitman, assisted by Julia Budenz, pp. 1–370. Berkeley: University of California Press, 1999.

COHEN, I. B. Hypothesis in Newton's Philosophy. **Physics**, 8, 1966. p.163-184.

COHEN, I. B. **The Birth of new Physics**. Penguin Books. London, 1992. First Published by Heinemann Educational. Great Britain, 1961.

COHEN, I. B.; SMITH, G. M. (Eds). **The Cambridge Companion to Newton**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

COHEN, I. B. **The Newtonian Revolution**. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

COPERNICUS, N. (Kopernik). **De Revolutionibus Orbium Coelestium**. Nuremberg: Apud J. Petreium, 1543.

COPERNICUS, N. **On the revolutions**. Translation and Commentary by Edward Rosen. Johns Hopkins University Press. Baltimore and London, 1992.

CROMBIE, A.C. **Robert Grosseteste and the Origins of Experimental Science (1100-1700)**. Oxford: Clarendon Press. 1953.

DARRIGOL, O. **Electrodynamics from Ampere to Einstein**. Oxford University Press, 2000.

DEAR, P. **Discipline and Experience: The Mathematical Way in the Scientific Revolution**. Chicago: University of Chicago Press, 1995.

DE GANDT, F. **Force and Geometry in Newton's *Principia***. Princeton: Princeton University Press, 1995.

DE GANDT, F. Technology. (Trad. Selina Stewart and Jeannine Pucci). In: BRUNSCHWIG, J; LLOYD, G. E. R. (Ed.). **Greek Thought: a guide to classical Knowledge**. Translation under direction of Catherine Porter. The Belknap Press of Harvard University Press. London, England, 2000. p. 486-497.

DE LA ROCHE, M. **Memoirs of Literature**. Containing a large account of many valuable books, letters and dissertations upon several subjects, miscellaneous observations. Vol. 4. Second Edition. London, 1722.

DESCARTES, R. **Oeuvres de Descartes**. (13 vol). Vol. III: Correspondance. Adams and P. Tannery (eds.), Paris: J. Vrin. 1976.

DESCARTES, R. **The Philosophical Writings of Descartes**. Vol. III: The Correspondence. Translated by J. Cottingham, R. Stoothoff, D. Murdoch, and A. Kenny. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

DESCARTES, R. **O Mundo ou Tratado da Luz**. Organização e tradução Érico Andrade. Editora Hedra. São Paulo, 2008.

DESCARTES, R. **Princípios da Filosofia**. Tradução João Gama. Edições 70, 1997.

DESCARTES, R. **Principles of Philosophy**: Part II, Paragraphs 24-54; Part III, Paragraphs 56-59; and Letter to Clerselier. On Motion. Tran. M. S. Mahoney, 1977, 1995. (Disponível online em <http://www.princeton.edu/~hos/Mahoney/texts/descartes/desc-mot.html>, acessado em 20 de outubro de 2015).

DESCARTES, R. **Regras para a direção do espírito**. Trad. João Gama. Edições 70. Lisboa, 1985.

DESCARTES, R. **The World and Other Writings**. Translated and Edited by Stephen Gaukroger. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

DENSMORE, D. **Newton's Principia, the Central Argument**: Translation, Notes, and Expanded Proofs. Translation and illustrations by William H. Donahue. Santa Fe, N.M.: Green Lion Press, 1995.

DOMSKI, M. The Constructible and the Intelligible in Newton's Philosophy of Geometry. **Philosophy of Science**, vol. 70, n. 5, p. 1114–1124, dez 2003.

DUCHEYNE, S. **The Main Business of Natural Philosophy: Isaac Newton's Natural-Philosophical Methodology**. Springer, 2012.

DUCHEYNE, S. Una historia editorial de las regulae philosophandi de Newton. **Estudios de filosofía**, n° 51, 2013. pp. 143-164.

DUGAS, R. **A History of Mechanics**. Transl. J. R. Maddox. Routledge & Kegan Paul LTD. London, 1957.

DUHEM, P. **The origins of statics: The Sources of Physical Theory** (1905). Translated from the French by Grant F. Leneaux, Victor N. Vagliente, and Guy H. Wagnener, with a foreword by Stanley L. Jaki. Boston Studies of Philosophy of Science, Vol 123. Springer Science+Business Media Dordrecht, 1991.

DUHEM, P. **The Aim and Structure of Physical Theory** (1906). Trad. da 2ª ed. por Philip. P. Wiener. New Jersey: Princeton University Press, 1991

DUNTON, J. **The Young-students-library**: containing extracts and abridgments of the most valuable books printed in England, and in the foreign journals, from the year sixty five, to this time: to which is added a new essay upon all sorts of learning wherein the use of the sciences is distinctly treated on. By the Athenian Society; also, a large alphabetical table, comprehending the contents of this volume, and of all the Athenian Mercuries and supplements, etc. London, 1692.

EARMAN J.; SALMON, C. W. The Confirmation of Scientific Hypotheses. In: SALMON, M. H (Ed). **Introduction to the Philosophy of Science**. Hackett Publishing Company. Indianapolis/Cambridge. 1992. Chap.2. p.42-103.

EUCLID. **The Thirteen Books of the Elements** (3 vols). Translated from the text of Heiberg with introduction and commentary by Sir Thomas L. Heath. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1968.

EUCLIDES. **Os Elementos**. Tradução e Introdução de Irineu Bicudo. Editora Unesp. São Paulo, 2009.

FÉHER, M. **The method of Analysis-Syntesis and the structure of causal explanation in Newton**. International Studies In The Philosophy Of Science Vol. 1, Iss.1, 1986.

FEINGOLD, M. **Before Newton: the Life and Times of Isaac Barrow**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

FEINGOLD, M. Newton, Leibniz, and Barrow Too: An Attempt at a Reinterpretation. **Chicago Journal, History of Science Society**. Isis, Vol. 84, No. 2, Jun 1993. p. 310–338.

FELDHAY, R. The use and abuse of mathematical entities: Galileo and the Jesuits revisited. In: MACHAMER, P. K (Ed.). **The Cambridge Companion to Galileo**. Edited by Peter K. Machamer. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p.80-145.

FEYRABEND P. (1975) **Against Method**. Third Edition. Verso. London, 1993.

FEYRABEND, P. Consolations for the Specialist. In: LAKATOS, I.; MUSGRAVE, A. **Criticism and Growth of Knowledge**. Proceedings of the international colloquium in the philosophy of science, London, vol. 4, 1965. Cambridge University Press, 1970.

FISHER, N.W.; UNGURU, S. Experimental Science and Mathematics in Roger Bacon's Thought. **Traditio**, 27. 1971. p.353-378.

FRIEDMAN, M; DOMSKI, M.; & DICKSON, M (eds.). **Discourse on a New Method: Reinvigorating the Marriage of History and Philosophy of Science**. Open Court, 2010.

GABBEY, Alan. What was “mechanical” about “mechanical philosophy”?. In: PALMERINO, C.R.; THIJSEN, J.M.M.H (Eds). **The reception of Galilean Science of Motion in Seventeenth Century Europe**. Kluwer Academic Publishers, 2004. p. 11-23

GABBEY, A. Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy: A Treatise on 'Mechanics'? In: Harman, P.M., and A.E. Shapiro (Ed). **The Investigation of Difficult Things: Essays on Newton and the Exact Sciences**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. pp. 305–22.

GALILEI, G. **Diálogo sobre os dois máximos sistemas de mundo ptolomaico e copernicano**. Tradução, introdução e notas de Pablo Rubén Mariconda. Editora 34. São Paulo, 2011.

GALILEI, G. **Dialogue Concerning the Two Chief World Systems** (1632). Trad. S. Drake and Abridged by S. E. Sciortino. First Edition. Berkeley: University of California Press, 1953.

GALILEI, G. **Dialogue Concerning The Two Chief World Systems – Ptolomaic and Copernican** (1632). Translated by Stillman Drake and forward by Albert Einstein. Second Edition. University of California Press, 1967.

GALILEI, G. **Dialogue Concerning Two New Sciences**. Trad. Henry Crow e Alfonso de Salvio. Dover Publications, Inc., New York, 1914.

GALILEI, G. **Il Saggiatori**. Firenze. G. Barbèra Editore, 1864

GALILEI, G. **Sidereus Nuncius or The Sideral Messenger**. Translated with introduction, conclusion and notes by Albert Van Helder. University of Chicago Press. Chicago and London, 1989.

GALILEI, G. **Two New Sciences**. Including Centers of Gravity and force of Percussion. Second Edition. Translated, with a new Introduction and Notes, by Stillman Drake. And History of Free Fall: Aristotle to Galileo, by Stillman Drake. Wall & Emerson, Inc. Toronto, 2008.

GARRISON, J. W. Newton and the Relation of Mathematics to Natural Philosophy. **Journal of the History of Ideas**. Vol. 48, 1987. p.609–627.

GARISTO, R. An Error in Isaac Newton's Determination of Planetary Properties. **American Journal of Physics**, N. 59, 1991. p.42-48.

GHINS, M. **Uma introdução à metafísica da natureza**: Representação, realismo e leis científicas. Tradução de Ronei C. Mocellin e Eduardo S. O. Barra. Editora UFPR, 2013.

GLANVILL, J. **Plus Ultra**: Or, the progress and advancement of knowledge since the days of Aristotle. In and account of some of the most remarkable late improvements of practical, useful learning: to encourage philosophical endeavours. Occasined by a conference with one of the notional way. Printed for James Collins at the Kings-Head in Westminster-Hall. London, 1668.

GLYMOUR, C. Hypothetico-Deductivism Is Hopeless. **Philosophy of Science**. Vol. 47, no. 2, 1980a, p. 322–325. JSTOR, www.jstor.org/stable/187090. Accessed 29 Dec. 2020.

GLYMOUR, C. **Theory and Evidence**. Princeton: Princeton University Press, 1980b.

GOLDBERG, S. Understanding relativity: Origin and Impact of a Scientific Revolution. Birkhauser, Boston, 1984.

GRANT, E. **A History of Natural Philosophy**: From the Antient World to Nineteenth Century. Cambridge University Press, 2007.

GRANT, E. **The Foundations of Modern Science in the Middle Ages**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

GRATTAN-GUINNESS, I. (ed.). **Landmark Writings in Western Mathematics, 1640-1940**. Elsevier, 2004.

GUICCIARDINI, N. **Isaac Newton and Natural Philosophy**. Reaktion Books Ltd. London, 2018.

GUICCIARDINI, N. Mathematics and the new Sciences. In: FOX, R.; BUCHWALD, J. (Ed.). **The Oxford Handbook of History of Physics**. Oxford: Oxford University Press, 2013. p.226-264.

GUICCIARDINI, N. **Newton on Mathematical Certainty and Method**. Cambridge, MA: The MIT Press, 2009.

GUICCIARDINI, N. Reding the *Principia*: The Debate on Newton's Mathematical Methods for Natural Philosophy from 1687 to 1736. Cambridge University Press. 1999.

HARPER, W. L. Acceptance and scientific method. In: HARPER, W. L. and WHEELER, G. (eds.) **Probability and Inference: Essays in Honour of Henry E. Kyburg, Jr.** London: King's College Press. 2007a. p.33-52.

HARPER, W. L. **Isaac Newton's Scientific Method: Turning Data into Evidence about Gravity and Cosmology**. Oxford University Press, 2011.

HARPER, W. L. and WHEELER, G. (eds.) **Probability and Inference: Essays in Honour of Henry E. Kyburg, Jr.** London: King's College Press. 2007.

HALL, A. R. **Philosophers at War: The Quarrel Between Newton and Leibniz**. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

HALL, A. R. Merton revisited or science and society in seventeenth century. **History of Science**, Vol. 2, p.1. 1963.

HEATH, T. L. Introduction. In: EUCLID. **The Thirteen Books of the Elements** (3 vols). Translated from the text of Heiberg with introduction and commentary by Sir Thomas L. Heath. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1968. p. 1-151

HEATH, T. L. **The Works of Archimedes**. Edited in Modern Notation with Introductory Chapters by Thomas L. Heath. Cambridge University Press, 1897.

HEILBRON, J. L. Electricity in the 17th and 18th centuries: a study of early modern physics. Berkeley: University of California Press. 1979.

HEILBRON, J. L (Ed). **The Oxford Companion to the History of Modern Science**. Oxford: Oxford University Press. 2003.

HERIVEL, J. **The Background to Newton's *Principia***: a Study of Newton Dynamical Researches in the years 1664-84. Oxford, 1965.

HETT, W.S. **Aristotle Minor Works**. With an English translation by W.S. Hett, MA. Cambridge, Massachusetts. Harvard University Press. Willian Heinemann, London, 1955.

HITTINKA e REMES. **The method of analysis: its Geometrical Origin and Its General Significance**. Boston Stidies in philosophy of science, vol. xxv. D. Reidel Publishing Company, 1974.

HOBBS, T. **De corpore (Elements of philosophy)**. London: Printed by R. & W. Leybourn, for Andres Crocke, 1656.

HOBBS, T. **The English Works of Thomas Hobbes of Malmesbury**. Edited by William Molesworth (11 vols). London: Bohn, 1839–1845. London: Routledge/Thoemmes Press, 1994.

HOFMANN, J. E. Leibniz in Paris 1672–1676: His Growth to Mathematical Maturity. Cambridge: Cambridge University Press, 1974.

HOOKE, R. **Micrographia** and some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquiries thereupon. London, printed by So. Martyn and Sa. Allestry, printers to the *Royal Society*, 1664.

HOOKE, R. **Posthumous Works of Robert Hooke**. Containing His Cutlerian Lectures, and Other Discourses, Read at the Meetings of the Illustrious *Royal Society*. Illustrated with Sculptures. To These Discourses is Prefixt the Author's Life. Published by Richard Waller. London, 1705.

HOWELL, W.S. 1971. **Eighteenth-century British logic and rhetoric**. Princeton: Princeton University Press.

HUTCHISON, Keith. What Happened to Occult Qualities in the Scientific Revolution? **Chicago Journal, History of Science Society**. Isis, Vol 73, No.2, Jun 1982. p. 233-253.

HUYGENS, C. (1673). **Horologium Oscillatorium**: sive, De motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae. Parisiis, 1673.

HUYGENS, C. **Oeuvres complètes de Christiaan Huygens**, 22 vols. 1888-1950.

HUYGENS, C. The Motion on Coliding Bodies. Trad. Richard Blackwell. **Isis**, vol. 68, 244, 1977. p.574-597.

HUYGENS, C. **The Pendulum Clock**: or Geometrical Demonstration concerning the Motion of a Pendula as Applied to Clocks. Ames. Transl. Richard Blackwell. The Iowa State University Press, 1986.

JARDINE, N. **The birth of History and Philosophy of Science**: Kepler's 'A Defence of Tycho against Ursus' with Essays on its Provenance and Significance. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

JESSEPH, D. M. Hobbes and the method of natural science. In: SORELL, T (Ed). **The Cambridge Companion to Hobbes**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. p.86-107

JESSEPH, D. M. **Squaring the Circle: The War Between Hobbes and Wallis**. Chicago: University of Chicago Press, 1999.

KANT, I. **Crítica da Razão Pura**. Trad. Valerio RoH-Den e Udo Baldur Moosburger. Nova Cultural. São Paulo, 1999.

KARGON, R. H. The testimony of nature: Boyle, Hooke and the Experimental Philosophy. **Albion: A Quarterly Journal Concerned with British Studies**, Vol. 3, No. 2, summer, 1971. p. 72-81

KEPLER, J. **Astronomia Nova**. Translated by William H. Donahue. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

KOYRÉ, A. **Do mundo fechado ao universo infinito**. Trad. Donaldson M. Garschagen Forense Universitária, 2006. Publicado originalmente pela John Hopkins University Press, 1957.

KOYRÉ, A. **Newtonian Studies**. Chapman & Hall. London, 1965.

KUHN, T. S. **A Estrutura das Revoluções Científicas** (1962). Trad. Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. 5º Edição. Editora Perspectiva, 1998.

LAKATOS, I. Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes. In: LAKATOS, I.; MUSGRAVE, A. **Criticism and Growth of Knowledge**. Proceedings of the international colloquium in the philosophy of science, London, vol. 4, 1965. Cambridge University Press, 1970. p.91-196.

LAKATOS, I. The Methodology of Scientific Research Programmes. Philosophical Papers, v.1. Edited by John Worrall and Gregory Currie. Cambridge University Press. 1978.

LAUDAN, L. A Confutation of Convergent Realism. **Philosophy of Science**. v.48, n.1, mar, 1981a. p. 19-49.

LAUDAN, L. **Science and Hypothesis**. Historical Essays on scientific methodology. Springer-Science + Business Media, BV. 1981b.

LAUDAN, L. **Progress and its Problems**: Towards a Theory of Scientific Growth (1977). Routledge & Kegan Paul. London, 1977.

LAUDAN, L. Teorias do Método Científico de Platão a Mach (1968). Trad. Balthazar Barbosa Filho. **Cad. Hist. Fil. Ciência, Campinas**. Série 3, v.10, n.2, jul-dez, 2000. p.9-140.

LEIBNIZ, G. W. Philosophical Letters Written by M. Leibniz and M. Hartsoeker. In: DE LA ROCHE, M. **Memoirs of Literature**. Containing a large account of many valuable books, letters and dissertations upon several subjects, miscellaneous observations. Vol. 4. Second Edition. London, 1722. p.452-471.

LEPLIN, J. (Ed.). **Scientific Realism**. Berkeley: University of California Press. 1984.

LOSEE, J. **A Historical Introduction to the Philosophy of Science** (1972). Fourth Edition. Oxford University Press, 2001.

MACH, E. **The Science of Mechanics**: A critical and historical account of its development. Translated from the German by Thomas J. Mckormack. The open court publications. London-Chicago, 1919.

MACHAMER, P. K. Aristotle on natural place and natural motion. **Isis**, Vol. 69, n. 3, p. 377-387. Sep, 1978.

MACHAMER, P. K. Galileo's machines, his mathematics, and his experiments. In: _____. **The Cambridge Companion to Galileo**. Edited by Peter K. Machamer. Cambridge: Cambridge University Press, 1998a. p. 53-79.

MACHAMER, P. K (Ed.). **The Cambridge Companion to Galileo**. Edited by Peter K. Machamer. Cambridge: Cambridge University Press, 1998b.

MAHONEY, M. S. Barrow's Mathematics: Between Ancients and Moderns. In: FEINGOLD, M. **Before Newton: The Life and Times of Isaac Barrow**. Edited by Mordechai Feingold, Cambridge: Cambridge University Press, 1990. p. 179–249.

MALCON, N. **Aspects of Hobbes**. Claredon Press. Oxford, 2002.

MAMIANI, M. To twist the meaning: Newton's *regulae philosophandi* revisited. In: BUCHWALD, J. Z.; COHEN, I. B. **Isaac Newton Newton's Natural Philosophy**. Edited by Jed Z. Buchwald and I. Bernard Cohen. The MIT Press, 2001. p. 3-14.

MATTHEWS, M. R. **Time for Science Education: How Teaching the History and Philosophy of Pendulum Motion Can Contribute to Science Literacy**. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2000.

MATTHEWS, M. R. **The Pendulum: Scientific, Historical, Philosophical and Educational Perspectives**. Edited by Michel Matthews. Springer, 2005.

MATHEWS, M. R. Scientific Background to Modern Philosophy. **Essays in the History and Philosophy of Science and Mathematics**. Chicago: Open Court. 1989.

MCGUIRE, J. E. Body and Void and Newton's *De mundi systemate*: Some New Sources, **Archive for History of Exact Sciences**, vol. 3, No. 3, nov, 1966. p.206-248.

MCGUIRE, J. E. Newton's Principles of Philosophy: An Intended Preface for the 1704 *Opticks* and a Related Draft Fragment. **The British Journal for the History of Science**, vol.5, No.18. 1970. p.178-186.

MCGUIRE, J. E.; TAMNY, M. Comentary. In: NEWTON, I. **Certain Philosophical Questions**: Newton's Trinity Notebook. Edited by James E. McGuire and Martin Tamny. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. p.3-327.

MCGUIRE, J. E. **Tradition and innovation, Newton's metaphysics of nature**. Series: The University of Western Ontario Series in Philosophy of Science vol. 56. Dordrecht: Kluwer, 1995.

MCGUIRE, J. E.; RATTANSI, Piyo. M. Newton and the 'Pipes of Pan'. Notes and Records of *Royal Society*, v. 21, p. 108-143, 1966.

MCMULLIN, E. The Impact of Newton's *Principia* on the Philosophy of Science. **Philosophy of Science**. Vol. 68, No.3, Sep., 2001. p.339-345.

MCKEON, R (Ed). **The Basic Works of Aristotle**. Edited by Richard McKeon. The modern library. New York, 1941.

MELI, D. B. The Axiomatic Tradition in Seventeenth-Century Mechanics. In: FRIEDMAN, M.; DOMSKI, M.; & DICKSON, M (eds.). **Discourse on a New Method: Reinventing the Marriage of History and Philosophy of Science**. Open Court, 2010.

MOLYNEUX, W. **Dioptrica nova**. A Treatise of Dioptricks, In Two Parts. Wherein the Various Effects and Appearances of Spherick Glasses, both Convex and Concave, Single and Combined, in Telescopes and Microscopes, Together with Their Usefulness in many Concerns of humane life, are explained. London: for Benj. Tooke, 1692.

MOSHENSKA, J. **Feeling Pleasures: The sense of Touch in Renaissance England**. Oxford University Press, 2014.

NEMÉNYI, P. F. The Main Concepts and Ideas of Fluid Dynamics in their Historical Development. **Archive for History of Exact Sciences**, Vol. 2, No. 1, nov, 1962. p. 52-86.

NEWTON, I. **Certain Philosophical Questions: Newton's Trinity Notebook**. Edited by James E. McGuire and Martin Tamny. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

NEWTON, I. An account of the book entitled *Comercium Epistolicum*. In: HALL, A. R. **Philosophers at War: The Quarrel Between Newton and Leibniz**. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. p.261-314.

NEWTON, I. De Analysi per Aequationes Numero Terminorum Infinitas. In: _____. **The Mathematical Papers of Isaac Newton**. Edited by Derek T. Whiteside. Vol. 2: 1667-1670. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

NEWTON, I. De Gravitatione et Aequipondio Fluidorum. In: _____. **Philosophical Writings**. Edited by Andrew Janiak. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. p.12-39

NEWTON, I. De Motu. In: HERIVEL, J. **The Background to Newton's *Principia*: a Study of Newton Dynamical Researches in the years 1664-84**. Oxford, 1965. p.257-303.

NEWTON, I. De Motu Corporum (On Motion). In: WHITESIDE, D. T. **The Mathematical Papers of Isaac Newton**. Edited by Derek T. Whiteside (8 vols). Vol. 7: 1684-1691. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. p.30-228.

NEWTON, I. De Quadratura Curvarum. In: WHITESIDE, D. T. **The Mathematical Papers of Isaac Newton**. Edited by Derek T. Whiteside (8 vols). Vol. 8: 1697-1722. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. p.92-167.

NEWTON, I. *Geometriae Libri Duo*. In: WHITESIDE, D. T. **The Mathematical Papers of Isaac Newton**. Edited by Derek T. Whiteside (8 vols). Vol. 7: 1691-1695. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. p. 402-561.

NEWTON, I. *Lectiones Opticae* (1670-1672). In: SHAPIRO, A. **The Optical Papers of Isaac Newton**. (3 vol). Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

NEWTON, I. **Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World** (2 vols). Third Edition. Translated into English by Andrew Motte in 1729. The translations revised, and supplied with an historical and explanatory appendix by Florian Cajori in 1934. Eighth Printing. University of California Press, 1934.

NEWTON, I. **Opticks**: Or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. Third Edition. London: Printed for William and John Innys at the West End of St. Paul's, 1721.

NEWTON, I. **Philosophia Naturalis Principia Mathematica**. Autore Is. Newton, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali. Imprimatur. S. Pepys, Reg. Soc. Praesses. Londini, 1686.

NEWTON I. **Philosophia Naturalis Principia Mathematica**. Third Edition (1726). With variant readings. Assembled and Edited by Alexandre Koyré and I. Bernard Cohen, with assistance of Anne Whitman. Harvard University Press, 1972.

NEWTON, I. **Philosophical Writings**. Edited by Andrew Janiak. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

NEWTON, I. **Textos, Antecedentes e Comentários**. Escolhidos e organizados por I. Bernard Cohen e Richard S. Westfall. Tradução de Vera Ribeiro. Contraponto: EdUERJ. Rio de Janeiro, 2002.

NEWTON, I. **The Correspondence of Isaac Newton**. (7 vols). Edited by H. W. Turnbull, J. F. Scott, A. R. Hall and L. Tilling. Cambridge: Cambridge University Press, 1959-1977.

NEWTON, I. **The Mathematical Principles of Natural Philosophy**. Translated into English By Andrew Motte: To Which are Added the System of the World. First American edition carefully revised and corrected. Published by Daniel Adee. New York, 1846.

NEWTON, I. **The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy**. A new translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman, assisted by Julia Budenz, preceded by a guide to Newton's *Principia* by I. Bernard Cohen. Berkeley, CA: University of California Press, 1999.

NEWTON, I. **The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy**. Preceded by a Guide to Newton's *Principia* by I. Bernard Cohen. Translated by I. Bernard Cohen and Anne Whitman, assisted by Julia Budenz. Berkeley: University of California Press, 1999.

NEWTON, I. **Waste Book**. MS Add. 4004, Cambridge University Library, Cambridge, UK. Acessado digitalmente em *The Newton Project*: www.newtonproject.ox.ac.uk/catalogue/record/NATP00176.

OKHAM, G. Reportatio, II. In: Tomás de Aquino, Dante Alighieri, John Duns Scot e William of Okham. Coleção os Pensadores, Abril Cultural, São Paulo, 1973.

OTTE, M.; PANZA, M. (Eds). **Analysis and Synthesis in mathematics: history and philosophy**. Boston studies of philosophy of science, vol. 196. Kluwer academic publiser, 2001.

PALMERINO, C. R. Galileo's Theories of Free Fall and Projectile Motion as interpreted by Pierre Gassendi. In: PALMERINO, C.R.; THIJSEN, J.M.M.H (Ed.). **The reception of Galilean Science of Motion in Seventeenth Century Europe**. Kluwer Academic Publishers, 2004. p.137-164.

PALMERINO, C. R.; THIJSEN, J.M.M.H (Ed.). **The reception of Galilean Science of Motion in Seventeenth Century Europe**. Kluwer Academic Publishers, 2004.

PAPPUS. **Mathematical Collection, Book VIII**. Translated from the Arabic text by D. Jackson, Digital Research Library for The Archimedes Project, 1970.

PAPPUS. *Collectio*, VIII. In: THOMAS, I. B (Ed.) **Selections illustrating the history of Greek mathematics**. Vol. 2: From Aristarchus to Pappus. With and English translation from greek by Ivor Thomas. London, Cambridge, Mass. W. Heinemann, ltd. Harvard University Press, 1941.

PAPPUS. **Pappus of Alexandria: Book 4 of the Collection**. Edited With Translation and Commentary by Heike Sefrin-Weis. Springer, 2010.

PARKER, S. **A free and impartial censure of the Platonick philosophie**. Being a Letter written to his much honoured friend Mr. N. B. Oxford, Printed by W. Hall, for Richard Davis, 1666.

PATY, M. Mathesis universalis e inteligibilidade em Descartes. Trad. em português por Maria Aparecida Corrêa-Paty. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**. Série 3, vol. 8, n.1, jan-jun de 1998. p. 9-57.

PEDERSEN, O. **Early Physics and Astronomy: Na historical introduction**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

POPPER, K. R. **Lógica da Pesquisa Científica** (1934). Trad. Leonidas Hegenberg e Octanny Silveira da Mota. Editora Cultrix. São Paulo, 1974.

PORTO, C.M.; PORTO, M.B.D.S.M. Galileu, Descartes e a elaboração do princípio da inércia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 4, 4601, 2009.

POWER, H. **Experimental Philosophy in three books**: containing new experiments microscopical, mercurial, magnetical: with some deductions, and probable hypotheses, raised from them, in avouchment and illustration of the now famous atomical hypothesis. London: Printed by T. Roycroft, for John Martin and James Allestry, 1664.

PYCIOR, Helena M. **Symbols, Impossible Numbers, and Geometric Entanglements: British Algebra Through the Commentaries on Newton's Universal Arithmetick**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

REINCHENBACH, H. **Experience and prediction**: an analisys of the foundations and the structure of knowledge. University of Chicago Press, 1938.

ROSSI, P. **O nascimento da ciência moderna na Europa**. Trad. Antônio Angonese. Edusc. Bauru, São Paulo, 2001.

SAGENG, Erik. Colin MacLaurin and the Foundations of the Method of Fluxions. Ph.D. diss., Princeton University, 1989.

SANDERSON, R. **Logicae artis compendium**. Editio Nova Emendata. Oxonii. J. Abrams. Londini, G. Bell, 1816.

SCHICKORE, J. & FRIEDRICH S (eds.). **Revisiting Discovery and Justification**. Historical and Philosophical Perspectives on the Context Distinction, New York: Springer, 2006.

SEFRIN-WEIS, H. General Introduction. In: PAPPUS. **Pappus of Alexandria: Book 4 of the Collection**. Edited With Translation and Commentary by Heike Sefrin-Weis. Springer, 2010.

SEPKOSKI, D. Nominalism and Constructivism in Seventeenth-Century Mathematical Philosophy. London: Routledge, 2007.

SERGEANT, J. **The Method to Science**. London, 1696

SGARBI, M. **The Aristotelian Philosophy and the Rise of the Empiricism. Logic and Epistology in British Isles (1570-1689).** Studies in history and philosophy of science, vol. 32. Springer, 2013.

SHAPIRO, A. Newton Experimental Philosophy. **Early Science and Medicine**, 9, 3. Koninklijke Brill NV, Leiden, 2004. p.185-217.

SHAPIN. Understanding the Merton Thesis. **Isis** 79(4). 1988. 594-605.

SHAPIRO, A. **The Optical Papers of Isaac Newton.** (3 vol). Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

SHAPIRO, B. J. **Probability and Certainty in Seventeenth-Century England:** A Study of the Relationships Between National Science, Religion, History, Law and Literature. Princeton: Princeton University Press, 1983.

SHEA, W. R. Descartes as Critic of Galileo. In: BUTTS, R.E.; PITT, J.C. (Eds). **New Perspectives on Galileo:** Papers Deriving from and Related to a Workshop on Galileo held at Virginia Polytechnic Institute and State University, 1975. D. Reidel Publishing Company. Boston, 1978. p.139-160.

SHEA, W. R. The rational Descartes and the empirical Galileo. In: PALMERINO, C. R.; THIJSEN, J.M.M.H (Ed.). **The reception of Galilean Science of Motion in Seventeenth Century Europe.** Kluwer Academic Publishers, 2004. p.67-82.

SMEENK, C.; SCHLIESSER, E. (eds). **The Oxford Handbook of Newton.** Oxford University Press, 2018.

SMITH, G. E. The Methodology of the *Principia*. In: COHEN, I. B.; SMITH, G. M. (Eds). **The Cambridge Companion to Newton.** Cambridge: Cambridge University Press, 2002. p.138-173.

SMITH, S. **Aditus ad Logicam.** London: Apud Ed. Griffin pro Tho. Whitaker. 1649.

SORELL, T (Ed). **The Cambridge Companion to Hobbes.** Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

STALEY, R. Einstein's Generation: The origins of the Relativity Revolution. University of Chicago Press, 2008.

TAIT, P.G.; THOMPSON, W. **Treatise on Natural Philosophy.** Part I. Cambridge: Cambridge University Press, 1912.

TALIAFERRO, R. C. **Rational Mechanics**: The Classic Notre Damme Course. Edited by A. Hahn, T. Banchoff and F. Crosson. Dover Publications. 2014

THOMAS, I. B. **Selections illustrating the history of Greek mathematics**. Vol. 2: From Aristarchus to Pappus. London, Cambridge, Mass. W. Heinemann, ltd. Harvard University Press, 1941.

TRUESDELL, C. **Essays on History of Mechanics**. Springer-Verlag New York Inc, 1968.

VAN HELDER, A. Conclusion: the reception of Sidereus Nuncius. In: GALILEO, G. **Sidereus Nuncius or The Sideral Messenger**. Translated with introduction, conclusion and notes by Albert Van Helder. University of Chicago Press. Chicago and London, 1989. p. 87-113.

WESTFALL, R. S. **Force in Newton's Physics**: the science of dynamics in seventeenth century. Neale Watson Academic Publications. New York, 1971.

WESTFALL, R. S. **Never at Rest: A Biography of Isaac Newton**. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

WESTFALL, R. S. Newton and the fudge factor. **Science**. Vol. 179, Issue 407523, Fev 1973, p. 751-758

WESTMAN, R. S. Huygens and the problem of Cartesianism. In: BOS, H. J. M.; RUDWICK, M. J. S.; SNELDERS, H. A. M.; e VISSER, R. P. W. (Eds). **Studies on Christiaan Huygens**: invited papers from the Symposium on the Life and Work of Christiaan Huygens. Amsterdam, Lisse: Swets & Zeitlinger B. V., 1980. p. 83–103.

WHEWELL, W. **History of the inductive sciences**: from the earliest to the present times. (3 vols). London, 1837.

WHEWELL, W. **On the philosophy of Discovery**. Including the completion of the third edition of the philosophy of inductive sciences. London, John W. Parker and Son, West Strand, 1860.

WHEWELL, W. **The philosophy of inductive sciences**: founded upon their history. (2 vols). London, 1840.

WHITESIDE, D. T. **The Mathematical Papers of Isaac Newton**. (7 vols). Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

YODER, J.G. **Unrolling Time: Christiaan Huygens and the Mathematization of Nature**. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RICARDO BATISTA DOS SANTOS

O NASCIMENTO DA CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA:
UM ESTUDO SOBRE O PROGRAMA METODOLÓGICO DOS *PRINCIPIA* DE ISAAC
NEWTON

EM DOIS VOLUMES,
Paginados e capitulados continuamente.

VOL.2

CURITIBA

2021

RICARDO BATISTA DOS SANTOS

O NASCIMENTO DA CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA:
UM ESTUDO SOBRE O PROGRAMA METODOLÓGICO DOS *PRINCIPIA* DE ISAAC
NEWTON

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Filosofia do Setor de Ciências Humanas, Letras e Artes
da Universidade Federal do Paraná, como requisito
parcial à obtenção do grau de doutor em Filosofia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Salles de Oliveira Barra

VOL.2

CURITIBA

2021

[Ficha catalográfica]

*Ele tomou o seu cajado na mão,
Escolheu cinco pedras no ribeiro
Colocou-as no seu alforge.
E, lançando mão da sua funda,
Partiu em direção ao gigante.*

Samuel, VII a.C.

RESUMO

O presente trabalho investiga o programa metodológico dos *Principia* de Isaac Newton tanto do ponto de vista histórico quanto do ponto de vista da filosofia da ciência, com o objetivo de iluminar problemas desse campo, e em especial o problema da racionalidade científica. Do ponto de vista histórico, o tratado de Newton e a sua teoria da gravitação universal são detalhadamente apresentados e analisados, e se defende que nessa obra Newton elaborou um novo plano de investigação da natureza que levou, por fim, ao sepultamento definitivo da antiga filosofia natural aristotélica. O célebre “*hypotheses non fingo*” é entendido, nesse contexto, com uma eloquente exaltação da epistemologia rigidamente empirista dessa distinta abordagem, que convenientemente foi aqui chamada de um programa de uma *ciência empírico-matemática*. Do ponto de vista da filosofia da ciência, defende-se que o referido programa de Newton se fundamenta numa ampla e sofisticada estrutura confirmacionista de investigação da natureza, estrutura que não padece dos conhecidos problemas vinculados aos vários modelos de confirmação H-D esmiuçados e desacreditados no último século, e que é capaz de produzir genuínas e suficientes confirmações qualitativas por meio da convergência indutiva. Argumenta-se que esse programa foi responsável pelo surgimento da física teórica que, por sua vez, impulsionou a delineação do próprio programa de ciência empírica natural atual. A análise detalhada dos fundamentos desse programa mostra que ele foi incorporado pelos sucessores de Newton até os nossos dias, e revela novos parâmetros para compreender a estrutura e funcionamento da ciência, viabilizando uma perspectiva de resposta diferenciada para vários problemas de grande repercussão da filosofia da ciência, tais como, o problema do impregnacionismo teórico, dos experimentos cruciais, do progresso científico, do realismo científico, do estatuto epistemológico das teorias, além de um encaminhamento distinto para o famoso problema da indução. As referidas análises reforçam a viabilidade de se resgatar a confiança em uma ciência objetiva, progressiva e realista, substantivamente fundada em parâmetros aceitáveis de racionalidade.

Palavras-chave: Isaac Newton. *Principia*. Método científico. Confirmacionismo. Racionalidade da ciência.

ABSTRACT

The present work investigates the methodological program of Newton's *Principia* both from a historical the point of view, and from the point of view of the philosophy of science, in order to illuminate enduring problems of this field, and particularly the problem of scientific rationality. From the historical perspective, Newton's treatise and his theory of universal gravitation are presented and analyzed in detail, and it is argued that he organized, in this work, a new scheme for the investigation of natural phenomena that ultimately led to the demolition of ancient aristotelian natural philosophy. The famous statement “*hypotheses non fingo*” is understood, in this context, as an eloquent praise to the rigidly empiricist epistemology of this distinct approach, which was conveniently called here a program of an *empirical-mathematical science*. From the perspective of philosophy of science, it is argued that this program is based on a broad and sophisticated confirmationist apparatus, which is not plagued with the known problems of the various H-D confirmation models scrutinized and discredited in the last century, and that it is capable of producing genuine and sufficient qualitative confirmations through inductive convergence. It is argued that this program was responsible for the emergence of theoretical physics which, in turn, propelled the delineation of the current empirical natural science program itself. A detailed analysis of the foundations of this program shows that it was incorporated by the posterior science to the present day, and reveals new parameters to understand the structure and functioning of science, enabling a different response to several problems of great importance in philosophy of science, such as the problem of theory-ladenness, the problema of crucial experiments, of scientific progress, of scientific realism, of the epistemological status os theories, as well as a new direction of understanding for the famous problem of induction. These analyses strengthen the viability of restoring confidence in an objective, progressive and realist science, substantially founded on acceptable grounds of rationality.

Key-Words: Isaac Newton. *Principia*. Scientific Method. Confirmationism. Rationality of science.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DO MOVIMENTO UNIFORMEMENTE ACELERADO DE GALILEU. FONTE: <i>DISCORSI</i> [CROW E SALVIO], p.173.	80
FIGURA 2: REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DO MOVIMENTO UNIFORMEMENTE ACELERADO DE BARROW. FONTE: <i>LECTIONES</i> , p. 40.	81
FIGURA 3: UM CONE GERADO PELA ROTAÇÃO DE UMA EXTREMIDADE DE UMA RETA, MANTENDO A OUTRA FIXA. FONTE: <i>LECTIONES</i> , p. 44.	82
FIGURA 4: ILUSTRAÇÃO DE NEWTON NO ESCÓLIO DAS LEIS DO MOVIMENTO EXEMPLIFICANDO OS EXPERIMENTOS DE COLISÃO USANDO PÊNDULOS.	171
FIGURA 5: DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE FORÇAS ATUANDO DURANTE O IMPACTO ENTRE DOIS CORPOS, A E B.	174
FIGURA 6: DIAGRAMA DE FORÇAS DURANTE O IMPACTO ENTRE DOIS CORPOS, A E B, CONSIDERANDO APENAS AS FORÇAS <i>IMPRESSAS</i>	176
FIGURA 7 – DOIS CORPOS ELÁSTICOS COLIDINDO PODEREM SER COMPARADOS A DOIS CORPOS COLIDINDO COM UMA MOLA ENTRE ELES. FONTE: O AUTOR.....	177
FIGURA 8 – MESMO EM CORPOS ELÁSTICOS, PARA QUE A FORÇA DE RESISTÊNCIA OCORRESSE TAL COMO OBSERVADA NOS EXPERIMENTOS DEVERIA HAVER UMA RESISTÊNCIA ATUANDO JÁ NO PRIMEIRO CONTATO NÃO ELÁSTICO ENTRE AS PARTÍCULAS DAS SUPERFÍCIES DOS CORPOS.....	178
FIGURA 9 – INTERPRETAÇÃO MAIS ACABADA DE NEWTON PARA O FENÔMENO DA COLISÃO ENTRE DOIS CORPOS. DURANTE A COLISÃO SURTIRÃO FORÇAS IGUAIS E OPOSTAS – A AÇÃO E REAÇÃO.	180
FIGURA 10 – MINHA ILUSTRAÇÃO MANUAL DA DESCRIÇÃO OFERECIDA POR NEWTON NO ESCÓLIO DA PROPOSIÇÃO 4 DO LIVRO I.....	186
FIGURA 11: ILUSTRAÇÃO DE NEWTON NO <i>DE MUNDI SYSTEMATE</i> . O PROJÉTIL LANÇADO DE CIMA DA MONTANHA PERCORRE UMA DISTÂNCIA CADA VEZ MAIOR ATÉ PERMANECER EM ÓRBITA. FONTE: <i>DE MUNDI SYSTEMATE</i> , p.551.....	188
FIGURA 12: UM CORPO EM MOVIMENTO SEM QUALQUER AÇÃO DE FORÇAS, OU COM UMA FORÇA RESULTANTE NULA, GERA UMA LINHA RETA. FONTE: O AUTOR.	199
FIGURA 13: UM CORPO EM MOVIMENTO QUE SOFRE A AÇÃO DE UMA FORÇA CONTÍNUA E CONSTANTE PERPENDICULAR AO MOVIMENTO DO CORPO GERA UMA LINHA CURVA SEMI-PARÁBOLICA. FONTE: O AUTOR.....	199

FIGURA 14: UM CORPO EM MOVIMENTO SOB A AÇÃO DE UMA FORÇA CENTRÍPETA CONSTANTE IRÁ PRODUZIR UMA TRAJETÓRIA CIRCULAR. FONTE: O AUTOR.....	201
FIGURA 15: ILUSTRAÇÃO DO PROBLEMA 4.	202
FIGURA 16: FIGURA DA PROPOSIÇÃO 8 DO LIVRO I DOS <i>PRINCIPIA</i> . ADAPTADO PELO AUTOR. .	202
FIGURA 17: FIGURA DA PROPOSIÇÃO 9 DO LIVRO I DOS <i>PRINCIPIA</i> . ADAPTADO PELO AUTOR. .	203
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DE NEWTON DA PROPOSIÇÃO 1 DO LIVRO I.	210
FIGURA 19 – MINHA ILUSTRAÇÃO MANUAL DO PROCEDIMENTO DE NEWTON NA PROPOSIÇÃO 1 DO LIVRO I.	211
FIGURA 20 – DESTAQUE DOS PRIMEIROS DOIS TRIÂNGULOS DA FIGURA ANTERIOR. PELA “PROPRIEDADE DA MEDIANA” A ÁREA DOS DOIS TRIÂNGULOS RECORTADOS POR SB SÃO IGUAIS. FONTE: O AUTOR	211
FIGURA 21 – OS TRIÂNGULOS SBC E SBC TÊM A MESMA BASE E A MESMA ALTURA, PORTANTO POSSUEM ÁREAS IGUAIS.....	212
FIGURA 22 – ILUSTRAÇÃO MINHA DA PROPOSIÇÃO 38 DE EUCLIDES.	212
FIGURA 23 – ILUSTRAÇÃO DO COROLÁRIO 1 DA PROPOSIÇÃO 1 DO LIVRO I. SA’ E SG’ SÃO AS DISTÂNCIAS PERPENDICULARES ATÉ O PROLONGAMENTO DAS TANGENTES NOS PONTOS A E G. FONTE: O AUTOR.....	214
FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO DA <i>SAGITTA</i> , QUE É A DISTÂNCIA DELIMITADA PELO ARCO AC. A FORÇA CENTRÍPETA É PROPORCIONAL À <i>SAGITTA</i> . FONTE: <i>MC</i> , p.40. ADAPTADO PELO AUTOR.	216
FIGURA 25 – A REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DA PROPOSIÇÃO 2 É IGUAL À PROPOSIÇÃO 1. .	218
FIGURA 26 – PELA PROPOSIÇÃO 40 DE EUCLIDES BV ESTÁ NA DIREÇÃO DO PONTO S.	219
FIGURA 27 – ILUSTRAÇÃO MINHA DA PROPOSIÇÃO 4 DO LIVRO I.....	220
FIGURA 28 – <i>SAGITTA</i> DE UM ARCO QUALQUER NUM CÍRCULO.	221
FIGURA 29 – <i>SAGITTA</i> EM ASSOCIAÇÃO COM UM TRIÂNGULO RETÂNGULO INSCRITO NUMA CIRCUNFERÊNCIA.....	222
FIGURA 30 – ILUSTRAÇÃO MINHA DO COROLÁRIO 9 DA PROP. 4 DO LIVRO I.	227
FIGURA 31 – SUBTENSE DA TANGENTE NO PONTO P DE UM CÍRCULO.	228
FIGURA 32 – REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DE NEWTON NA PROPOSIÇÃO 4 DO LIVRO I NA PRIMEIRA EDIÇÃO DOS <i>PRINCIPIA</i>	228
FIGURA 33 – REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DE NEWTON NA PROP.6 DO LIVRO I.	231
FIGURA 34 – PRINCIPAIS SEGMENTOS DE UMA ELIPSE.	233
FIGURA 35 – DISTÂNCIAS FOCAIS DE UMA ELIPSE.....	234
FIGURA 36 – TANGENTE E DISTÂNCIAS FOCAIS EM UM PONTO DA ELIPSE.	234

FIGURA 37 – RETA NORMAL À TANGENTE NUMA ELIPSE.....	235
FIGURA 38 – TANGENTES EM PONTOS OPOSTOS NUMA ELIPSE.	236
FIGURA 39 – DIÂMETROS CONJUGADOS NUMA ELIPSE.	236
FIGURA 40 – PARALELOGRAMOS CIRCUNSCRITOS NUMA ELIPSE.....	237
FIGURA 41 – ORDENADA DOS EIXOS DE UMA ELIPSE.....	238
FIGURA 42 – ORDENADAS DOS DIÂMETROS CONJUGADOS DE UMA ELIPSE.....	239
FIGURA 43 – CORPO P SE MOVENDO NUMA TRAJETÓRIA ELÍPTICA. S E H SÃO OS FOCOS DA ELIPSE, EQUANTO C É O CENTRO. AA' E BB' SÃO OS EIXOS PRINCIPAL E SECUNDÁRIO.	
FONTE: O AUTOR.....	240
FIGURA 44 – CONSTRUÇÃO GEOMÉTRICA ENSINADA NAS PROP. 4 E 6 DOS <i>PRINCIPIA</i>	241
FIGURA 45 – DCK E PCG SÃO OS DIÂMETROS CONJUGADOS DA ELIPSE.	242
FIGURA 46 – PS E PH SÃO AS CORDAS FOCALIS DA ELIPSE.	242
FIGURA 47 – FIGURA DE NEWTON NA PROP. 11 DOS <i>PRINCIPIA</i>	243
FIGURA 48 – SEGMENTO SEIP RETIRADO DA FIGURA ANTERIOR	244
FIGURA 49 – MOVIMENTO RETRÓGRADO DE MARTE	264
FIGURA 50 – SISTEMA DE COORDENADAS ECLÍPTICAS	266
FIGURA 51 – SÍMBOLOS DAS 12 CONSTELAÇÕES DO ZODÍACO	267
FIGURA 52 – PRECESSÃO DOS EQUINÓCIOS	268
FIGURA 53 – DIAGRAMA DE KEPLER PARA O MOVIMENTO DE MARTE NUM SISTEMA GEOCÊNTRICO.....	269
FIGURA 54 – MOVIMENTO RETRÓGRADO DE MARTE EXPLICADO PELA PERSPECTIVA HELIOCENTRISTA	270
FIGURA 55 – O SISTEMA GEO-HELIOCÊNTRICO DE TYCHO BRAHE	271
FIGURA 56 – LEI DAS ÁREAS DE KEPLER NUMA TRAJETÓRIA ELÍPTICA. FONTE: HARPER, 2011, p.12.	272
FIGURA 57 – REGISTROS DAS OBSERVAÇÕES TELESCÓPICAS DE GALILEU DAS LUAS DE JÚPITER, COMPILADAS PELOS JESUÍTAS ASTRÔNOMOS DO COLÉGIO ROMANO. FONTE: HARPER, 2011, p.52.	275
FIGURA 58 – FASES DE VÊNUS EXPLICADA DE MODO SATISFATÓRIO PELO SISTEMA COPERNICANO, MAS NÃO PELO SISTEMA PTOLOMAICO. FONTE: HARPER, 2011, p. 58.	275
FIGURA 59 – TELESCÓPIO DE 123 PÉS DE HUYGENS	276
FIGURA 60 – MODELO DOS VÓRTICES DE DESCARTES.....	278
FIGURA 61 – SEGUNDA PARTE DO <i>HOROLOGIIUM</i> DE HUYGENS NA PUBLICAÇÃO ORIGINAL EM LATIM.	284

FIGURA 62 – HIPÓTESES DO LIVRO III DOS <i>PRINCIPIA</i> NA PRIMEIRA EDIÇÃO EM LATIM.	285
FIGURA 63 – ANOTAÇÕES DE NEWTON NA SUA PRIMEIRA EDIÇÃO PARTICULAR DOS <i>PRINCIPIA</i> VISANDO AS ALTERAÇÕES PARA A SEGUNDA EDIÇÃO.	287
FIGURA 64 – ÂNGULO DE ELONGAÇÃO DE UM DOS SATÉLITES DE JÚPITER	301
FIGURA 65 – SOMBRAS DOS SATÉLITES DE JÚPITER EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE POSIÇÃO RELATIVAS.....	306
FIGURA 66 – ÂNGULO DE ELONGAÇÃO MÁXIMA ENTRE VÊNUS E O SOL.	307
FIGURA 67 – APSIDES DAS ÓRBITAS DA TERRA E DA LUA. OBS.: FIGURA FORA DE ESCALA.....	324
FIGURA 68 – ÓRBITA GIRATÓRIA.	325
FIGURA 69 – ÂNGULO DE PRECESSÃO DA ÓRBITA GIRATÓRIA	326
FIGURA 70 – DIAGRAMA VETORIAL DO PROBLEMA DOS TRÊS CORPOS. PROP. 66, LIVRO I.....	334
FIGURA 71 – DIAGRAMA VETORIAL DA “FORÇA ESTRANHA” DO SOL ATUANDO NA LUA	336
FIGURA 72 – “FORÇA ESTRANHA” DURANTE A <i>SIZÍGIA</i>	339
FIGURA 73 – EXPERIMENTO IMAGINADO POR MERSENE PARA DETERMINAR <i>S1seg</i>	345
FIGURA 74 – DIAGRAMA DO COR.4, PROP.9 DO LIVRO I.....	353
FIGURA 75 – AÇÃO E REAÇÃO EM DIFERENTES SITUAÇÕES.	376
FIGURA 76 – ATRAÇÃO DAS PARTES DE A EM DIREÇÃO A B E DAS PARTES DE B EM DIREÇÃO A A.	399
FIGURA 77 – ATRAÇÃO DE CADA PARTE DE A EM DIREÇÃO A CADA PARTE DE B, E VICE-VERSA.	400
FIGURA 78 – ATRAÇÃO ENTRE AS PARTES DA TERRA E DA LUA HIPOTETICAMENTE IMAGINADAS COM 9 E 4 PARTES RESPECTIVAMENTE. CADA PARTE DA TERRA ATRAI TODAS AS PARTES DA LUA. E CADA PARTE DA LUA ATRAI TODAS AS PARTES DA TERRA. FONTE: O AUTOR	406
FIGURA 79 – FORÇA ABSOLUTA ENTRE A E B.	406
FIGURA 80 – FORÇA ENTRE A PARTE ‘1’ DA TERRA E A PARTE ‘2’ DA LUA.	407
FIGURA 81 – DESLOCAMENTO DA TERRA EM RELAÇÃO A UMA ESTRELA FIXA MUITO AFASTADA. A FIGURA ESTÁ FORA DE ESCALA.....	416
FIGURA 82 – DIAGRAMA DOS DOIS GLOBOS GIRANTES SUGERIDO NO ESCÓLIO DAS DEFINIÇÕES.	420
FIGURA 83 – CORPO DE MESMA MASSA A IGUAL DISTÂNCIA DO SOL E DOS PLANETAS.	427
FIGURA 84 – DIAGRAMA PARA DETERMINAR A RAZÃO ENTRE AS FORÇAS ACELERATIVAS EM DIREÇÃO AO SOL E A JÚPITER A UMA MESMA DISTÂNCIA DO CENTRO DESSES ASTROS. FONTE: O AUTOR.....	429
FIGURA 85 – ELONGAÇÃO MÁXIMA DE VÊNUS NA SUA ÓRBITA EM TORNO DO SOL.	431

FIGURA 86 – ELONGAÇÃO MÁXIMA DE CALISTO EM RELAÇÃO À TERRA E EM RELAÇÃO AO SOL.	432
FIGURA 87 – DETERMINAÇÃO DO RAIO DA ÓRBITA DE CALISTO EM TORNO DE JÚPITER EM UNIDADES ASTRONÔMICAS.	433
FIGURA 88 – ÂNGULO DE PARALAXE SOLAR.....	434
FIGURA 89 – CENTRO DE GRAVIDADE DO SOL E JÚPITER. FIGURA FORA DE ESCALA.	436
FIGURA 90 – CENTRO DE GRAVIDADE DO SOL E SATURNO. FIGURA FORA DE ESCALA.....	437
FIGURA 91 – CENTRO DE GRAVIDADE DO SOL E DOS PLANETAS. FIGURA FORA DE ESCALA.....	437
FIGURA 92 – ESTRUTURA IDEALIZADA DO MUNDO, SOB A TESE DA SIMPLICIDADE DA NATUREZA	451
FIGURA 93 – VARIEDADE DE PROPRIEDADES DOS CORPOS SOB A TESE DA SIMPLICIDADE DA NATUREZA	452
FIGURA 94 – HIERARQUIA DAS CAUSAS E EFEITOS DE ACORDO COM PRINCÍPIO DA SIMPLICIDADE DA NATUREZA.....	457
FIGURA 95 – APLICAÇÃO DAS REGRAS 3 E REGRA 4 ÀS INTERAÇÕES DA NATUREZA	473
FIGURA 96 – MÉTDO INDUTIVO E DEDUTIVO DE ARISTÓTELES. FONTE: LOSEE, 2001, p.5.....	590
FIGURA 97 – PIRÂMIDE INDUTIVA DE BACON. FONTE: LOSEE, 2001, p.58.....	596
FIGURA 98 – DIFERENÇA DOS MODELOS NAS ETAPAS DA ANÁLISE E SÍNTESE NOS <i>PRINCIPIA</i> . FONTE: O AUTOR.....	682
FIGURA 99 – DIAGRAMA COMPARATIVO DO ESTILO NEWTONIANO. FONTE: O AUTOR.....	686
FIGURA 100 – DIAGRAMA DE TRANSIÇÃO DE MODELOS NA ANÁLISE E SÍNTESE. FONTE: O AUTOR.	687
FIGURA 101 – DIAGRAMA DE ELIMINAÇÃO DE HIPÓTESES E CONFIRMAÇÃO NA CIÊNCIA. FONTE: O AUTOR.	787
FIGURA 102 – DIAGRAMA DE ELIMINAÇÃO DE HIPÓTESES NOS <i>PRINCIPIA</i> . FONTE: O AUTOR. ..	788
FIGURA 103 – DIAGRAMA DA SÍNTESE. FONTE: O AUTOR.	788
FIGURA 104 – DIAGRAMA DA ANÁLISE E SÍNTESE NA BUSCA DE UMA CAUSA MAIS GERAL.	789
FIGURA 105 – DIAGRAMA DA ANÁLISE E SÍNTESE NUMA ETAPA MAIS GERAL. FONTE: O AUTOR.	789
FIGURA 106 – PROCESSO DE CONFIRMAÇÃO DA HIPÓTESE DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS. FONTE: O AUTOR.....	792
FIGURA 107 – PROCESSO DE ANÁLISE DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS. FONTE: O AUTOR.....	793
FIGURA 108 – PROCESSO DE ANÁLISE DA LEI DA RELATIVIDADE. FONTE: O AUTOR.....	794

FIGURA 109 – PROCESSO DE CONFIRMAÇÃO COM BASE NA RELATIVIDADE GERAL. FONTE: O AUTOR.	796
FIGURA 110 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE UNIFICAÇÃO NA FÍSICA. FONTE: O AUTOR.	800
FIGURA 111 – DIAGRAMA DO PROCESSO DE UNIFICAÇÃO NA FÍSICA INCLUINDO A MECÂNICA QUÂNTICA. FONTE: O AUTOR.	802
FIGURA 112 – GRÁFICO DAS FORÇAS INTERATÔMICAS. FONTE: DOMÍNIO PÚBLICO.	804
FIGURA 113 – CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA COGNITIVA. FONTE: O AUTOR.	843
FIGURA 114 – EXPERIMENTO DO PLANO INCLINADO DE GALILEU PARA EVIDÊNCIAR O MOVIMENTO HORIZONTAL UNIFORME. FONTE: DOMÍNIO PÚBLICO	885
FIGURA 115 – CENTRO DE GRAVIDADE NUMA BALANÇA.	920
FIGURA 116 – CENTRO DE GRAVIDADE DE DUAS ESFERAS COLIDINDO.....	921
FIGURA 117 – DURANTE A COLISÃO DE DOIS CORPOS O CENTRO A POSIÇÃO DO CENTRO DE GRAVIDADE PERMANECE EM REPOUSO. FONTE: O AUTOR.	921
FIGURA 118 – DOIS CORPOS DE MASSAS UNITÁRIAS.	922
FIGURA 119 – DOIS CORPOS DE MASSAS DIFERENTES.	923
FIGURA 120 – DOIS CORPOS DE MASSAS IGUAIS DESCREVENDO ÓRBITAS CIRCULARES EM TORNO DO CENTRO DE GRAVIDADE. FONTE: O AUTOR.	924
FIGURA 121 – DOIS CORPOS DE MASSAS DIFERENTES.	925
FIGURA 122 – DOIS CORPOS DE MASSAS IGUAIS SOB AÇÃO DE UMA FORÇA DE ATRAÇÃO PROPORCIONAL À DISTÂNCIA.	926
FIGURA 123 – DOIS CORPOS DE MASSAS IGUAIS SOB AÇÃO DE UMA FORÇA DE ATRAÇÃO PROPORCIONAL AO QUADRADO DA DISTÂNCIA. FONTE: O AUTOR.	926
FIGURA 124 – DISTORÇÃO DESPREZÍVEL NAS ÓRBITAS DOS SATÉLITES DE JÚPITER E SATURNO.	930
FIGURA 125 – CENTRO DE GRAVIDADE DO SISTEMA TERRA, LUA E SOL.	932
FIGURA 126 – ESTUDOS DE ARQUIMEDES SOBRE O CENTRO DE GRAVIDADE EM BALANÇAS ESTÁTICAS	953
FIGURA 127 – COMPARAÇÃO ENTRE DOIS CORPOS NUMA BALANÇA ESTÁTICA E COLIDINDO FRONTALMENTE.....	954

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ALTERAÇÕES DAS HIPÓTESES E REGRAS NAS TRÊS EDIÇÕES DOS <i>PRINCIPIA</i>	288
TABELA 2 – TEMPOS PERIÓDICOS DOS SATÉLITES DE JÚPITER	300
TABELA 3 – ÂNGULO DE ELONGAÇÃO DOS SATÉLITES DE JÚPITER	302
TABELA 4 – ELONGAÇÕES DOS QUATRO SATÉLITES DE JÚPITER DE ACORDO COM VÁRIOS ASTRÔNOMOS	303
TABELA 5 – COMPARAÇÃO ENTRE A MÉDIA DA ELONGAÇÃO DOS QUATRO SATÉLITES DE JÚPITER OBTIDAS PELA OBSERVAÇÃO DIRETA E PELA REGRA DOS PERÍODOS DE KEPLER	304
TABELA 6 - ESPAÇO PERCORRIDO EM 1s DE QUEDA, POR VÁRIOS EXPERIMENTADORES NO SÉC. XVII.....	350
TABELA 7 – DISTÂNCIA TERRA-LUA POR VÁRIOS ASTRÔNOMOS, INFORMADO POR NEWTON NOS <i>PRINCIPIA</i>	352
TABELA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE O ESPAÇO PERCORRIDO EM 1s PELO PÊNDULO DE HUYGENS E O TESTE DA LUA	357
TABELA 9 – QUANTIDADE DE MATÉRIA DO SOL E PLANETAS	435

LISTA DE ABREVIATURAS

- Correspondence** – *The Correspondence of Isaac Newton* (A correspondência de Isaac Newton). Coletânea das correspondências de Newton editadas por H. W. Turnbull, J. F. Scott, A. R. Hall, and L. Tilling, em 7 volumes. Newton, 1959–1977.
- De Gravitatione** – *De Gravitatione et Aequipondio Fluidorum*. Manuscrito de Newton publicado postumamente, editado por Andrew Janiak em *Newton Philosophical Writings*, 2004 (p.12-39).
- De Mundi Systemate** – *De Mundi systemate liber Isaaci Newtoni*. Manuscrito de Newton publicado postumamente em 1728. Uma tradução inglesa desse texto foi incluída por Florian Cajori em sua edição do *Principia* de 1934 (vol. 2, p. 549-626). Newton, 1974.
- De Quadratura** – *De Quadratura Curvarum*. Tratado matemático de Newton sobre as quadraturas de curvas publicado como apêndice da *Óptica* em 1704.
- Dialogo** – *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (Diálogo sobre os dois máximos sistemas de mundo). Publicado em 1632. Usei a tradução para o inglês de Stillman Drake, de 1953 e revisada em 1967, e principalmente a tradução para o português, de Pablo Rubén Mariconda (2011). Galileu, 1953, 1967; Galileu, 2011.
- Discorsi** – *Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica & i movimenti locali* (Discursos e demonstrações matemáticas em torno das duas novas ciências da mecânica e do movimento local), publicado por Galileu Galilei em 1638. Nesse trabalho utilizei as traduções para o inglês de Henry Crew e Alfonso de Salvio, de 1914, e de Stillman Drake, de 1989. Galilei, 1914; Galileu, 2008.

- Horologium** – *Horologium Oscilatorium* (O Relógio de Pêndulo). Obra de Christiaan Huygens, publicada em 1673. Uso o original em latim e a tradução para o inglês de Richard Blackwell, de 1986. Huygens, 1673; Huygens, 1986.
- Lectioes** – *Lectioes Geometricae* (Curso de Geometria). Conjunto de *lectures* sobre a geometria depositadas em Cambridge por Isaac Barrow, e publicadas por volta de 1673. Nesse trabalho utilizo a tradução para o inglês de James Child, de 1916, sob o título de *Geometrical Lectures of Isaac Barrow*. Barrow, 1916.
- MP** – *The Mathematical Papers of Isaac Newton* (Os trabalhos matemáticos de Isaac Newton). Coletânea de escritos matemáticos de Newton editados, traduzidos e comentados por Derek T. Whiteside em 8 volumes. Whiteside, 2008.
- Opticks** - *Opticks: Or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light* (*Óptica*: ou um tratado sobre as reflexões, refrações, inflexões e cores da luz). Publicado por Newton em 1704 (primeira edição), em inglês, e em 1706 em latim. Nesse trabalho usei a terceira edição de 1721.
- Principia** – *Philosophia Naturalia Principia Mathematica* (Princípios Matemáticos da Filosofia Natural), de 1687. Nesse trabalho utilizei com mais frequência as traduções para o inglês de Andrew Motte, de 1729, adaptada por Florian Cajori em 1934, e a tradução de I. Bernard Cohen e Anne Whitman de 1999. Em algumas situações, devidamente indicadas, ofereço uma tradução diretamente do original em latim, que também podem receber a distinção referente as edições: primeira edição (1ed), e segunda edição (2ed). Distingo as citações traduzidas das edições de Mote-Cajori e de Cohen-Whitman pelas iniciais *MC* e *CW*, respectivamente, nesse trabalho.

MC –	Tradução dos <i>Principia</i> de Motte-Cajori. Newton, 1934.
CW –	Tradução dos <i>Principia</i> de Cohen-Whitman. Newton, 1999.
Princípios –	<i>Princípios de Filosofia</i> , influente obra de Rene Descartes publicada em 1644, e que teve grande influência no cenário filosófico e científico do século XVII.
Prefácio (1ed) –	<i>Auctoris Praefatio ad Lectorem</i> . Prefácio do autor à primeira edição dos <i>Principia</i> , de 1686.
Prefácio (2ed) –	<i>Editoris Praefatio</i> . Prefácio de Roger Cotes à segunda edição dos <i>Principia</i> , de 1713.
Usefulness –	<i>The Usefulness of mathematical Learning</i> (A utilidade do aprendizado da matemática). Série de <i>lectures</i> de Isaac Barrow proferidas para o grande público sobre a importância do estudo da matemática, depositadas em Cambridge sob o título de <i>Lectiones Mathematicae</i> , e publicadas no início da década de 1680. Utilizo a tradução para o inglês de John Kirkby, em 1734, e por vezes a versão em latim na edição das obras matemáticas de Barrow por Whewel, em 1860. Barrow, 1734; Barrow, 1860.

SUMÁRIO

VOLUME I

O método dos *Principia* de Newton – da perspectiva histórica

INTRODUÇÃO 26

NOTAS HISTORIOGRÁFICAS 38

Parte 1.

O prefácio aos Principia - A mecânica universal.....54

1 PRELIMINARES AO PREFÁCIO 60

1.1 A MECÂNICA DOS ANTIGOS 60

1.2 A MATEMATIZAÇÃO DA NATUREZA DOS MODERNOS 67

1.2.1 A Filosofia Natural Escolástica 67

1.2.2 A Filosofia Mecânica..... 71

1.2.3 A nova Ciência do Movimento..... 74

1.3 A GEOMETRIA MECÂNICA DE BARROW 77

1.3.1 O método cinemático no *Lectiones Geometricae*..... 79

1.3.2 As vantagens do método geométrico cinemático 83

1.3.3 A matemática causal..... 85

2 EXPOSIÇÃO DO PREFÁCIO 89

2.1 OBJETIVO E PERTINÊNCIA DA OBRA 90

2.2 O OBJETIVO DA FILOSOFIA NATURAL DE NEWTON 92

2.3 A ORIGEM MECÂNICA DA GEOMETRIA 94

2.4 CONSEQUÊNCIAS DA ORIGEM MECÂNICA DA GEOMETRIA 96

2.5 A MECÂNICA RACIONAL DE NEWTON 98

2.6 A EXATIDÃO GEOMETRICA DA NATUREZA..... 100

2.7 DIVISÕES E MÉTODO 104

2.7.1 Análise e Síntese..... 105

2.7.2 Um novo programa metodológico de filosofia natural..... 109

3	DISCUSSÃO SOBRE O PREFÁCIO	112
3.1	GEOMETRIA, MECÂNICA E EMPIRISMO	112
3.1.1	A concepção matemática de Hobbes	115
3.1.2	As concepções matemáticas de Barrow e Newton	117
3.2	NATUREZA, MECÂNICA E DEUS	121
3.3	A MECHANICAE UNIVERSALIS	123
3.4	PRINCÍPIOS MATEMÁTICOS: EM QUE SENTIDO?	128
3.5	REFLEXÕES PRELIMINARES SOBRE O MÉTODO DOS <i>PRINCIPIA</i>	132

Parte 2.

	<i>O Livro I dos Principia - A geometria mecânica de forças</i>	134

4	O MÉTODO AXIOMÁTICO DOS <i>PRINCIPIA</i>	139
4.1	O MÉTODO AXIOMÁTICO	139
4.2	ELEMENTOS DO MÉTODO AXIOMÁTICO	142
4.3	A ESTRUTURA AXIOMÁTICA DOS <i>PRINCIPIA</i>	146
5	OS PRINCÍPIOS MATEMÁTICO-MECÂNICOS	149
5.1	LEIS DO MOVIMENTO	150
5.1.1	Primeira lei do Movimento	150
5.1.2	Força Inata e Força Impressa	154
5.1.3	Segunda lei do movimento	156
5.1.4	Terceira lei do movimento	159
5.1.5	O paralelogramo de Newton	161
5.2	FUNDAMENTOS EMPÍRICOS DAS LEIS DO MOVIMENTO	164
5.2.1	Galileu e Huygens	164
5.2.2	Wren, Huygens e Wallis sobre as leis dos impactos	169
5.2.3	Contribuições de Newton na análise dos impactos	173
5.2.4	A terceira lei nas atrações	181
5.3	A FORÇA CENTRÍPETA	185
5.3.1	Def. 5: a definição geral de força centrípeta	185
5.3.2	Def. 6-8: quantidade absoluta, acelerativa e motriz da força centrípeta	189

6	A CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA MECÂNICA DE FORÇAS	197
6.1	AXIOMAS DA GEOMETRIA MECÂNICA DE NEWTON	197
6.2	APLICAÇÃO DA GEOMETRIA MECÂNICA DE FORÇAS	201
7	A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE HOOKE	205
7.1	O PROBLEMA DE HOOKE	205
7.2	PROP. 1 E 2: LEI DAS ÁREAS E FORÇA CENTRÍPETA	209
7.2.1	Características gerais da força centrípeta	209
7.2.2	O significado dinâmico da lei das áreas	217
7.3	PROP. 4: FORÇA CENTRÍPETA NUMA TRAJETÓRIA CIRCULAR	220
7.3.1	Demonstração da proposição 4.....	221
7.3.2	Possibilidades de leis de força para o movimento circular.....	223
7.3.3	Sagitta e Subtensa	226
7.4	PROP. 6: FORÇA CENTRÍPETA NUMA TRAJETÓRIA QUALQUER.....	229
7.5	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DAS ELIPSES	232
7.6	PROP. 11: FORÇA CENTRÍPETA PARA TRAJETÓRIAS ELÍPTICAS.....	240
7.7	PARA ALÉM DO PROBLEMA DE HOOKE.....	247

Parte 3.

*O Livro III dos Principia - A gravitação universal e o sistema do mundo.....***257**

8	PRELIMINARES AO LIVRO III	261
8.1	O PROBLEMA DO SISTEMA DO MUNDO	261
8.1.1	A astronomia	263
8.1.2	O telescópio	274
8.1.3	Causas físicas dos movimentos planetários.....	277
8.2	O MÉTODO AXIOMÁTICO NA FILOSOFIA NATURAL	280
9	PRINCÍPIOS DO LIVRO III	290
9.1	REGRAS PARA FILOSOFAR	290
9.1.1	Regras 1 e 2: sobre as causas das coisas naturais	291
9.1.2	A simplicidade da natureza	293
9.1.3	Regra 2: causas e efeitos de mesma espécie.....	295

9.2	FENÔMENOS	297
9.2.1	Fen. 1 e 2: satélites de Júpiter e Saturno	299
9.2.2	Fen. 3 e 4: planetas primários, Terra e Sol	305
9.2.3	Fen. 5 e 6: a lei das áreas nos planetas primários e na Lua	308
9.2.4	Caracterização dos Fenômenos	310
9.3	PRINCÍPIOS MATEMÁTICO-MECÂNICOS E TEOREMAS DERIVADOS.....	313
10	O ARGUMENTO DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL	316
10.1	PROP. 1: A FORÇA CENTRÍPETA ATUANDO NOS SATÉLITES DE JÚPITER E SATURNO .	316
10.2	PROP. 2: A FORÇA CENTRÍPETA ATUANDO NOS PLANETAS PRIMÁRIOS	321
10.3	PROP. 3: A FORÇA CENTRÍPETA ATUANDO NA LUA	328
10.3.1	A hipótese da “força estranha” do Sol atuando a Lua	333
10.4	PROP. 4: A GRAVIDADE COMO CAUSA DA FORÇA CENTRÍPETA DA LUA.....	340
10.4.1	O Pêndulo e o Fenômeno da queda dos corpos	342
10.4.2	O teste da Lua	351
10.4.3	Aplicação das Regras 1 e 2.....	358
10.5	PROP. 5: GRAVIDADE EM DIREÇÃO A JÚPITER, SATURNO E SOL	362
10.5.1	Cor. 1: a gravidade em direção a todos os planetas	364
10.5.2	Hipóteses para a causa da gravidade	370
10.5.3	Cor.1-3: a gravidade como atração mútua entre os planetas	380
10.5.4	O problema da demonstração da atração mútua entre os planetas	383
10.6	PROP. 6: A QUANTIDADE MOTRIZ DA FORÇA DA GRAVIDADE	388
10.6.1	A proporcionalidade entre a gravidade e a quantidade de matéria.....	388
10.6.2	A gravidade como atração mútua entre os planetas e todos os corpos.....	393
10.7	PROP. 7: A GRAVIDADE COMO ATRAÇÃO MÚTUA ENTRE TODOS OS CORPOS	395
10.7.1	A quantidade absoluta da força da gravidade.....	401
10.7.2	A gravidade como interação fundamental	405
11	O SISTEMA DO MUNDO	410
11.1	O ESCÓLIO DAS DEFINIÇÕES.....	412
11.2	A SÍNTESE	422
11.3	A DETERMINAÇÃO DAS QUANTIDADES DE MATÉRIA DOS PLANETAS	427
11.4	A DETERMINAÇÃO DO PONTO IMÓVEL DO MUNDO	436
11.5	A DETERMINAÇÃO DOS VERDADEIROS MOVIMENTOS PLANETÁRIOS	440

Parte 4.

<i>Segunda e terceira edição - o método dos Principia</i>	443

12	REGRAS 3 E 4: A EPISTEMOLOGIA DOS <i>PRINCIPIA</i>	445
12.1	REGRA 3: O FUNDAMENTO DE TODA A FILOSOFIA	445
12.1.1	Indução e simplicidade da natureza.....	450
12.1.2	A transmutação e a hipótese 3	459
12.1.3	A aplicação da Regra 3 para o caso da gravidade	461
12.2	REGRA 4: CONTRA-EXEMPLOS E HIPÓTESES CONTRÁRIAS	466
13	O ESCÓLIO GERAL E A FILOSOFIA EXPERIMENTAL	477
13.1	A DEDUÇÃO A PARTIR DOS FENÔMENOS.....	480
13.2	HYPHOTHESES NON FINGO	489
13.2.1	Filosofia Experimental e Filosofia Especulativa	491
13.2.2	A defesa da filosofia experimental dos <i>Principia</i>	498
13.2.3	Do hypotheses non fingo ao nascimento de uma ciência empírica	503
14	O MÉTODO DA ANÁLISE E SÍNTESE DOS <i>PRINCIPIA</i>	513
14.1	O PREFÁCIO À SEGUNDA EDIÇÃO E O MÉTODO DA ANÁLISE E SÍNTESE	513
14.2	A ANÁLISE DEMONSTRATIVA DOS <i>PRINCIPIA</i>	524
	REFERÊNCIAS	541

VOLUME II

O método dos principia - da perspectiva da filosofia da ciência

INTRODUÇÃO **585**

15	FILOSOFIA DA CIÊNCIA E SEUS PROBLEMAS	589
15.1	TEORIAS DO MÉTODO DA CIENCIA DA ANTIGUIDADE ATÉ O SÉC. XVII	589
15.2	FUNDAMENTAÇÃO DA CIÊNCIA EMPÍRICA NOS SÉC. XVII E XVIII.....	597
15.3	FILOSOFIA DA CIÊNCIA DO SÉC. XX: O POSITIVISMO LÓGICO E SEUS CRÍTICOS.....	603
15.4	OS PROBLEMAS DO FALSEACIONISMO	611
15.5	THOMAS KUHN E A HISTÓRIA DA CIÊNCIA	613
15.6	FILOSOFIA DA CIÊNCIA NAS DÉCADAS DE 1970 E 1980	619
15.7	DISCUSSÕES ATUAIS DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA	621

16	A TRADIÇÃO COHENIANA E O MÉTODO DOS <i>PRINCIPIA</i>	628
16.1	COHEM E O ESTILO NEWTONIANO.....	628
16.2	GEORGE SMITH E UM MÉTODO DISTINTO DO HIPOTÉTICO-DEDUTIVO.....	637
16.3	HARPER, DUCHEYNE E UM MÉTODO MAIS SOFISTICADO QUE O H-D PADRÃO	647
16.4	DISCUSSÃO, ANÁLISE E CRÍTICAS À TRADIÇÃO COHENIANA.....	655
17	UMA ALTERNATIVA À TRADIÇÃO COHENIANA	664
17.1	A HIERARQUIA DAS CAUSAS	664
17.2	DICREPÂNCIAS, NOVOS FENÔMENOS E MODELOS	675
17.3	IMPLICAÇÕES PARA A FILOSOFIA DA CIÊNCIA.....	683
18	O CONFIRMACIONISMO DE NEWTON	689
18.1	CRITÉRIOS DE CONFIRMAÇÃO DE NEWTON.....	691
18.2	CONFIRMAÇÃO E FALSEAÇÃO	698
18.3	CONFIRMAÇÃO E INDUÇÃO	708
18.4	CONFIRMAÇÃO, CONVERGÊNCIA E MATEMÁTICA	716
18.5	IMPLICAÇÕES PARA A FILOSOFIA DA CIÊNCIA	723
18.5.1	Ponderações sobre o problema da indução.....	723
18.5.2	O realismo convergente.....	729
18.5.3	O programa da ciência teórica dos <i>Principia</i>	730
19	A CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA APÓS OS <i>PRINCIPIA</i>	734
19.1	A CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA NO SÉC. XVIII.....	735
19.2	A CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA DO SÉC. XIX.....	740
19.2.1	Panorama histórico	740
19.2.2	A continuidade do programa metodológico dos <i>Principia</i> no séc. XIX	743
19.3	A CIÊNCIA EMPÍRICO MATEMÁTICA NO SÉC. XX.....	751
19.3.1	Panorama histórico	751
19.3.2	Transição da gravitação universal para a relatividade geral.....	754
19.3.3	Observações sobre a transição da gravitação para a relatividade geral	769
19.4	IMPLICAÇÕES PARA A FILOSOFIA DA CIÊNCIA.....	781
20	O PROGRAMA DA CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA	784
20.1	SÍNTESE DO PROGRAMA METODOLÓGICO DOS <i>PRINCIPIA</i>	784
20.2	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO PROGRAMA METODOLÓGICO DOS <i>PRINCIPIA</i>	790
20.3	IMPLICAÇÕES PARA A FILOSOFIA DA CIÊNCIA	805

21	UMA IMAGEM DA CIÊNCIA INSPIRADA NOS <i>PRINCIPIA</i>	817
21.1	A RACIONALIDADE DO CONHECIMENTO	818
21.2	UM ESBOÇO DE IMAGEM DO CONHECIMENTO E DA CIÊNCIA	823
CONCLUSÃO	846	
REFERÊNCIAS	855	
	APÊNDICE A – FUNDAMENTOS EMPÍRICOS DA PRIMEIRA LEI DO MOVIMENTO	881
	APÊNDICE B – O LIVRO II DOS <i>PRINCIPIA</i>	899
	APÊNDICE C – A HIPÓTESE DA ATRAÇÃO INTERPLANETÁRIA	916
	APÊNDICE D – A DEFINIÇÃO DE QUANTIDADE DE MATÉRIA DOS <i>PRINCIPIA</i>	940
	APÊNDICE E – VERSÃO ALTERNATIVA DO ESCÓLIO DAS DEFINIÇÕES	959
	ANEXO A – Prob. 9 dos <i>Principia</i> : Força centrípeta numa espiral equiangular.....	966
	ANEXO B – Prob. 5 dos <i>Principia</i> : Força centrípeta em relação ao centro de uma elipse	967
	ANEXO C – Prob.6 dos <i>Principia</i> : Força centrípeta em relação a um dos focos da elipse.	968
	OBRAS CONSULTADAS, POR CATEGORIA	969

Volume II

O método dos *Principia*, do ponto de vista da filosofia da ciência.

“Newton lançou o primeiro grande programa científico na história humana; ele e seus brilhantes seguidores estabeleceram, na prática, as características básicas da metodologia científica. Nesse sentido, pode-se dizer que o método de Newton criou a ciência atual”.

Imre Lakatos, 1978, p.220

INTRODUÇÃO

O objetivo principal do presente volume é analisar o método dos *Principia* de Newton do ponto de vista da filosofia da ciência. Como foi mencionado na introdução do primeiro volume, o horizonte mais amplo dessa pesquisa acadêmica era investigar o problema da racionalidade científica por meio de um estudo histórico sobre o método da ciência, e em especial, no nosso caso, por meio um estudo histórico sobre o método dos *Principia* de Isaac Newton. Diante desse objetivo, o percurso delineado foi estudar, em primeiro lugar, o método dos *Principia* do ponto de vista histórico; em segundo lugar, após essa investigação histórica, analisar o método dessa obra do ponto de vista da filosofia da ciência; por fim, avaliar algumas possíveis consequências para a compreensão da racionalidade da ciência em geral. Naturalmente, essa estratégia compreende abordar o método dos *Principia* por dois ângulos: a partir dos seus *antecedentes*, e a partir dos seus *sucedentes*. Qualquer evento histórico pode ser analisado de duas perspectivas distintas e complementares: no próprio momento em que ocorre, no presente, e também muito tempo depois, em retrospecto. Cada uma das perspectivas tem as suas vantagens e desvantagens. Analisar um evento histórico no momento da sua ocorrência, ou da perspectiva desse momento, tem como principal vantagem a visão mais próxima e privilegiada do contexto e antecedente históricos da sua deflagração, além de ser menos contaminada com múltiplas interpretações anacrônicas desse evento. Por outro lado, analisar um evento histórico de um ponto de vista futuro tem como principal vantagem a visão privilegiada dos eventos que se sucederam a ele, permitindo uma percepção panorâmica da sua repercussão histórica e, conseqüentemente, uma compreensão mais profunda do seu significado. No primeiro caso, o evento histórico é analisado principalmente à luz do seu passado; no segundo caso, à luz do seu futuro. As duas análises são importantes e complementares. O que aqui se propôs nessa pesquisa foi exatamente investigar o método dos *Principia* de Newton dessas duas perspectivas; da perspectiva dos seus antecedentes e da perspectiva dos seus sucedentes.

Mas para analisar o método dos *Principia* da perspectiva dos eventos que se sucederam a ele, precisamos também delimitar um foco específico, uma vez que a quantidade de eventos que estamos falando é muito extensa. Nesse caso, realizamos a referida análise com o foco da disciplina que foi criada cerca de duzentos anos após os *Principia*, no início do séc. XX, a *filosofia da ciência*. Como se sabe, um dos objetivos básicos dessa disciplina é analisar os próprios fundamentos da racionalidade da ciência. Portanto, quando aqui se fala em analisar o método dos *Principia* “do ponto de vista da filosofia da ciência”, o que se está

falando é em analisá-lo principalmente da perspectiva dos fundamentos da sua racionalidade. Como esse método pode ser justificado, fundamentado, estabelecido racionalmente. Evidentemente, essa análise depende, e está fundada, na investigação histórica realizada no primeiro volume, razão pela qual convém resumi-la no parágrafo a seguir.

Da investigação histórica do método dos *Principia* realizada no primeiro volume, a principal conclusão obtida é que Newton lançou um novo programa metodológico de investigação da natureza, que articulou a tradição empirista da filosofia experimental inglesa, a tradição das ciências matemáticas, e a tradição escolástica do método da análise e síntese. Mais exatamente, Newton iniciou um programa empírico de investigação da natureza que era capaz de avançar gradualmente em direção às causas mais gerais ou ocultas da natureza sem apelo à especulação filosófica, com o auxílio da matemática. Sendo ainda mais específico, Newton iniciou um programa em que seria possível alcançar a determinação e compreensão dessas causas pelo uso de propriedades *empírico-matemáticas* dos fenômenos. Por essa exata razão esse programa pode ser chamado mais convenientemente de um programa de uma *ciência empírico-matemática*. No primeiro volume se procurou evidenciar, também, que esse programa pode ser considerado uma iniciativa inédita na ciência do séc. XVII, distinguido-se claramente das propostas tanto dos antecessores quanto dos contemporâneos de Newton. Por outro lado, o referido volume não nos permitiu saber se esse programa foi seguido ou incorporado pela ciência posterior, ou em que medida foi, ou não, incorporado. Para isso, precisamos de uma análise como a aqui proposta para o presente volume, uma análise da perspectiva dos eventos que se sucederam ao surgimento da ciência empírico-matemática nos *Principia* em 1687.

Além da questão introduzida no fim do parágrafo anterior, convém explicitar as demais questões que serviram para nortear a investigação que culminou nesse volume. Três questões norteadoras são de particular interesse nesse percurso. A primeira questão norteadora é como pode ser interpretado o método dos *Principia* de Newton, do ponto de vista da filosofia da ciência. Ou melhor, como pode ser interpretado o programa da ciência empírico-matemática dos *Principia*? O que Newton está fazendo, à luz dos parâmetros e modelos atuais da filosofia da ciência? A segunda questão norteadora é sobre o fundamento da racionalidade do programa da ciência empírico-matemática dos *Principia*. Como pode ser qualificada ou esclarecida a racionalidade que sustenta a ciência dos *Principia*? E terceira questão norteadora é sobre as implicações históricas e filosóficas dos *Principia*. Quais implicações históricas e filosóficas podemos inferir da compreensão do fundamento da racionalidade do programa de Newton?

Sobre a primeira questão norteadora – como o programa de Newton pode ser interpretado do ponto de vista da filosofia da ciência – é possível adiantar que serão contrastadas a interpretação da “tradição coheniana”, assim aqui chamada, com a interpretação que oferecerei a partir da pesquisa histórica apoiada no volume anterior. Resumidamente, a interpretação coheniana defende que Newton se utiliza de “modelos matemáticos idealizados” que sofrem um processo de “aproximações sucessivas”. Em oposição a essa interpretação vou defender que nos *Principia* Newton está desenvolvendo um amplo programa de investigação da natureza que avança gradativamente às causas mais gerais dos fenômenos por meio de leis empírico-matemáticas, numa abordagem essencialmente teórica. Portanto, enquanto a ênfase da tradição coheniana recai sobre o uso de *modelos matemáticos*, a ênfase que apresento para a descrição do que Newton está fazendo recai principalmente sobre as *leis empírico-matemáticas*, que, como se mostrará, faz muita diferença no resultado final.

Sobre a segunda questão norteadora – qual é o fundamento da racionalidade do programa da ciência empírico-matemática dos *Principia* – é possível adiantar que aqui se defenderá que o programa de Newton é capaz de produzir efetivas e suficientes confirmações qualitativas para a causa dos fenômenos, a partir de uma base empírica indutiva. Em contraposição a William Harper, que defendeu que o método de Newton é capaz de oferecer um suporte empírico maior para as hipóteses do que o método hipotético-dedutivo convencional, do ponto de referencia de uma análise bayesiana, argumento que o programa da ciência empírico-matemática dos *Principia* é capaz de ultrapassar a barreira da confirmação meramente probabilística, fornecendo a possibilidade de uma determinação decisiva de uma hipótese por meio de um processo indireto de convergência indutiva. Esse é o ponto central e mais difícil de se estabelecer desse segundo volume, mas que uma vez estabelecido, conduz a desdobramentos de expressiva relevância para a filosofia da ciência.

Sobre a terceira questão norteadora – quais são as implicações históricas e filosóficas da compreensão do fundamento da racionalidade do programa de Newton – investigo, inicialmente, como esse programa foi assimilado e incorporado na ciência posterior, do séc. XVIII aos dias atuais. A caracterização da estrutura do programa dos *Principia*, bem como o fundamento da sua racionalidade, coloca em xeque a posição de que tal programa foi substituído por outros durante o séc. XIX e XX, e principalmente que tenha havido qualquer transição revolucionária na metodologia da ciência empírico-matemática na transição da gravitação universal para a relatividade geral, conforme propõe a famosa tese de Thomas Kuhn. Além disso, analiso quais são as implicações da compreensão do modelo de

racionalidade desse programa para os problemas clássicos da filosofia da ciência, e em especial o problema da racionalidade científica. De imediato, informo que, sendo possível sustentar a noção de confirmação aqui proposta, consequências de relevantes podem ser extraídas para a compreensão da racionalidade da ciência em geral. Em particular, torna-se possível defender o *realismo convergente* – que as teorias científicas se aproximam da verdade ao longo do tempo – sem que para isso seja necessário apelar para o conhecido argumento do milagre, ou alguma das suas variações. É possível defender, portanto, uma ciência confirmacionista, continuísta e realista, fundada em bases sólidas de racionalidade.

Para desenvolver os temas e questões apresentadas nos parágrafos acima, o presente volume foi dividido em sete capítulos, seguindo a numeração iniciada no primeiro volume. No capítulo 15, encaminho uma apresentação preliminar sobre a filosofia da ciência e seus problemas, a partir da qual me reportarei em escólios eventuais ao longo do volume, onde se fará breves discussões com as conclusões obtidas a cada capítulo. No capítulo 16, apresento um resumo e uma discussão crítica das interpretações do método de Newton realizadas pela “tradição coheniana”. No capítulo 17, apresento uma alternativa interpretativa à tradição coheniana a partir tanto do estudo histórico do método de Newton realizado no volume anterior, como das discussões e análises realizadas a partir do estudo dessa tradição. No capítulo 18, investigo os fundamentos da racionalidade dos *Principia* a partir de uma análise sobre o confirmacionismo de Newton. No capítulo 19, analiso a ciência empírico-matemática do séc. XVIII ao XX, procurando compreender como o programa dos *Principia* foi assimilado, incorporado e modificado pela ciência posterior. No capítulo 20, ofereço uma síntese do programa da ciência empírico-matemática que iniciou com os *Principia* de Newton, além de alguns exemplos de aplicações em episódios históricos específicos, discutindo as suas implicações mais amplas para a filosofia da ciência e para a racionalidade da ciência em geral. Por fim, no capítulo 21, ofereço uma imagem da ciência inspirada nesse estudo sobre o programa metodológico dos *Principia*. Uma imagem da ciência que procura resgatar a compreensão de uma ciência fundamentalmente racional. Esclarecidas as principais questões, objetivos e divisões desse volume, entremos no capítulo preliminar sobre a filosofia da ciência e seus problemas.

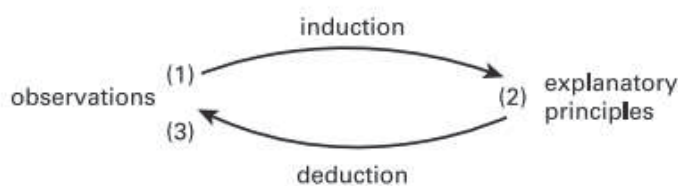
15 A FILOSOFIA DA CIÊNCIA E SEUS PROBLEMAS

Para analisar o método dos *Principia* de Newton do ponto de vista da filosofia da ciência será necessário apresentar ao leitor, primeiro, um resumo desse campo e dos seus principais problemas. Oficialmente, o campo que conhecemos hoje como filosofia da ciência surgiu no início do séc. XX, com os chamados positivistas lógicos. No entanto, os conteúdos e problemas desse domínio começaram a ser discutidos muito antes do séc. XX, já no período de Aristóteles e Platão. Convém fazer um breve panorama histórico desses desenvolvimentos até o estabelecimento oficial desse campo de pesquisa.⁶⁹⁹

15.1 TEORIAS DO MÉTODO DA CIÊNCIA DA ANTIGUIDADE ATÉ O SÉC. XVII

Vários dos conteúdos e problemas que hoje são discutidos pela filosofia da ciência foram colocados em questão por Aristóteles nos seus *Analíticos*, e também em partes relevantes na *Física* e na *Metafísica*.⁷⁰⁰ Esses escritos podem ser melhor qualificados como uma teoria do método da ciência; ou seja, o objetivo de Aristóteles é esclarecer o método pelo qual o conhecimento é construído de uma maneira mais rigorosa e segura. Portanto, eles têm um caráter não apenas descritivo, mas sobretudo prescritivo: pretendem instruir o leitor sobre como a ciência deve ser construída e organizada. Naturalmente, não é o caso aqui de se aprofundar na teoria do método da ciência aristotélica, mas será útil apresentar ao menos as suas linhas gerais. Esse método teve uma influência duradoura ao longo da história da ciência.

Aristóteles defendeu que o método da ciência era um procedimento *indutivo-dedutivo*. Primeiro se parte da observação da natureza em direção a princípios gerais, e depois retorna dos princípios gerais para as observações. Segundo Losee, Aristóteles sustentou que “o cientista deve induzir os princípios explicativos dos fenômenos a serem explicados e depois deduzir enunciados acerca dos fenômenos das premissas que incluem os princípios”⁷⁰¹. Ele propõe um diagrama elucidativo:



⁶⁹⁹ Nessa seção sigo em grande medida a excelente introdução histórica à filosofia da ciência, de John Losee, *Historical introduction to the philosophy of science*. Losee (2001).

⁷⁰⁰ Estou me referindo aos *Primeiros* e *Segundos Analíticos*. Veja Aristotle, 1941.

⁷⁰¹ Losee, 2001, p.5.

Figura 96 – Método indutivo e dedutivo de Aristóteles. Fonte: Losee, 2001, p.5.

A explicação científica é alcançada quando se encontra os princípios dos quais os fenômenos podem ser deduzidos, saindo do “conhecimento do fato” (ponto (1) no diagrama) para o conhecimento das “razões para o fato” (pontos (2) e (3)).

Na etapa indutiva os conhecimentos são adquiridos pela experiência. Aristóteles afirmou que toda coisa particular é a combinação de *matéria* e *forma*. A *forma* é o que a faz membro de um grupo de coisas semelhantes. É o conjunto de propriedades que um corpo particular compartilha com outros particulares, e que o faz membro de uma categoria geral. Ele defende que as generalizações a respeito das *formas* são construídas por indução a partir da experiência. Aristóteles tem um conceito amplo de indução, mas uma modalidade de indução que ele destaca é por simples *enumeração*, onde as propriedades que se repetem nos indivíduos são consideradas como fazendo parte de uma forma geral, gerando uma *espécie*, e, da mesma maneira propriedades semelhantes de várias espécies podem produzir uma forma ainda mais geral, a saber, um *gênero* (*genus*)⁷⁰². A indução por simples enumeração pode ser esquematizada como abaixo:

*a*₁ tem a propriedade *P*
*a*₂ tem a propriedade *P*
*a*₃ tem a propriedade *P*
 ∴ Todos os *a*'s tem a propriedade *P* ⁷⁰³

Na segunda etapa da investigação científica a generalização alcançada por indução é usada como premissa para deduções sobre as observações iniciais. Aristóteles criou uma série de restrições e regras para argumentos dedutivos fossem considerados válidos. Como se sabe, para esclarecer a relação entre conclusões e premissas Aristóteles criou a teoria silogística, na qual a lógica existente entre as premissas de um argumento e a sua conclusão é explicitada numa forma *dedutiva*, através de três sentenças, sendo duas premissas e uma conclusão. Tomemos um exemplo clássico de dedução silogística:

1. *Todo homem é mortal.*
2. *Sócrates é homem.*
3. *Logo, Sócrates é mortal.*

⁷⁰² Ibid, p.6.

⁷⁰³ Ibid.

A conclusão em (3) segue-se, necessariamente, das premissas (1) e (2). Caso as premissas sejam verdadeiras, a conclusão será necessariamente verdadeira.

Certamente, o leitor poderá questionar como se estabelece a verdade das premissas. Reforcemos novamente que as premissas são estabelecidas pela etapa indutiva do método da ciência. A premissa “Todo homem é mortal” é estabelecida por indução a partir de casos particulares:

O homem particular a_1 é mortal.

O homem particular a_2 é mortal.

O homem particular a_3 é mortal.

O homem particular a_4 é mortal.

∴ Todo homem é mortal.

A partir dos casos particulares com a mesma propriedade, chega-se a uma conclusão geral. A conclusão da etapa indutiva, no entanto, não tem o caráter de verdade necessária como aquela da dedução, mas essa é a maneira pela qual os princípios da experiência são construídos. Portanto, para Aristóteles a ciência é construída por indução e dedução. Pela indução chegamos aos princípios gerais do mundo. Pela dedução retiramos consequências, que explicam os fatos do mundo e nos levam a outras conclusões adicionais. Baseado nessas regras é possível se construir uma ciência particular, que, segundo Aristóteles é um conjunto de enunciados derivados da experiência e dedutivamente organizados.

Esclarecidas as linhas gerais do método indutivo-dedutivo da ciência para Aristóteles, convém também fazer uma breve menção sobre a concepção de ciência do seu mentor, Platão. Diferente do seu famoso discípulo, Platão acreditava que os conhecimentos provenientes da experiência sensorial não eram confiáveis, pois a nossa percepção do mundo é apenas um reflexo imperfeito da realidade subjacente. Essa compreensão foi influenciada por uma concepção bastante difundida na história da ciência, chamada de “atomismo”. No entanto, essa última concepção era ainda mais radical. Para eles, a distinção entre “aparências” e “realidade” não era a distinção entre realidade e cópia imperfeita (sombras), mas os objetos e as relações no mundo real são de um tipo diferente do mundo que conhecemos por meio dos sentidos. O que é real é o movimento dos átomos pelo vácuo. Os seus movimentos,

propriedades, combinações é que causam a nossa experiência perceptiva.⁷⁰⁴ Em outras palavras, há muito pouca relação entre o mundo real e o que percebemos. Não obstante, haveria um caminho possível para se aproximar da essência da realidade, e esse caminho seria pela geometria. A geometria tem o potencial de relevar parte dessa realidade subjacente. Portanto, tanto para Platão quanto para atomistas mais radicais, as explicações científicas poderiam e deveriam ser dadas em termos de relações geométricas e numéricas, e esse procedimento se constituiria no método mais indicado para a construção da ciência.⁷⁰⁵

Saindo da antiguidade e entrando no período da idade média, importa dizer que a concepção aristotélica do método da ciência prevaleceu sobre a platônica, tornando-se dominante no cenário filosófico. No entanto, a parte indutiva do método foi largamente ignorada devido ao dogmatismo que se estabeleceu na filosofia escolástica. Ainda assim, na segunda parte do séc. XII, o texto dos *Segundos Analíticos* passou a ser amplamente discutido e importantes desenvolvimentos foram feitos no procedimento científico proposto por Aristóteles. Robert Grosseteste (1168-1253) e seu discípulo Roger Bacon (1220-1292) foram os dois nomes mais influentes no tema do método da ciência na Idade Média. Deve-se a Grosseteste a terminologia “Resolutio” e “Compositio” para se referir, respectivamente, ao estágio indutivo e dedutivo do método de Aristóteles.⁷⁰⁶ Na etapa da *Resolutio* se investiga os fenômenos em direção aos seus elementos constituintes, enquanto que na etapa da *Compositio* os elementos são combinados para reconstruir o fenômeno original. Desde então, os filósofos e praticantes da ciência passaram a se referir a teoria do procedimento científico de Aristóteles como “método de *Resolutio* e *Compositio*” ou, alternativamente, “método da Análise e Síntese”.⁷⁰⁷ Os filósofos desse período procuraram desenvolver principalmente a etapa indutiva do procedimento científico, ou seja, a etapa da *Resolutio*. Como não estava claro a maneira de distinguir entre correlações indutivas meramente acidentais na teoria de Aristóteles, esses autores procuraram desenvolver métodos para sanar esse problema.

Duns Scotus (1266-1308) chamou as correlações indutivas de “uniões aptudinais” (uniões por aptidão). Ele procurou estabelecer regras para fornecer uniões aptudinais mais seguras pelo “método da concordância”.⁷⁰⁸ Guilherme de Okham (1285-1347) propôs um método para encontrar uniões aptudinais pela *diferença*, chamado “método da diferença”.⁷⁰⁹

⁷⁰⁴ Veja Losee (2001), cap. 3 e 4. Naturalmente, Platão também tem uma proximidade com os pitagóricos.

⁷⁰⁵ Esse ponto não consensual entre os estudiosos de Platão. Veja Losee (2001), cap. 3 e 4.

⁷⁰⁶ Crombie, 1953, p.52-66. Veja também Losee, op. cit., p.28.

⁷⁰⁷ Veja seção 2.1.7 do volume I; Veja também Ducheyne, 2012, cap I.

⁷⁰⁸ Scotus, 1962, p.109-111. Veja também Losee, op. cit., p.30.

⁷⁰⁹ Gauch, 2003, p. 223. Veja também Losee, op. cit., p. 30.

Mais tarde esses métodos foram enfatizados por John Stuart Mill.⁷¹⁰ Já Bacon propôs as suas famosas “prerrogativas da ciência experimental”.⁷¹¹ Vale mencionar ao menos as duas primeiras. Na primeira prerrogativa, Bacon defendeu que os princípios induzidos por *Resolutio* deveriam ser submetidos a teste de experimentos particulares. Isso significa que a parte dedutiva na teoria Aristotélica não deveria se prestar somente a voltar ao fenômeno do estágio inicial (experiência), explicando-o, mas deveria servir para a realização de testes adicionais. Em outras palavras, a primeira prerrogativa da ciência experimental de Bacon era testar as conclusões indutivas das ciências, confrontando-as com a experiência, antes de aceitá-las como princípios. Na segunda prerrogativa da ciência experimental, Bacon defendeu que a aplicação bem-sucedida do procedimento indutivo depende da extensão e precisão do conhecimento factual. Portanto, a base factual da ciência deve ser aumentada o quanto seja possível, e para isso é fundamental a *experimentação*. Assim, Bacon forneceu importantes contribuições para a parte experiencial do procedimento científico aristotélico, pavimentando as bases da filosofia experimental que mais tarde se espalharia pela Inglaterra. Mas é importante destacar que Bacon não era um aristotélico estrito. São conhecidas algumas de suas teses alinhadas com o platonismo, em favor da importância da matemática na ciência. Com efeito, Bacon fez um esforço considerável para reconciliar a abordagem científica aristotélica e platônica, e chegou a apresentá-las como passíveis de uma possível síntese praticável.⁷¹² Ao que parece, várias das propostas de Bacon floresceram nos séc. XVI e XVII.

O período da modernidade foi marcado pela crítica à filosofia aristotélica e pelo retorno do platonismo. Mas é preciso um cuidado especial para perceber as sutilezas dessas críticas. Galileu Galilei (1564-1642 d.C.), por exemplo, que é conhecido pelo seu platonismo e por suas duras críticas à filosofia aristotélica, não rejeitou a estrutura geral do método da ciência do filósofo estagirita, o procedimento da Análise e Síntese. As suas considerações sobre o procedimento científico são dirigidas mais contra os filósofos escolásticos, praticantes de um “falso aristotelismo”, que passaram a ignorar o estágio da *Análise*, que iniciava na experiência sensível. Em suas polêmicas relacionadas a astronomia, por exemplo, ele chegou a afirmar que o próprio Aristóteles, na medida em que ensinou a indução a partir dos sentidos, não defenderia a imutabilidade dos céus se tivesse o telescópio à sua época. Ele disse: “É uma melhor filosofia aristotélica dizer que o céu é alterável porque os meus sentidos me dizem” do

⁷¹⁰ *A system of Logic*. Mill, 1865.

⁷¹¹ *The Opus Majus*, parte II. Bacon, 1962, p.587.

⁷¹² *The Opus Majus*, parte IV. Veja também Fisher, 1971, p.375.

que dizer “os céus são inalteráveis porque Aristóteles estava tão convencido”.⁷¹³ E também enfatiza a etapa da Síntese em outras situações. Ele afirma: “o conhecimento de um fato único adquirido pela descoberta das suas causas prepara a mente para entender e determinar outros fatos sem a necessidade de recurso à experiência”.⁷¹⁴ Galileu, portanto, encarnou, ao menos em parte, o objetivo Roger Bacon de uma síntese entre o aristotelismo e o platonismo, síntese que foi seguida por outros no fluxo do séc. XVII.

Mas Galileu não foi o maior crítico do aristotelismo. Talvez esse título esteja reservado a Sir Francis Bacon (1561-1626). Para muitos dos fundadores e membros da *Royal Society*, Bacon foi o profeta de uma nova metodologia científica. Ele empreendeu a sua crítica do método científico aristotélico ilustrando-a por meio dos célebres quatro ídolos que o aristotelismo construiu, e que prejudicavam o avanço da ciência: os ídolos da Tribo, da Caverna, do Foro e do Teatro. Não há espaço para aprofundamento na interessante exposição dos ídolos de Bacon, mas o que importa dizer é que a partir dessa crítica ele propõe um *Novo Organum*, que teria o papel de substituir antigo *Organum* (a compilação dos escritos de Aristóteles), e em especial o seu método da ciência.⁷¹⁵ Contudo, como esclarece Losee, apesar da sua retórica e propaganda anti-aristotélica, o conteúdo das críticas de Bacon incide muito mais sobre os filósofos escolásticos do que sobre o próprio Aristóteles.⁷¹⁶ À exemplo de Galileu, ele aceitou a estrutura geral indutiva-dedutiva do procedimento científico aristotélico, e procurou resgatar as distorções que foram empreendidas sobretudo no estágio indutivo.⁷¹⁷

As duas principais contribuições de Bacon na parte indutiva do método foram (1) a ênfase em induções graduais e progressivas, e (2) o método da exclusão. Ele enfatizou três aspectos importantes no procedimento indutivo: (a) a coleta de dados; (b) o número de observações; (c) técnicas diversas da simples enumeração.⁷¹⁸ Ele criticou Aristóteles e seus seguidores por praticarem uma coleta de dados desorganizada e acrítica. Na verdade, segundo ele, Aristóteles e seus seguidores enfatizavam demais a estrutura dedutiva da ciência, e acabaram reduzindo a ciência à lógica dedutiva. Mas os poucos que recorriam à experiência generalizavam muito apressadamente, e sem critérios, o que conduzia a problemas. Após poucas observações, saltavam para princípios gerais. Ele afirmou: “argumentos dedutivos tem

⁷¹³ Dialogo [Drake], 1953, p.56. Veja também Losee, op. cit., p.48.

⁷¹⁴ Ibid, p.276. Veja também Losee, op. cit., p. 50.

⁷¹⁵ Bacon, F., *Novum Organum*.

⁷¹⁶ Losee, op. cit., p.56-57.

⁷¹⁷ No Aforismo X, Livro II. Ele afirma: “As indicações acerca da interpretação da natureza compreendem duas partes gerais: a primeira, que consiste em estabelecer e fazer surgir os axiomas da experiência; a segunda, em deduzir e derivar experimentos novos dos axiomas”. Bacon, F. [trad. José Aluysio Reis de Andrade], 2002.

⁷¹⁸ Losee, op. cit., p.57-58.

valor científico somente se as suas premissas tiverem suporte indutivo apropriado”.⁷¹⁹ Diante disso, Bacon defendeu que a indução precisava de uma certa técnica para levar a resultados mais seguros. Não é possível se apoiar somente na indução por simples enumeração, como Aristóteles e seus seguidores faziam.⁷²⁰

Em contraposição a esses problemas do método aristotélico, o patrono da *Royal Society* evocou a segunda prerrogativa de Roger Bacon para defender a realização sistemática de experimentos para a coleta de dados, e destacou o valor dos instrumentos científicos nessa coleta. Essa coleta de dados deveria ser feita em volume considerável para que as induções fossem mais seguras. Além disso, evocou a primeira prerrogativa do seu antecessor, defendendo que elas deveriam ser confirmadas por testes dedutivos e, por fim, deveriam se submeter ao *método da exclusão*.⁷²¹ Bacon estava bem ciente do problema das correlações indutivas acidentais, e criou o método da exclusão para eliminar tais correlações. Essas correlações deviam ser excluídas inspecionando as tabelas de presença, ausência e variação de graus. Com efeito, Bacon formulou 27 prerrogativas que revelavam correlações essenciais. Vale a pena citar uma delas, que nos será útil mais adiante, a “*instantia crucis*”. A possibilidade de uma instância crucial que serve como parâmetro de decisão entre duas hipóteses ou explicações concorrentes. Afirmar Bacon que “muitas vezes, nelas termina o curso da investigação ou em muitas outras este é por elas completado. Mas às vezes as instâncias cruciais aparecem entre as instâncias antes indicadas; mas, em sua maior parte, são buscadas, aplicadas intencionalmente e estabelecidas com trabalho árduo e diligente”.⁷²²

Diante de todas essas ferramentas, a ciência deveria ascender gradualmente por meio de uma pirâmide indutiva. Na base da pirâmide deveriam ser coletadas as “histórias naturais e experimentais”, caminhando para generalizações cada vez mais amplas. Mais precisamente, primeiro se estabelece os “fatos” de uma ciência, depois busca-se as correlações entre fatos, e segue-se avançando indutiva e gradualmente das correlações de grau mais baixo para aquelas de grau mais alto até chegar as “formas”, os princípios gerais no topo da pirâmide. Losee também oferece um instrutivo diagrama sobre a essa pirâmide:

⁷¹⁹ Ibid, p.57.

⁷²⁰ Evidentemente, Bacon ignora aristotélicos como Grosseteste e Okham, que já haviam feito avanços nesse sentido.

⁷²¹ *Novum Organum*, II, Aforismo XV.

⁷²² *Novum Organum*, II, Aforismo XXXVI. “Quando, na investigação de uma natureza, o intelecto se acha inseguro e em vias de se decidir entre duas ou mais naturezas que se devem atribuir à causa da natureza examinada, em vista do concurso freqüente e comum de mais naturezas, em tais situações, as instâncias cruciais indicam que o vínculo de uma dessas naturezas com a natureza dada é constante e indissolúvel, enquanto o das outras é variável e dissociável. A questão é resolvida e é aceita como causa da primeira natureza, enquanto as demais são afastadas e repudiadas. Tais instâncias são muito esclarecedoras e têm uma significativa autoridade”.

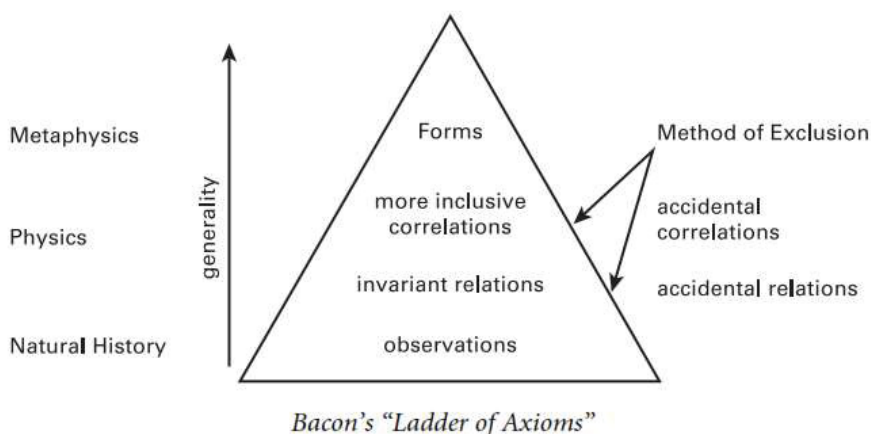


Figura 97 – Pirâmide indutiva de Bacon. Fonte: Losee, 2001, p.58.

As formas são os princípios no grau máximo de generalização da escala, e algumas vezes Bacon também as chama de “leis”. Ele afirma:

Quando falamos das formas, nada mais entendemos que aquelas leis e determinações do ato puro, que ordenam e constituem toda e qualquer natureza simples, como o calor, a luz, o peso, em qualquer tipo de matéria ou objeto a elas suscetível. Falar em forma do calor ou da luz é o mesmo que falar da lei do calor ou da luz.⁷²³

Certamente há muito mais na nova metodologia científica proposta por Bacon, mas aqui já é o suficiente para o leitor resgatar alguns pontos relevantes. Vale reforçar mais uma vez que, embora o filósofo inglês tenha se elevado como grande crítico do método aristotélico, ele de fato não tocou na estrutura básica do seu procedimento indutivo-dedutivo, havendo realizado importantes desenvolvimentos sobretudo na parte indutiva. Não obstante, as propostas de Bacon podem ser entendidas muito mais como uma continuidade nos desenvolvimentos que Grosseteste e Roger Bacon já haviam iniciado.

Outro crítico do aristotelismo no séc. XVII que merece ser mencionado foi o filósofo francês Rene Descartes (1596-1650). Diferente de Galileu e Bacon, Descartes não procurou restaurar a parte indutiva do método, muito pelo contrário. Um adequado método para a construção de um conhecimento seguro deveria partir de princípios absolutamente certos e indubitáveis, imunes à incerteza dos sentidos, e desenvolverem-se numa rigorosa cadeia dedutiva descendente. Descartes “inverteu”, por assim dizer, a pirâmide de Bacon. Como se sabe, esses princípios absolutamente certos e indubitáveis eram “eu existo” e o ser perfeito

⁷²³ *Novum Organum*, II, Aforismo XVII.

existe.⁷²⁴ Com base nesses princípios certos, e nas ideias claras e distintas, todos os demais conhecimentos deveriam ser deduzidos. A parte indutiva foi excluída do seu procedimento científico. Por essa razão ele foi acusado por vários filósofos experimentais ingleses de cometer o mesmo erro dos filósofos escolásticos, de eliminar a parte indutiva do método da ciência e enfatizar demasiadamente a parte dedutiva. No entanto, isso indica, com efeito, que foi Descartes – não Galileu ou Bacon – quem rompeu efetivamente com o método indutivo-dedutivo de Aristóteles. Em vários sentidos Descartes estava muito mais associado ao platonismo e atomismo clássico que ao aristotelismo (ou à síntese dos dois), procurando descrever mudanças macroscópicas qualitativas em termos de mudanças submacroscópicas quantitativas. Por essa razão a sua tendência foi delimitar os assuntos da ciência em qualidades que podem ser expressas da forma matemática, e adotar uma posição mais cética em relação aos conhecimentos da experiência.

Em vista do exposto acima, Descartes foi um dos alvos preferidos de vários filósofos experimentais, e em especial de Newton. A inclusão da matemática no método aristotélico (já proposta do Grosseteste, Roger Bacon, Francis Bacon, Galileu, entre outros) era extremamente desejável; no entanto, a supressão da etapa indutiva da *Resolutio* era retirar o que havia de fundamental nesse método, e que se perdera ao longo do tempo. Newton, portanto, rejeitou o método cartesiano e declarou por várias vezes a sua filiação ao método aristotélico da Análise e Síntese (embora na versão da síntese platônica-aristotélica proposta por Roger Bacon e seguida por Galileu). No entanto, como foi desenvolvido no primeiro volume dessa pesquisa, o estágio da *Análise* para Newton (e outros no séc. XVII) era muito mais complexo do que meramente a indução. Era um sofisticado estágio de descoberta que envolvia, também, a indução, mas que não se limitava a ela.

15.2 FUNDAMENTAÇÃO DA CIÊNCIA EMPÍRICA NOS SÉC. XVII E XVIII

Com o desenvolvimento da ciência empírica pelos filósofos experimentais ingleses, e especialmente pelos *Principia* de Newton, ocorreu um movimento filosófico de fundamentação dessa ciência na Inglaterra, o qual ficou conhecido como empirismo inglês. Os célebres nomes desse movimento foram John Locke (1632-1704), George Berkeley (1685-1753) e David Hume (1711-1776). Em reação a racionalistas como Descartes, o lema geral dos empiristas pode ser resumido no famoso *dictum* atribuído a Aristóteles: “Nada há na

⁷²⁴ O “eu existo” é, naturalmente, o célebre *cogito ergo sum* (“eu penso, eu existo”). Síntese de Losee, do *Discurso do Método*. Losee, op. cit., p. 64.

mente que não tenha estado antes nos sentidos”.⁷²⁵ O conhecimento inicia com a experiência. Diferente das discussões sobre o método da ciência dos séculos anteriores, o objetivo desses filósofos era menos “prescritivo” e mais “explicativo”. O objetivo era explicar, e também justificar, os fundamentos da nova ciência empírica que se estabeleceu nos séc. XVI e XVII, esclarecendo como, exatamente, o conhecimento era construído a partir da experiência sensível. O objetivo deles era construir uma epistemologia. Apesar disso, Locke prescreveu para a ciência uma metodologia baconiana baseada numa extensiva correlação de histórias naturais.⁷²⁶

No que se refere ao estatuto dos conhecimentos da experiência, Locke afirmou que o máximo que a ciência pode alcançar é uma coleção de generalizações sobre associação entre fenômenos. Isso significa que os conhecimentos da experiência não têm o estatuto de verdades necessárias, como requeriam muitos racionalistas, mas possuem o estatuto de, no máximo, verdades *prováveis*.⁷²⁷ Locke acreditava em conexões necessárias entre eventos na natureza, mas que estas não eram acessíveis ao entendimento humano. Nesse sentido, ele estava próximo de concepções atomistas, defendendo que as ideias do nosso intelecto são apenas *efeitos* do mundo real, mas não uma imagem precisa desse mundo.⁷²⁸

David Hume estendeu e tornou consistente o ceticismo de Locke sobre o conhecimento necessário da natureza. O argumento de Hume foi altamente influente na filosofia posterior, razão pela qual vale a pena reproduzi-lo em suas linhas gerais aqui. A crítica de Hume à defesa de um conhecimento necessário da natureza se baseia em três premissas: (1) todo conhecimento pode ser classificado em duas categorias: “relações de ideias” e “questões de fato”; (2) todo o conhecimento sobre *questões de fato* surgem da experiência, ou das impressões sensíveis; e (3) conhecimentos necessários da natureza são possíveis apenas pelo conhecimento das “conexões necessárias” entre os eventos.⁷²⁹ Hume sustenta que certos conhecimentos sobre *relações de ideias* são verdades necessárias, como o enunciado sobre a soma dos ângulos internos de um triângulo ser 180 graus. Dados os axiomas da geometria euclidiana, não poderia ser diferente que a soma dos ângulos internos de um triângulo fosse 180 graus; isso seria uma contradição. No entanto, os enunciados sobre *questões de fato* são sempre, no máximo, verdades contingentes. A sua negação não é uma contradição, e as coisas sempre podem ser de forma diferentes. Outra distinção importante

⁷²⁵ Rosenberg, 2005, p. 113.

⁷²⁶ Yolton, 1970, p. 58.

⁷²⁷ Losee, op. cit., p.88.

⁷²⁸ Ibid, p.98.

⁷²⁹ *Tratado da Natureza Humana e Investigação sobre o Entendimento Humano*. Hume (2000); Hume (2006).

entre esses dois tipos de enunciados é que a *relação de ideias* é um enunciado cuja verdade ou falsidade é *a priori*, ou seja, independente da experiência; ele pode ser demonstrado como verdadeiro (ou falso) dedutivamente a partir das definições expressas nos axiomas da geometria. Por outro lado, a verdade ou falsidade dos enunciados que versam sobre *questões de fato* devem ser estabelecidos *a posteriori*, pela experiência.⁷³⁰ Portanto, Hume traçou uma clara divisão entre os conhecimentos da matemática e aqueles da ciência natural. Os conhecimentos da ciência são construídos a partir dos sentidos e, por conseguinte, não desfrutam do mesmo estatuto daqueles pertencentes à geometria.

Essas premissas de Hume o levaram a sua célebre análise da *causalidade*. O conhecimento das causas dos fenômenos naturais sempre foi fundamental para a ciência. Lembremos que o objetivo expresso da ciência desde Aristóteles era determinar a *causa* das coisas naturais. Ou melhor, determinar as relações de causa e efeito dos fenômenos naturais. Mas como essas causas eram estabelecidas? No seu *Tratado sobre a Natureza Humana*, Hume argumenta que tudo o que se pode observar a respeito de dois eventos que usualmente consideramos como sendo um a causa e o outro o efeito – tal como o fogo e o calor – é que entre eles existe uma relação de “contiguidade” e “sucessão”. Mesmo os eventos mais tipicamente considerados causais, como uma bola de bilhar que se choca contra outra, tudo o que conseguimos perceber da experiência é que existe uma *contiguidade* de espaço e tempo entre estes objetos, e uma *sucessão temporal* entre eles, de modo que o que chamamos de *efeito* sempre se segue a aquilo que chamamos de *causa*. Para Hume o problema é que estas duas características (sucessão e contiguidade) não satisfazem a condição para o estabelecimento de uma legítima relação de causa e efeito, que é a *necessidade*. Ele prossegue, então, a sua investigação da causalidade até descobrir mais uma característica: a *conjunção constante*. Não consideramos dois objetos como causa e efeito apenas em virtude de uma única experiência em que os percebemos numa relação de sucessão e contiguidade; é necessário que esta situação se repita por inúmeras vezes, que a conjunção desses dois elementos seja constante durante muitas observações sucessivas. Sem dúvida, essa nova descoberta acrescenta algo à investigação, mas não muda muito a situação da análise. Segundo Hume, a *conjunção constante*, não é nada mais que a *repetição* das *mesmas* características (sucessão e contiguidade), e assim, ainda que esta repetição se estendesse indefinidamente, daí jamais poderíamos concluir uma conexão tal como a que se precisa para

⁷³⁰ Losee, op.cit., p.93.

legitimar a inferência de causa e efeito. Em outras palavras, a *conjunção constante* também não garante uma *conexão necessária*.

Diante do fracasso em tentar fundamentar a noção de causa e efeito na experiência, Hume passa a fornecer a sua explicação para as postulações causais que fazemos. Elas não derivam da razão, mas de uma “crença”; uma crença que decorre de um hábito associativo da mente que, dado um grande número de conjunções constantes de contiguidade e semelhança, “infere” uma relação de causa e efeito. O fundamento da relação de causa e efeito seria, em última análise, aquilo que o filósofo chamou de “costume”, “hábito” ou “transição habitual”. Ele afirma que “quando a mente passa da ideia de um objeto [causa] à ideia de outro [efeito] (...) ela não está sendo determinada pela razão, mas por certos princípios que associam as ideias desses objetos, produzindo a união na sua imaginação”.⁷³¹

Naturalmente, quando Hume se refere à “conjunção constante”, ou à “repetição das mesmas características” de sucessão e contiguidade, ele está a falar precisamente daquilo que desde a antiguidade foi denominado de *indução*. Em outros termos, Hume está revelando que a indução não é capaz de justificar mesmo as mais elementares relações causais que fundamentam os conhecimentos da ciência. Mas poderia a própria indução ser justificada de alguma forma? Caso a indução pudesse ser justificada, a conjunção constante poderia ser um adequado critério para estabelecer uma conexão necessária entre a causa e o efeito determinado. Hume argumenta que para que uma tal justificação ocorresse deveria ser admitido algum tipo de princípio de *uniformidade da natureza*. Um princípio que garantisse que a natureza continuará se comportando no futuro da maneira que se comportou no passado.⁷³²

Muitos autores já expuseram e analisaram o argumento de Hume sobre a uniformidade da natureza. Convém fazê-lo aqui sinteticamente. Se a natureza é uniforme, temos razão para acreditar que o futuro será semelhante ao passado. Assim, uma vez que o sol sempre nasceu em todos os dias passados, então ele nascerá amanhã. Mas como se justifica esse princípio que a natureza se comportará no futuro da maneira como se comportou no passado? De onde vem esta ideia? Qual é o seu fundamento? Só pode provir da experiência. Em muitas situações distintas passadas observamos que a natureza continuou se comportando no futuro como se comportava no passado. O fogo continua produzindo calor no presente como produzia no passado; as plantas continuam crescendo sob a luz solar no presente como cresciam no passado; o som continua produzindo vibrações no presente como produzia no

⁷³¹ Hume, 2000, p.121.

⁷³² Hume, 1995, p.64-65

passado, e assim por diante. Portanto, temos fundamento para acreditar que a natureza continuará se comportando no futuro como se comportou no passado. Segundo Hume, esse tipo de argumento deve ser rejeitado, porque se trata de uma petição de princípio. O argumento usado para justificar o princípio da uniformidade da natureza é um argumento *indutivo*. Portanto, evocamos um princípio de *uniformidade da natureza* para justificar a indução, mas o próprio princípio da uniformidade da natureza é fundado na indução. Como a natureza se comportou de maneira uniforme em n casos, então ela *sempre* se comportará de maneira uniforme. O argumento é circular. Como afirma Rosenberg, isso é o mesmo que “dar como garantia de pagamento de um empréstimo a promessa de que você cumpre as suas promessas”.⁷³³

O argumento exposto nos parágrafos anteriores é conhecido na filosofia da ciência como o “problema de Hume” ou o “problema da indução”. Ele é amplamente admitido por filósofos como revelando que a ciência é, na melhor das hipóteses, um conhecimento inevitavelmente falível, e, na pior das hipóteses, que o conhecimento não pode ser de modo algum ser justificado pela experiência.⁷³⁴ Por 250 anos esse argumento tem sido considerado como um problema para a fundamentação da ciência empírica, e não raras vezes tem conduzido filósofos a posicionamentos céticos em relação ao conhecimento científico.⁷³⁵ A posição do próprio Hume, no entanto, não foi cética. No nível prático, ele estava disposto a continuar confiando no testemunho da experiência passada.⁷³⁶ Essa confiança de Hume foi compartilhada pelos filósofos empiristas nos séc. XVIII e sec.XIX, que continuaram considerando o empirismo como fundamento aceitável para a ciência, ainda que sem resolver o problema da indução. Essa situação mudou de figura, no entanto, no séc. XX, com as críticas de Pierre Duhem e Karl Popper.

Para concluir essa fase histórica de fundamentação da ciência empírica no séc. XVII e XVIII, também será útil mencionar brevemente uma das primeiras tentativas de resposta ao problema de Hume, realizada pelo filósofo prussiano Immanuel Kant (1724-1804 d.C). Hume havia argumentado que o problema para a determinação da conexão necessária entre dois

⁷³³ Rosenberg, 2005, p.115.

⁷³⁴ Ibid, p.65.

⁷³⁵ Ibid.

⁷³⁶ Losee, op.cit, p.96. Nas *Investigações sobre o entendimento Humano*, Hume afirma: “O costume é o grande guia da vida do homem. Ele é o único princípio que torna útil nossa experiência e nos faz esperar, no futuro, uma série de eventos semelhantes àqueles que apareceram no passado. Sem a influência do costume, ignoraríamos completamente toda questão de fato que está fora do alcance dos dados imediatos da memória e dos sentidos. Nunca poderíamos saber como ajustar meios em função dos fins, nem como empregar nossas faculdades mentais para a produção de um efeito. Seria, ao mesmo tempo, o fim de toda ação como também de toda a especulação”. Hume (2006). Seção V, parte I, parágrafo 6.

eventos que chamamos de causa e efeito não poderia ocorrer *a priori*, uma vez que se tratava de um conhecimento da experiência, ou seja uma *questão de fato*. Para lidar com essa questão Kant propôs uma espécie de síntese entre o empirismo e o racionalismo. Ele concordou com os empiristas que não temos ideais inatas na mente, e que o conhecimento é construído pela experiência, mas argumentou que a nossa estrutura cognitiva possui certas categorias pré-estabelecidas pelas quais o conhecimento é construído. Ele denominou essas categorias de “razão pura”, ou, mais exatamente, “categorias puras” (ou “formas a priori”) do entendimento e da percepção. Essas categorias são “condições de possibilidade da experiência sensível”, ou seja, sem elas o nosso conhecimento da experiência simplesmente não seria possível. Kant apresentou duas categorias puras da sensibilidade (espaço e tempo) e doze categorias puras do entendimento, dentre as quais se encontra a categoria da “causalidade”. Portanto, a causalidade, para Kant, não é um conceito construído a partir da experiência, tampouco é uma ideia inata da mente. Trata-se de uma categoria pura do entendimento, uma forma a priori pela qual construímos os conhecimentos da experiência. Em outras palavras, não é a causalidade que é derivada da experiência – ou deveria ser (como supôs Hume) – mas a experiência que é derivada da categoria a priori da causalidade.⁷³⁷ Essa inversão de perspectiva foi considerada por muitos como uma “revolução copernicana” na filosofia.

A partir dos pressupostos do parágrafo anterior, Kant construiu toda a sua intrigante epistemologia.⁷³⁸ E derivada dela, ele apresentou os célebres três tipos de juízos que podemos emitir sobre as coisas (em contraste com apenas dois propostos por Hume): (1) os “juízos analíticos”, que são *a priori*, independentes da experiência, e *necessários*, semelhante às *relações de ideias* de Hume, onde se enquadram as proposições da lógica e matemática; (2) os “juízos sintéticos”, que são os juízos sobre a experiência, que são *a posteriori*, e *contingentes*, semelhante às *questões de fato* de Hume; e (3) os “juízos sintéticos a priori”, os versam sobre matéria da experiência, mas são *necessários*, pois estão relacionados com as próprias condições de possibilidade do conhecimento. As relações causais estabelecidas por várias leis científicas são exemplos desse último tipo de juízo. Kant chega a citar as leis do movimento de Newton como um exemplo emblemático.⁷³⁹

Mas o que nos interessa saber aqui é: a proposta de Kant resolve efetivamente o problema de Hume? A resposta é *difícilmente*. Como muitos já observaram, a primeira

⁷³⁷ A resposta mais explícita de Kant ao problema da causalidade está no parágrafo 29 de *Prolegômenos de toda metafísica futura*. Kant, 2008.

⁷³⁸ A epistemologia de Kant é apresentada detalhadamente na *Crítica da Razão Pura*. Kant, 1999.

⁷³⁹ Kant, 2004.

dificuldade com a proposta de Kant é que não está claro a diferença entre a lei geral da causalidade (tudo tem uma causa) – o que se pode conceder como razoável admitir que proceda de algum tipo de categoria pré-estabelecida do nosso entendimento – e uma lei empírica específica que afirma que *A* é a causa de *B*. Aparentemente Kant apresenta uma resposta para a lei geral da causalidade, mas não para a hipótese de que *A* é a causa de *B*, em vez de *C* ser a causa de *B*. Ademais, o que parece ser o ponto central do problema de Hume não é que o fato de *atribuirmos* necessidade a certas leis, ou *por que* atribuímos essa necessidade, mas sim *o que justifica que essa necessidade que atribuímos realmente exista na natureza*. E sobre essa precisa questão, apesar da sua ingeniosa epistemologia, Kant não oferece resposta.⁷⁴⁰

15.3 FILOSOFIA DA CIÊNCIA DO SÉC. XX: O POSITIVISMO LÓGICO E SEUS CRÍTICOS

O início do séc. XX foi marcado pelo surgimento da disciplina da filosofia da ciência pelos chamados *positivistas lógicos*. O positivismo lógico foi um movimento iniciado por um grupo de cientistas e filósofos nas cidades de Viena e Berlim no período de 1910 a 1940 aproximadamente, formando as comunidades que ficaram conhecidas como *Círculo de Viena* e *Círculo de Berlim*. Após o início da segunda guerra mundial, os grupos se dispersaram em exílios pelo mundo, principalmente nos EUA e Inglaterra, gerando uma expressiva influência onde se estabeleceram. Para os positivistas lógicos (ou *empiristas lógicos*, como também ficaram conhecidos)⁷⁴¹, a ciência deveria ser fundamentada rigorosamente na lógica e na experiência. Impulsionados pelo surgimento da lógica moderna na virada do séc. XX, e pelo sucesso na fundamentação da matemática com as novas ferramentas da lógica formal, os positivistas procuraram estender o sucesso alcançado na matemática também na fundamentação da ciência empírica. Da mesma forma que a matemática foi reconstruída pelos axiomas da lógica formal moderna por Frege, Russel, Whitehead e outros, a ciência empírica poderia ser reconstruída por “axiomas” da experiência, bastando para isso que se conseguisse padronizar a experiência na forma de enunciados básicos, o que eles costumavam chamar de “proposições elementares”, “proposições protocolares”, “proposições factuais”, ou outras

⁷⁴⁰ De Pierris, 2018.

⁷⁴¹ Os integrantes do Círculo de Berlim atribuíram a si mesmos a denominação de “empiristas lógicos” para se distinguir dos “positivistas lógicos”, do Círculo de Viena. Hoje em dia, no entanto, a maioria dos autores usa os dois termos como intercambiáveis.

denominações. Estabelecidas essas proposições, seria possível usar as ferramentas da lógica moderna para reconstruir a ciência sobre um alicerce seguro.

As teses dos positivistas foram resumidas por um manifesto publicado em 1929 pelo Círculo de Viena, intitulado *A concepção científica do mundo*. No manifesto, eles apresentaram as suas principais teses, as quais vale a pena lembrar: (1) o objetivo de construir uma ciência unificada; (2) a rejeição da metafísica; (3) a aceitação somente de enunciados empíricos; e (4) a aplicação das novas ferramentas da análise lógica da linguagem para verificar os enunciados.⁷⁴² Embora esses pontos resumam bem o projeto do positivismo lógico, convém apresentar de um modo mais amplo alguns dos seus pilares de sustentação, que depois passaram a ser intensamente criticados.

O primeiro pilar é o *empirismo*. Os positivistas estavam seguindo a tradição empirista de que todo conhecimento sobre o mundo natural é construído pela experiência. Eles rejeitaram qualquer forma de inatismo ou apriorismo sobre os conhecimentos do mundo natural. O segundo pilar é o *logicismo*. Todo conhecimento analítico pode ser reduzido aos axiomas da lógica por meio de uma linguagem lógica formal. O binômio *empirismo lógico*, portanto, indica a compreensão que todo conhecimento humano pode ser reduzido aos axiomas da lógica e aos enunciados básicos da experiência. O terceiro pilar – decorrentes dos anteriores – é o *fundacionismo*. Todo edifício do conhecimento válido sobre o mundo está construído sobre um fundamento sólido dos enunciados básicos da experiência. Há, portanto, uma distinção clara entre os enunciados teóricos, por um lado, e os enunciados observacionais (ou da experiência), por outro, sendo que os primeiros estão assentados sobre os últimos. O quarto pilar é o *reducionismo lógico*. Todo enunciado pode ser reduzido aos enunciados básicos da experiência por meio da análise lógica da linguagem. O quinto pilar – decorrente do anterior – é o *verificacionismo*. Qualquer enunciado que não possa ser reduzido aos enunciados básicos da experiência, pela análise lógica da linguagem, sequer pode ser avaliado em termos de verdadeiro ou falso, pois, com efeito, não é dotado de sentido algum. Eles devem ser sumariamente eliminados. A metafísica representa precisamente um conjunto de enunciados desse tipo.⁷⁴³ O sexto pilar é o *indutivismo*. Uma vez que a ciência é composta por enunciados universais, a indução deve ser aceita como válida logicamente, ou como um princípio validado pela experiência. E o sétimo pilar é o *confirmacionismo*. É possível

⁷⁴² Hans, 1986.

⁷⁴³ Um texto clássico desse período é o artigo de Carnap, *A eliminação da metafísica pela análise lógica da linguagem*. Carnap, 1959.

confirmar uma hipótese científica, do ponto de vista lógico formal, por meio das suas consequências.

Com base nos pilares apresentados acima era possível criar um oportuno critério de demarcação não apenas entre a ciência e a metafísica, mas entre a ciência e a não-ciência. Sistemas de ideias cujos enunciados não revelem uma base empírica pela análise lógica da linguagem não podem ser considerados científicos. Mais que isso: não podem ser considerados com significado, devendo, assim, serem rejeitados.

As teses dos empiristas lógicos enumeradas nos referidos pilares foram duramente criticadas pelo filósofo vienense Karl Popper (1902-1994), um dos mais influentes opositores do movimento. Popper atacou principalmente três dos pilares enumerados acima: o fundacionismo, o indutivismo e o confirmacionismo. Sobre o fundacionismo, Popper argumentou que a ideia de uma linguagem observacional pura, sobre a qual os enunciados teóricos mais gerais estariam assentados, já na sua origem é defeituosa. Não há enunciados observacionais puros. Todo enunciado da experiência já tem uma carga de teoria. Em 1906, Pierre Duhem já havia proposto que um cientista, ao observar e medir um fenômeno usa instrumentos, telescópios, termômetros, barômetros, todos eles imbuídos de uma carga teórica bastante significativa. Por essa razão ele intitula a seção 5 do capítulo II do aclamado *The aim and Structure of Physical Theory* de “Teoria antecipando o experimento”.⁷⁴⁴ Popper enfatizou que mesmo os enunciados mais básicos da experiência, que os positivistas insistiam fundamentar todo resto, como “Este é um copo de água”, já continham formas universais, como “copo”, ou “água”, o que também pressupunha uma certa dose de teoria prévia.⁷⁴⁵ Gillies aplica a análise de Popper para as polêmicas da astronomia no séc. XVI. No auge das controvérsias entre os sistemas ptolomaico e copernicano, entre 1570 e 1600, os astrônomos ptolomaicos classificavam um planeta como um astro que não era fixo no céu, e portanto, o que eles enxergavam era o Sol como um planeta, pois estava em movimento, e a Terra como um astro distinto de um planeta, pois estava em repouso. Por outro lado, os astrônomos copernicanos enxergavam a Terra como um planeta e o Sol como um astro distinto de um planeta. Esse exemplo revela que havia um *background* teórico prévio norteando as observações.⁷⁴⁶ Essa crítica de Popper e Duhem sobre a possibilidade de uma linguagem observacional pura é conhecida na filosofia da ciência como a tese do “impregnacionismo

⁷⁴⁴ Duhem, 1991.

⁷⁴⁵ *Lógica da Pesquisa científica*, cap.V. Popper, 1974.

⁷⁴⁶ Gilles, 1993, p.26-27.

teórico”, ou seja, a tese de que as observações são sempre impregnadas de teoria (“*theory laden*”), um problema para a fundamentação do empirismo ainda hoje.

Sobre o pilar do *indutivismo*, Popper enfatizou que a única maneira de fundamentar os enunciados da ciência na experiência – tal como pretendiam os positivistas lógicos – era por meio de generalizações indutivas, uma vez que os principais enunciados da ciência são apresentados na forma universal, por exemplo, “todos os metais se dilatam quando aquecidos”. Como não somos capazes de observar *todos* os metais da natureza, os positivistas dependem de aceitar como válidas as generalizações indutivas para efetuar a sua análise lógica. Mas Popper questionou essa concessão, pois a indução não possui fundamento nem na lógica, nem na experiência.

Popper retoma a discussão já iniciada por Hume e argumenta que só há duas formas de justificar um princípio qualquer, e consequentemente também a indução: *a priori* ou pela *experiência*. Mas caso tentemos justificar a indução pela experiência cairemos numa circularidade ou num regresso infinito; caso busquemos uma justificação *a priori* cairemos num dogmatismo. Mais exatamente, Popper argumenta que aqueles que tentam justificar a indução geralmente apelam para uma das três alternativas seguintes: (1) para alguma espécie de “princípio da indução”; (2) para alguma espécie de “princípio de uniformidade da natureza”; (3) para o apriorismo. Caso assumamos que há uma espécie de “princípio da indução” que justifica as inferências indutivas, estaremos nos referindo a um princípio geral, que, para ser justificado pela experiência, terá de ser construído por indução. Nesse caso teríamos, naturalmente, uma justificação circular. Outro caminho seria recorrer a um princípio de indução de ordem superior, mas isso levaria a um regresso infinito. Portanto, não há como justificar um tal “princípio da indução” pela experiência. A outra alternativa – o princípio de uniformidade da natureza – também não conduz a qualquer avanço. Popper argumenta que aqueles que defendem esse princípio serão levados a dificuldades semelhantes às esboçadas acima, pois no fundo essa alternativa não passa de uma variante do próprio “princípio de indução”.⁷⁴⁷ Assim, resta tentar justificar a indução *a priori*. Porém ele também rejeita essa possibilidade, pois nesse caso teríamos que aceitar a indução como um “ato de fé”. Em vista disso, Popper conclui que a indução não pode ser justificada de maneira alguma. Ele afirma: “as várias dificuldades da lógica indutiva aqui esboçadas são intransponíveis”.⁷⁴⁸

Diante da impossibilidade de justificar a indução tanto do ponto de vista lógico quanto pela experiência, Popper revela que, a prevalecer o critério de verificação dos positivistas, não

⁷⁴⁷ Popper, 2002, p.389. Veja também Gillies, op. cit., p.26.

⁷⁴⁸ Idem, 1974, p.29.

apenas a metafísica é eliminada, mas igualmente todas as proposições universais da ciência. Em outras palavras, uma vez que a ciência é feita de leis universais, a própria ciência seria eliminada. Isso significa que, em última análise, a demolição do pilar do indutivismo leva também, e inevitavelmente, à demolição dos pilares do *verificacionismo* e do *reducionismo lógico*.

Resta a análise de Popper sobre o pilar do *confirmacionismo*. Durante o séc. XIX vários cientistas e filósofos já haviam notado que muitas vezes a ciência não formulava as suas teorias pelo esquema indutivo, mas pela elaboração de hipóteses. Eles defenderam que uma hipótese poderia ser aceita caso a dedução de suas consequências estivesse de acordo com a experiência. Foi esse fato que motivou o polímata inglês John Herschel (1792-1871), por exemplo, a propor uma clara distinção entre contexto de descoberta e justificação, alegando que o procedimento adotado para formular uma teoria é irrelevante para a questão da sua aceitabilidade. Pouco importa se a teoria é formulada por indução ou por hipóteses, o que importa é que a sua justificação se dá por meio das suas consequências.⁷⁴⁹ Esse procedimento ficou conhecido como confirmação hipotético-dedutiva (H-D), ou simplesmente método H-D. Na sua versão mais ingênua, o método H-D pode ser entendido como um procedimento pelo qual uma hipótese pode ser confirmada indiretamente, por meio de consequências empíricas que dela podemos retirar. Se essas consequências empíricas de fato forem observadas, então a hipótese é confirmada. As consequências empíricas mais oportunas para essa confirmação são aqueles “novos fenômenos”, ou seja, fenômenos ainda desconhecidos, que costumam ser considerados “predições” da hipótese. Se tais predições de fenômenos desconhecidos realmente ocorrerem, a hipótese tem uma significativa evidência em seu favor. Diz-se que ela foi *confirmada*.

Diante da caracterização lógica que os positivistas queriam conferir para a ciência, surgiu a questão de como poderia ser formalizado o modelo de confirmação hipotético-dedutivo de uma hipótese. Carl Hempel foi um dos principais nomes do positivismo a procurar estabelecer uma *lógica da confirmação científica* em artigos entre 1943 e 1948.⁷⁵⁰ Nesses artigos, Hempel lidou com vários critérios para uma hipótese ser considerada confirmada, além de vários paradoxos de confirmação. Mas o principal dos critérios permaneceu aquele que assim já era considerado nos séculos anteriores: dada uma hipótese *H*, a evidencia *E* confirma a hipótese caso possa ser formalmente deduzida de *H* e de um conjunto de condições iniciais.

⁷⁴⁹ Losee, op. cit., p.104.

⁷⁵⁰ Veja Hempel, 1945. Uma versão puramente sintática de confirmação.

Mas Popper argumentou que as hipóteses submetidas a esse processo de modo algum podem ser consideradas logicamente justificadas. Traduzindo a inferência descrita acima em termos da lógica simbólica, podemos dizer que P é uma hipótese, e Q é um conjunto de consequências empíricas da hipótese. A ocorrência de Q não implica necessariamente em P . Resumindo, a inferência lógica abaixo *não é válida*:

$$\frac{P \rightarrow Q}{Q} \quad \frac{}{P}$$

Trata-se da conhecida falácia lógica da *afirmação do consequente*. Não é porque o fogo implica em calor que o calor implicará necessariamente no fogo. Portanto, não é possível justificar uma hipótese por meio do procedimento descrito acima como o método H-D. Não importa quantas predições bem-sucedidas a hipótese seja capaz de oferecer, disso não se segue que ela é verdadeira, ou está justificada logicamente.

Mas como mencionei acima, essa é uma versão ingênua da confirmação H-D. Uma versão mais refinada desse método considera que a ocorrência de tais predições, embora de fato não impliquem necessariamente na hipótese considerada, mostra ao menos que há uma boa probabilidade dessa hipótese ser verdadeira. Em outros termos, a aplicação bem-sucedida do método H-D, principalmente no que se refere a predição de fenômenos desconhecidos, indica que a hipótese sob teste é, ao menos, *mais provável* que outras hipóteses. Essa é a concepção do método H-D defendida por Huygens, já no séc. XVII, por exemplo, e outros modernos. Observe a descrição de Huygens na introdução do seu Tratado da Luz:

Pode-se encontrar nesse assunto um tipo de demonstração que não carrega um grau de certeza tão grande quanto aqueles empregados na geometria; e que difere nitidamente do método empregado pelos geômetras no qual eles provam as suas proposições por princípios incontrovertidos e bem estabelecidos, enquanto que os princípios aqui são testados pelas inferências que são derivadas deles. A natureza do assunto não permite outro tratamento. É possível, no entanto, nesse procedimento estabelecer uma *probabilidade que é um pouco menor que a certeza*. Este é o caso quando *as consequências dos princípios admitidos estão em perfeito acordo como os fenômenos observados*, e especialmente quando essas verificações são numerosas; mas acima de tudo, quando se emprega uma hipótese capaz de oferecer uma *predição de um novo fenômeno*, e encontra a sua expectativa realizada.⁷⁵¹

Huygens está plenamente consciente das inadequações do método H-D (que naturalmente não era chamado assim na sua época) para justificar uma hipótese em definitivo.

⁷⁵¹ Mathews, 1989, p.126-127. Grifos meus.

Mas ele diz que o assunto da investigação da natureza “não permite outro tratamento”. Não obstante, ele ressalta que embora não forneça certeza, pode-se admitir que, sob certas circunstâncias, esse método seja capaz de fornecer ao menos alta probabilidade para as hipóteses testadas. Esse entendimento antecipado por Huygens foi esposado por outros positivistas, como Rudolf Carnap (1891-1970), que procurou formular uma teoria de confirmação probabilística, baseada na ideia de “graus de confirmação” de uma hipótese. Se aceitarmos o que Huygens propõe, haverá hipóteses que apresentarão uma maior probabilidade, e outras uma menor probabilidade; algumas apresentarão um maior grau de confirmação e outras um menor grau de confirmação. Todavia essa concepção se mostrou extremamente problemática numa análise mais detalhada. Popper argumentou não somente que tais probabilidades eram difíceis de serem estabelecidas na prática, como rigorosamente não poderiam ser determinadas. Como as hipóteses utilizadas na ciência são em grande parte enunciados universais, o grau de confirmação delas seria rigorosamente igual a zero. Elas não poderiam ser consideradas mais prováveis do que qualquer outra hipótese. O *confirmacionismo*, portanto, também colapsou sob a análise de Popper.

Demolidos a maioria dos pilares de sustentação do empirismo lógico, caberia se perguntar sobre o que restou de pé no empreendimento científico, se é que restou alguma coisa. Se os enunciados científicos não podem ser justificados nem por indução e nem por confirmação H-D, como, então, poderiam ser justificados? Sem uma base empírica segura e clara, haveria, afinal, qualquer distinção entre os conhecimentos da ciência e da metafísica, ou da ciência e astrologia, ou religião, ou qualquer outro sistema mitológico?

Popper estava ciente das implicações da sua crítica. Por isso mesmo ele propôs uma alternativa a partir dos escombros do positivismo. Para apresentar a sua visão da ciência, o filósofo vienense chama a atenção para a assimetria lógica que existe entre a confirmação e a falsificação de uma hipótese. De fato, do ponto de vista lógico não é possível *confirmar* uma hipótese, mas é possível *falsificá-la*. Para citar o exemplo usado por Popper, considere a hipótese “todos os cisnes são brancos”. Se alguém avistar um cisne preto essa hipótese estará falseada. Não é difícil mostrar que esse falseamento é válido do ponto de vista lógico. Se P é uma hipótese e Q são consequências empiricamente testáveis dessa hipótese, a observação de fatos que contradizem alguma dessas consequências demonstra que a hipótese é falsa, trivialmente, por *modus tollens*. Formalizando:

$$\frac{P \rightarrow Q \quad \neg Q}{\neg P}$$

Em outras palavras, do ponto de vista lógico, a confirmação não é possível, mas o falseamento é. Popper insiste que esse é o único procedimento logicamente válido que poderia fundamentar a ciência, e conduzir ao avanço do conhecimento. O que deveria caracterizar o conhecimento científico seria a sua *falseabilidade*, ou seja, a possibilidade de ser falsificado, de ser demonstrado falso. Um enunciado que sobrevive aos testes sem ser falseado não pode ser considerado *confirmado*, mas sim *corroborado*, persistindo nos arquivos da ciência até que seja eventualmente eliminado. A ciência de fato funciona com base no método H-D, mas este só é capaz de dizer se as hipóteses são falsas. Retomando a sugestão de John Herschel, Popper defende que não importa como o cientista chega a uma teoria, se por hipótese, indução, acidente, ou de qualquer outra maneira. O que importa é que a teoria deve ser aceita ou rejeitada pelas suas consequências. A diferença é que Popper não considera que essas consequências possam *confirmar* logicamente uma hipótese (como Herschel); somente falseá-la. Tal entendimento do funcionamento da ciência ficou conhecido como *falsificacionismo* (ou *falseacionismo*). A ciência começa com a conjectura de hipóteses, e avança por meio de críticas e refutações que pretendem falsear as hipóteses formuladas. O papel do cientista é ter uma postura crítica, procurando sempre falsear as hipóteses. A partir dessa tese, Popper conclui que um adequado critério de demarcação entre a ciência e não-ciência não é um questionável fundamento das teorias em enunciados básicos da experiência, manifestos pela análise lógica da linguagem (como os positivistas acreditavam), mas a *testabilidade* (ou a *falseabilidade*) das teorias. Se um enunciado não pode ser demonstrado falso pela confrontação com a experiência, não pode ser considerado científico.

A crítica de Popper ao projeto dos positivistas lógicos foi avassaladora. Ainda hoje ela é considerada muito influente. A sua principal obra, a *Lógica da Investigação Científica*, é admitida como um marco na história da filosofia da ciência, apresentando um caminho tanto para *problema da indução* quando para o *problema da demarcação*. No entanto, a proposta de caracterização da lógica da ciência de Popper não teve o mesmo prestígio que a sua crítica. Em grande parte, isso ocorreu devido a problemas que foram detectados no falseacionismo. Esses problemas conduziram os filósofos a buscarem outras alternativas para compreender e explicar a ciência.

15.4 OS PROBLEMAS DO FALSEACIONISMO

O falseacionismo de Popper foi confrontado com três principais problemas, o primeiro deles já antecipado pelo próprio Popper: (1) o problema da “base empírica”; (2) o problema lógico da impossibilidade de falsear uma hipótese isolada; e (3) o problema da incompatibilidade com a prática científica efetiva. Passemos brevemente pelos três problemas.

O problema da base empírica se refere a necessidade de se ter um enunciado básico da experiência para efetuar o processo de falseamento. Por exemplo, caso alguém pretenda falsear a hipótese “todos os cisnes são brancos” precisará de um enunciado observacional como “este é um cisne negro”. O problema está em que este enunciado observacional deve ser perfeitamente seguro para que o falseamento tenha validade. Mas encontrar um fundamento seguro para os enunciados da experiência foi precisamente um dos pilares que Popper demoliu no projeto dos positivistas, argumentando que todo enunciado básico é impregnado de teoria. Para resolver esse problema, Popper apelou para um convencionalismo de base empírica, defendendo que em algum momento da estruturação do conhecimento científico seria necessário adotar uma convenção sobre o que seria considerado de acordo com a experiência. É claro que essa solução é altamente insatisfatória. Ela apenas transfere o problema para outra instância, qual seja, de esclarecer como e por que esse enunciado observacional estabelecido por *convenção* poderia, ainda assim, ser considerado um adequado critério de falseação, e conduzir a algum tipo de progresso do conhecimento.

O segundo problema do falseacionismo é ainda mais dramático. Simplesmente não é possível proceder a falseação conforme Popper propôs. Em 1951, Willard Quine (1908-2000) publicou o seu célebre artigo *Os dois dogmas do empirismo*, no qual ressaltou uma tese de Pierre Duhem proposta em 1906.⁷⁵² Não é possível que uma hipótese isolada seja falsificada. Duhem argumenta que quando submetemos uma hipótese ao teste, não é somente aquela hipótese que está sendo testada. Na verdade, sempre há um conjunto de hipóteses auxiliares que estão sendo assumidas juntamente com a hipótese principal. Dada a tese do impregnacionismo teórico, essas hipóteses auxiliares estão embutidas até mesmo nos instrumentos de medida utilizados na prática científica, como telescópios, pêndulos, dinamômetros, etc. Desse modo, é impossível testar uma hipótese isoladamente. Sempre que uma hipótese é submetida a teste, um conjunto amplo de hipóteses auxiliares estão submetidas ao mesmo teste. Quando um teste fornece um resultado negativo, não é possível saber qual

⁷⁵² Quine, 2010.

das hipóteses está sendo falseada. Pode ser que seja a hipótese principal, mas também pode ser qualquer uma das hipóteses auxiliares. Sendo mais exato, se H é uma hipótese em teste, K um conjunto de hipóteses auxiliares compatíveis com H , e E uma consequência empírica de H e K , então se E não se observa, não é possível saber se H ou K é falso, ou ainda se ambos são falsos. Em outros termos, a inferência abaixo *não é válida*:

$$\frac{(H \wedge K) \rightarrow E \quad \neg E}{\neg H}$$

Naturalmente, o correto seria:

$$\frac{(H \wedge K) \rightarrow E \quad \neg E}{\neg(H \wedge K)}$$

Na prática, o falseacionismo não pode ser executado.

Um exemplo bastante oportuno lembrado por Duhem é o da análise da órbita de Urano pela teoria da gravitação. Após a elaboração da teoria da gravitação, os sucessores de Newton prosseguiram aplicando a teoria para o cálculo das órbitas dos planetas no sistema solar. No caso do planeta Urano se observou que a órbita não coincidia com a predição da teoria. Mas bem ao contrário de falsear a teoria, os físicos e astrônomos postularam a existência de um planeta desconhecido que estaria perturbando a órbita do último planeta. Como se sabe, esse movimento gerou a descoberta do planeta Netuno. Nesse caso, os astrônomos questionaram a validade de uma das hipóteses auxiliares, a saber, “o sistema solar tem sete planetas”. Ao final, essa hipótese auxiliar é que foi falseada, e não a teoria da gravitação. Por outro lado, quando se observou a mesma situação na órbita de Mercúrio, não foi uma hipótese auxiliar que foi falseada, mas a própria teoria da gravitação (que foi substituída pela relatividade geral).

A tese apresentada acima ficou conhecida como a *tese Duhem-Quine*, que gerou uma influência considerável na filosofia da ciência posterior.⁷⁵³ Ela também é associada intimamente a um problema central do método H-D, o problema da *subdeterminação das teorias científicas pela evidência*, que afirma que em qualquer momento sempre há pelo menos uma teoria rival que é logicamente compatível com os dados empíricos. No caso

⁷⁵³ Embora vários autores já tenham reforçado a diferença entre a tese específica de Duhem e a tese específica de Quine.

específico do falseamento de uma hipótese, pode-se dizer que ela é *insuficientemente determinada* (ou é *subdeterminada*) pelo experimento que seria usado para falseá-la; e isso precisamente em razão da tese de Duhem, que revela que uma hipótese não pode ser testada isoladamente pelo método H-D. Quer seja para falsear ou confirmar, uma hipótese jamais pode ser testada isoladamente, pois sempre há um conjunto de hipóteses auxiliares que podem ser alteradas, garantindo, assim, a sua compatibilidade com a evidência. Portanto, em qualquer momento é possível conceber uma teoria alternativa logicamente compatível com os dados empíricos. O *problema da subderminação* pode ser entendido também como o *problema das hipóteses alternativas*. É um desafio duríssimo – e para alguns insuperável – tanto para o confirmacionismo como para o falseacionismo.

O terceiro problema do falseacionismo é que ele é amplamente incompatível com a prática científica efetiva. Ao observarmos a prática efetiva dos cientistas, e o desenvolvimento histórico da ciência, constatamos que a falsificação conforme proposta por Popper simplesmente não é realizada. Via de regra, as teorias convivem com muitas evidências contrárias, e nem por isso são falseadas. E talvez esse tipo de falseação não seja realizada precisamente porque os cientistas intuitivamente saibam que não é possível procedê-lo com uma hipótese isolada. Como veremos a seguir, Thomas Kuhn mostrou esse último ponto de modo cristalino.

15.5 THOMAS KUHN E A HISTÓRIA DA CIÊNCIA

Após o fracasso do falseacionismo, restaram apenas as ruínas do projeto de reconstrutivismo lógico da ciência. Esse impasse levou alguns filósofos a buscarem respostas para os problemas remanescentes na investigação da história da ciência. Como a ciência poderia ser caracterizada do ponto de vista histórico? Se nem a indução, nem a confirmação, nem a falseação são responsáveis pelo progresso do conhecimento, como as teorias seriam justificadas? O que a história tem a dizer sobre isso? Como os cientistas escolhem entre teorias rivais? Quais seriam os critérios efetivamente usados por eles? Sem dúvida, uma pesquisa histórica se impunha para enfrentar essas questões. E talvez a mais influente dessas pesquisas tenha sido realizada pelo físico e historiador da ciência estadunidense Thomas Kuhn (1922-1996), no seu célebre ensaio *A estrutura das revoluções científicas*, publicado em 1962. Como afirma o próprio Kuhn no livro, ao mergulharmos nos registros históricos da ciência encontramos uma imagem bem distinta daquela que até então fora desenhada pelos filósofos. Pontos bastante inquietantes emergiram dessa pesquisa.

A imagem relativamente consensual da ciência até Kuhn era de um empreendimento contínuo, cumulativo e progressivo. À medida que os novos conhecimentos são formulados, estes se acumulavam no corpo da ciência de uma forma relativamente progressiva e linear. Teorias mais gerais incorporam as menos gerais, e há uma compatibilidade lógica entre os vários níveis hierárquicos da ciência. Mas segundo Kuhn, os registros históricos revelam que o desenvolvimento da ciência não é tão contínuo e progressivo quanto essa imagem construída, muito pelo contrário. Ao longo da história da ciência se detecta nitidamente momentos de rupturas dramáticas. Kuhn chama esses períodos de “revoluções científicas”, em analogia com as rupturas e revoluções políticas. Via de regra, essas rupturas são omitidas na história lembrada pelos manuais científicos. Kuhn contrasta e caracteriza esses momentos de ruptura e revolução com outros de relativa normalidade, nomeando-os respectivamente de período de “ciência extraordinária” e “ciência normal”. O período de ciência normal é caracterizado pela vigência de um “paradigma”, uma espécie de superestrutura conceitual e metodológica que abriga praticamente toda a ciência de um determinado campo e período – um dos conceitos mais problemáticos da obra de Kuhn.⁷⁵⁴ Durante uma revolução científica ocorre uma mudança do paradigma, o que significava uma mudança muito mais profunda do que uma simples troca de teorias. Não ocorre apenas um acúmulo de novas informações durante essa transição; conceitos fundamentais filosóficos e científicos mudam, os métodos da ciência mudam, a própria concepção de conhecimento legítimo muda, e até a visão de mundo muda. Kuhn compara o grau dessas mudanças a mudanças de *Gestalt*, fazendo referência aos experimentos psicológicos realizados no início do séc. XX, em que se mostrava que dois observadores poderiam enxergar figuras completamente distintas ao serem submetidos precisamente ao mesmo estímulo visual, dependendo das experiências prévias que cada um tinha. Kuhn defendeu que as mudanças de paradigma geravam uma profunda alteração na percepção dos sujeitos. Uma alteração tão dramática que ele chegou a afirmar que durante a transição de um paradigma para outro não era somente a “interpretação do mundo” que se alterava, mas o “próprio mundo”⁷⁵⁵.

Kuhn apresentou uma abundância de exemplos históricos para ilustrar essa mudança. Ela poderia ser observada durante a transição da mecânica aristotélica para a galilaica; durante a transição da astronomia ptolomaica para a copernicana; durante a transição da teoria do Flogisto de Priestley para a teoria do oxigênio de Lavoisier; durante a transição da mecânica newtoniana para a relativística; além de outras ocasiões. Em cada situação, Kuhn procura

⁷⁵⁴ Veja Kuhn, 1998, p.220.

⁷⁵⁵ “Quando mudam os paradigmas, muda com eles o próprio mundo”. Kuhn, 1998, p.147.

mostrar que durante a operação de uma revolução científica, há não somente uma simples mudança de teorias. Não há uma *teoria* antes e outra depois. Há uma *ciência* antes e outra depois. Há um *mundo* antes e outro depois. Essa é a profundidade da mudança de um paradigma defendida por Kuhn.

Mas além de caracterizar o período de revolução científica, ele caracteriza também o período da *ciência normal*. Durante esse período, a ciência se comporta de modo aproximadamente cumulativo. O paradigma tem o importante papel de instituir o trabalho coletivo em torno de uma agenda de pesquisa comum, com um conjunto de problemas para serem resolvidos. À medida que o tempo avança, no entanto, as teorias dentro de um paradigma (e conseqüentemente o próprio paradigma) acumulam problemas sem solução. Kuhn chama esses problemas de “anomalias”, um outro conceito importante na descrição da ciência do historiador americano. As anomalias nada mais são que discrepâncias observadas entre o mundo e as predições das teorias. Depois de um certo tempo acumulando tais anomalias, o paradigma entra numa fase caótica que ele chama de “crise”, na qual ocorre uma proliferação de propostas teóricas alternativas, várias delas envolvendo paradigmas diferentes, que convivem e se desenvolvem conjuntamente até que uma delas se torne vitoriosa, gerando uma revolução. Após essa fase crítica que envolve a revolução, inicia um novo período de ciência normal, sob a articulação de um novo paradigma.

Um exemplo oportuno do processo descrito no parágrafo anterior é a transição da mecânica newtoniana para a teoria da relatividade. Kuhn relembra que por volta de 1815 a teoria ondulatória da luz foi aceita e aproximadamente na última década do século uma *crise* se estabeleceu. Sob o paradigma newtoniano a luz era considerada um movimento ondulatório que se propagava num éter mecânico governado pelas leis de Newton. Assim sendo, tanto as observações celestes quando as experiências terrestres deveriam ser capazes de detectar o deslocamento através do éter. Mas numerosas tentativas, experimentos, articulações foram feitas sem qualquer sucesso. Inicialmente essas tentativas fracassadas foram apenas consideradas problemas a serem resolvidos. Mas com o surgimento da teoria eletromagnética de Maxwell, a possibilidade de resolução dos problemas passados, envolvendo a propagação da luz e a mecânica newtoniana, tornou-se improvável, conduzindo aqueles experimentos à condição de “anomalias”, que, ao se acumularem, precipitaram o paradigma numa crise. Em conseqüência disso, afirma Kuhn, os anos posteriores a 1890 testemunharam uma proliferação de teorias de onde surgiu a teoria da relatividade especial de Einstein em 1905.⁷⁵⁶

⁷⁵⁶ Ibid, p.100-103.

Kuhn insiste que a transição entre a teoria newtoniana e a relatividade de Einstein é bem mais profunda do que assumiam os seus antecessores. Não se tratava meramente da substituição de uma teoria por outra mais geral, na qual ela passava existir como um *caso especial*, que poderia ser obtido por meio de uma redução ao limite. Para Kuhn, as duas teorias são fundamentalmente incompatíveis, versando sobre mundos essencialmente diferentes. Para a mecânica newtoniana, o espaço e tempo são independentes e absolutos. Para a mecânica relativística, o espaço e o tempo são interligados e relativos, podendo inclusive ser curvos. Não estamos falando do mesmo espaço; nem do mesmo tempo. Da mesma forma, a massa newtoniana é um conceito completamente distinto da massa einsteiniana. Quando se reduz a mecânica relativística para a mecânica newtoniana, os conceitos essenciais não são mais os mesmos. Vale a pena lembrar das palavras do próprio Kuhn a esse respeito:

Do ponto de vista desse ensaio, essas duas teorias [de Newton e Einstein] são fundamentalmente incompatíveis, no mesmo sentido que a astronomia de Copérnico com relação à de Ptolomeu: a teoria de Einstein somente pode ser aceita caso se reconheça que Newton estava errado (...) Os referentes físicos desses conceitos einsteinianos não são de modo algum idênticos à aqueles conceitos newtonianos que levam o mesmo nome. (A massa newtoniana é conservada; a einsteiniana é conversível com energia. Apenas em baixas velocidades relativas podemos medi-las do mesmo modo e mesmo então não podem ser consideradas idênticas).⁷⁵⁷

Na transição da mecânica newtoniana para a relativística ocorreu uma mudança de paradigma. Não estamos nos referindo a uma mera mudança de teorias. E a incompatibilidade referida no texto acima, remete a um outro conceito importante – e polêmico – criado por Kuhn na sua descrição da ciência: a “incomensurabilidade”. A impossibilidade de reduzir uma teoria de um paradigma a uma teoria de outro paradigma. Pertencendo a paradigmas diferentes, não há “medida comum” para que as teorias sejam comparadas. Elas não podem ser consideradas como a continuidade uma da outra, e menos ainda como logicamente compatíveis. Durante a mudança de um paradigma não há uma “acumulação” de conhecimentos e um nítido progresso; os problemas que deram origem a crise são resolvidos, mas na transição há sempre ganhos e perdas. Portanto, não há solução de continuidade entre a mecânica newtoniana e a relativística. Os pontos de referência de cada uma são mundos diferentes. A transição entre elas ocorreu por meio de uma revolução.

Esboçada a imagem de ciência que emergiu dos estudos históricos de Kuhn, convém, agora, destacar alguns pontos de interesse para nossa apresentação. O primeiro ponto é o problema da aparente ausência de continuidade no desenvolvimento histórico da ciência.

⁷⁵⁷ Ibid, p.133.

Naturalmente, por si só esse ponto coloca em xeque todo o desenvolvimento da ciência, e levanta o problema da explicação do progresso da ciência, uma vez que ela carece da continuidade típica de uma acumulação. Se não há continuidade na ciência, e ela não avança por acumulação, então como ela avança? O segundo ponto de destaque é o aprofundamento da tese do impregnacionismo teórico com a noção de paradigmas. Kuhn evidencia que o impregnacionismo teórico não apenas é uma realidade na ciência, mas é um problema ainda maior que os seus antecessores sugeriram. Os astrônomos copernicanos e ptolomaicos não estavam somente partindo de classificações teóricas diferentes, eles estavam efetivamente enxergando mundos diferentes. O terceiro ponto de destaque é que a mudança de paradigma ocorre acompanhada de uma mudança nos métodos e regras da ciência, bem como nas referências de conhecimentos e inferências que podem ser consideradas válidas e legítimas. Certamente isso levanta um problema, pois atinge frontalmente a ideia de um método universal e objetivo da ciência, além da crença numa lógica supracientífica a qual todo o conhecimento deveria se submeter. Todo método e lógica seria um processo histórico localizado no tempo e espaço. O quarto ponto de destaque é que a análise que Kuhn faz das *anomalias* praticamente afasta qualquer possibilidade de uma associação do funcionamento da ciência com o falseacionismo. Citando explicitamente a tese falseacionista de Popper, Kuhn esclarece que, caso prevalecesse o critério do filósofo vienense, toda a ciência seria falseada, pois não há teoria que não conviva com um certo número de anomalias. Ele afirma: “se todo e qualquer fracasso na tentativa de adaptar uma teoria fosse motivo para a rejeição de teorias, todas as teorias deveriam ser sempre rejeitadas”.⁷⁵⁸ O quinto ponto de destaque refere-se aos desdobramentos do problema da incomensurabilidade. Se realmente teorias sucessivas de dois paradigmas distintos não tem “medida comum”, não podem ser comparadas, há ganhos e perdas, e não existe um critério objetivo para a adesão de um novo paradigma (o que Kuhn compara as vezes a uma conversão religiosa), então a própria racionalidade da ciência é colocada sob suspeita. De que maneira poderíamos admitir a racionalidade da ciência com um conceito tão severo quanto a “incomensurabilidade”? É possível conciliar as duas coisas? Como? Uma vez que Kuhn não responde essas questões satisfatoriamente, com a sua obra a própria racionalidade da ciência – outrora assumida como certa no ponto de partida – torna-se problemática.

Diante de tantos novos problemas surgidos com o trabalho de Kuhn, e do abalo provocado na própria racionalidade da ciência, restava perguntar se ao menos haveria alguma

⁷⁵⁸ Ibid, p.188.

racionalidade oculta nas escolhas adotados pelos cientistas ao decidirem entre opções teóricas alternativas. O historiador estadunidense iniciou essa investigação na *Estrutura* e aprofundou em obras posteriores, indicando que os critérios efetivamente usados pelos cientistas na escolha de teorias eram: (1) consistência interna da teoria; (2) concordância com as observações (ou adequação empírica); (3) simplicidade da teoria; (4) alcance do escopo da teoria; (5) integração conceitual; (6) fertilidade da teoria.⁷⁵⁹ Mas o próprio Kuhn reconheceu que esses critérios não figuram todos juntos na escolha de uma teoria específica, as vezes entrando em conflito entre si, e com diferentes pesos em cada situação. Ou seja, aparentemente nenhum deles é necessário, e tampouco esse conjunto é suficiente. Além disso, ele reconheceu que alguns desses critérios são vagos, outros relativos, carecendo de um maior refinamento conceitual e exatidão.

Como se não bastasse, outros filósofos enxergaram critérios diferentes de Kuhn. Na verdade, o problema maior é que sequer há um consenso sobre quais critérios são efetivamente adotados pelos cientistas, quais são mais importantes, e qual é a relação de dependência entre eles. James MacAllister, por exemplo, não aceitou a relatividade da visão kuhniana sobre os critérios de escolha teórica e dividiu-os em critérios *internos* e *externos*. Os critérios *internos* seriam princípios lógico-empíricos que ocorrem tanto no período de ciência normal quanto de ciência extraordinária, como consistência interna, concordância com os dados empíricos e novas previsões. Esses critérios confeririam a base racional da ciência. Já os critérios *externos* seriam de natureza estética, como visuabilidade, simetria, simplicidade explicativa e parcimônia ontológica, critérios que seriam desafiados nos períodos de ciência extraordinária.⁷⁶⁰ Outros filósofos destacaram critérios como *poder explicativo* e *poder de unificação* de uma teoria.⁷⁶¹ Embora o conceito de explicação científica seja controverso na filosofia da ciência, o que se percebe é que os cientistas tendem a dar mais atenção para teorias que revelem as causas dos fenômenos, ou os mecanismos pelos quais os fenômenos supostamente operam. Sobre a *unificação*, alguns filósofos chegam até a afirmar que ele é o princípio mais fundamental da escolha teórica.⁷⁶² Portanto, não há consenso sobre quais são os critérios de escolha teórica pelos cientistas na sua prática efetiva.

Esses exemplos são suficientes para evidenciar que a investigação histórica sobre os critérios de escolha teórica dos cientistas não levou a uma conclusão satisfatória e definitiva, razão pela qual permanece uma questão em aberto ainda hoje. E de maneira geral, o trabalho

⁷⁵⁹ Kuhn, 2011, p. 339–359. Veja também Losee, op. cit., p.228-229.

⁷⁶⁰ McAllister, 1996, p.7. Veja também Losee, op. cit., p.233.

⁷⁶¹ Veja Ghins, 2013.

⁷⁶² Maxwell, 1993. Veja também Losee, op. cit., p.217.

de Kuhn, muito ao contrário de resolver as questões que talvez o impulsionaram de início, deixou a filosofia da ciência com uma herança ainda mais espinhosa do que até então possuía.

15.6 FILOSOFIA DA CIÊNCIA NAS DÉCADAS DE 1970 E 1980

As décadas de 1970 e 1980 foram marcadas pela continuação da tradição historicista da ciência, e principalmente pela tentativa de “reconstrução racional do progresso científico”, a partir do debate iniciado entre Popper e Kuhn, ainda na década de 1960.⁷⁶³ Os principais trabalhos relacionados a esse objetivo são do filósofo húngaro Imre Lakatos (1922-1974) e do estadunidense Larry Laudan (1941-). Lakatos procurou efetuar uma reconstrução racional do progresso da ciência numa espécie de síntese entre os trabalhos de Kuhn e Popper. Na sua reconstrução, ele incorporou as descobertas históricas de Kuhn sobre a ciência, porém evitando um caminho que levasse ao relativismo, com uma proposta de um modelo falseacionista mais sofisticado que o de Popper. Mais exatamente, Lakatos evitou o polêmico conceito kuhniano de “paradigma”, e o substituiu por “programas de pesquisa”, um dos conceitos fundamentais da sua análise.⁷⁶⁴ E propôs que no processo de falseação não deveriam ser consideradas teorias individuais, mas os “programas de pesquisa”.⁷⁶⁵ Tais programas teriam um “núcleo duro”, não falseável, e um “cinturão protetor” de hipóteses auxiliares, o que explicaria a resistência à mudança dos paradigmas evidenciada por Kuhn. Ao longo do tempo, no entanto, esses programas poderiam se revelar “progressivos” ou “degenerativos”. Um programa progressivo seria aquele que produziria um “excedente de conteúdo empírico corroborado”, ao contrário do programa degenerativo. Esse “excedente” seria precisamente o *critério objetivo* para a troca de um programa de pesquisa por outro. Mas Feyrabend criticou esse suposto critério objetivo, argumentando que um programa poderia se mostrar degenerativo no curto prazo e progressivo no longo prazo. Assim, o critério de Lakatos não teria um valor prático.⁷⁶⁶

Larry Laudan seguiu um caminho bem diferente de Lakatos. Ele se voltou contra a visão logicista dos positivistas e de Popper, e contra o revolucionismo e relativismo que enxergava em Kuhn.⁷⁶⁷ Ele propôs inverter a tradicional relação entre racionalidade e progresso da ciência da visão logicista: em vez de tentar defender o progresso da ciência

⁷⁶³ Losee, op. cit., p.202.

⁷⁶⁴ Lakatos, 1978.

⁷⁶⁵ Idem, 1970.

⁷⁶⁶ Feyrabend, 1970, p. 215.

⁷⁶⁷ Laudan, *Beyond Positivism and Relativism*. Laudan (1996).

mostrando a sua racionalidade, deveríamos tentar defender a racionalidade da ciência mostrando seu progresso. Nessa perspectiva, Laudan escreve *Progress and its problems*, propondo que o objetivo da ciência é a “resolução de problemas”, e que o progresso pode ser adequadamente aferido pelos *problemas* que as teorias são capazes de resolver. O que Laudan parece fazer é ponderar que, uma vez que Kuhn mostrou que numa mudança de paradigma há perdas e ganhos em relação a aquilo que as teorias conseguem explicar e predizer sobre o mundo, então tais elementos não são os melhores parâmetros para avaliar o progresso da ciência.⁷⁶⁸ O melhor parâmetro seria os *novos problemas resolvidos* (tanto empíricos quanto conceituais), pois esses de fato são os elementos acrescentados numa mudança de paradigma, uma vez que no final das contas a crise que levou a esta mudança foi gerada pelo acúmulo de problemas não resolvidos, e o seu fim depende precisamente da resolução desses problemas. Laudan, então, defende que o “objetivo da ciência é assegurar as teorias com uma maior efetividade na resolução de problemas”, e que é possível que eventualmente o progresso científico seja alcançado ainda que haja uma diminuição da adequação empírica na sucessão entre duas teorias.⁷⁶⁹ Ele afirma: “nesse modelo, é possível que uma mudança de uma teoria bem suportada empiricamente para outro menos suportada possa ser progressiva, contanto que a última resolva mais significativos problemas conceituais que a anterior”.⁷⁷⁰

O problema evidente com a proposta de Laudan é que ela retira do escopo do objetivo da ciência questões fundamentais como aquela relacionada à *verdade* das teorias. Se a adequação com os dados e fenômenos empíricos não é um critério essencial, então as teorias científicas não têm compromisso com a expressão ou representação da realidade, mas apenas com o pragmático objetivo de “resolver problemas”. O objetivo do conhecimento científico não seria a *verdade* sobre o mundo. Algumas teorias não podem ser consideradas mais verdadeiras que outras, ou mais fiéis à realidade que outras. Mas Laudan tinha plena consciência das implicações da sua proposta, tanto que fez uma das mais influentes críticas contra o realismo científico.⁷⁷¹ Com sua proposta, ele fomentou um debate que iria chegar até os dias atuais. Um debate sobre o estatuto epistemológico e ontológico das teorias científicas.

⁷⁶⁸ Laudan também evita o conceito “paradigma” de Kuhn, preferindo ao invés disso “tradições de pesquisa”. Laudan (1977).

⁷⁶⁹ Laudan, 1996, p.77-78.

⁷⁷⁰ Ibidem.

⁷⁷¹ Laudan, 1981a.

15.7 DISCUSSÕES ATUAIS DA FILOSOFIA DA CIÊNCIA

A tentativa histórica frustrada de esclarecer a racionalidade da ciência, primeiro com os positivistas, depois com Popper, Kuhn, Lakatos e outros, deu origem a três caminhos distintos de investigação que se desenvolvem até os dias de hoje, e com os quais pretendo concluir esse panorama histórico da filosofia da ciência e seus problemas. Tais caminhos são: (1) o retorno do instrumentalismo científico; (2) o novo reconstrutivismo lógico; e (3) o descritivismo histórico.

Acerca do *instrumentalismo científico*, antes de tudo cabe esclarecer que se trata de uma posição que defende, de maneira geral, que o objetivo da ciência não é a *verdade*; ou melhor, não é a representação da realidade do mundo. Como vimos, a proposta de progresso científico de Laudan é afinada com essa visão, embora ele mesmo não tenha assumido abertamente essa posição. Mas a bem da verdade, a tese instrumentalista remonta pelo menos a antiga tradição astronômica, que entendia que o objetivo desse campo não era descrever a realidade do universo, mas tão somente fazer previsões acuradas. Um objetivo pragmático, portanto. Durante a modernidade, essa tradição começou a perder força precisamente em razão das ambições das teorias astronômicas de Copérnico, Kepler, Galileu, Newton, e outros, que visavam a construção de uma astronomia *realista*, que expressasse a realidade do mundo, e não apenas predissesse as posições de astros no céu. Embora o projeto dos cientistas modernos tenha se tornado majoritário (principalmente após os *Principia* de Newton), o instrumentalismo ressuscitou a partir da década de 1980, após o fracasso no esclarecimento da racionalidade da ciência pela posição dominante. Uma proposta instrumentalista que adquiriu significativa visibilidade nesse período, por exemplo, foi o “empirismo construtivista”, do filósofo holandês Bas Van Fraassen (1941-). Para Van Fraassen, as qualificações de verdadeiro e falso podem ser usadas apenas para enunciados observacionais. No caso das teorias científicas, que são estruturas abstratas que postulam inclusive entidades não-observáveis, não podemos falar em termos de verdadeiro ou falso. Teorias são apenas *úteis* ou *não-úteis*. Teorias podem ser apenas mais “adequadas empiricamente”, ou menos. A verdade não entra em questão. Mais exatamente, ele não argumenta que as teorias não tenham qualquer elemento de verdade, ou não representem de modo algum a realidade; o que ele recomenda é uma atitude cética dos cientistas em relação a isso. Ele argumenta que a

“adequação empírica” é suficiente para os propósitos da ciência. E os cientistas deveriam se restringir a isso.⁷⁷²

Como muitos já observaram, a posição de Van Fraassen não é apenas um retorno ao instrumentalismo científico (ou anti-realismo), mas também um retorno a certas teses dos positivistas lógicos, uma vez que no seu ceticismo, ele procura retirar qualquer traço de metafísica da ciência. O caminho adotado por Van Fraassen é, no entanto, completamente distinto dos positivistas. Enquanto os positivistas enxergavam uma teoria científica como um conjunto de proposições organizadas axiomaticamente com regras de correspondência (o que chamamos hoje de concepção *sintática* das teorias), Van Fraassen enxerga uma teoria científica como uma coleção de *modelos* que revelam uma estrutura, que pode ser traduzida em enunciados de várias maneiras, cada qual possuindo vantagens e desvantagens (o que chamamos hoje de concepção *semântica* das teorias). Como as próprias leis científicas geralmente são *enunciados* que expressam um conteúdo preciso, a proposta de Van Fraassen leva ao surpreendente resultado de considera-las dispensáveis na ciência.⁷⁷³ Apenas o conjunto de modelos é suficiente para caracterizar uma teoria científica. Embora um tanto surpreendente, essa conclusão não é de todo inesperada. Na tradição instrumentalista, os modelos sempre tiveram um papel talvez mais preponderante que as leis e enunciados. Basta lembrar do modelo de universo geocêntrico ptolomaico, ou do modelo cartesiano dos vórtices, do magnetismo e vários outros. Os modelos geralmente são considerados abertamente como estruturas hipotéticas imaginadas e idealizadas, que visam representar uma realidade inacessível, mas que ainda assim se justificam por cumprirem uma finalidade prática. Um modelo teórico, portanto, só pode ser mais, ou menos, adequado empiricamente que outro; mais, ou menos, útil que outro. As entidades teóricas por ele postuladas podem ser mais ou menos convenientes para atingir essa adequação empírica, pois no final não passam de “ficções úteis”. A existência dessas entidades simplesmente não entra em questão. Ir além disso é extrapolar as fronteiras do que a ciência pode legitimamente afirmar.⁷⁷⁴

Naturalmente, esse retorno ao instrumentalismo de alguns filósofos gerou muitas críticas de outros analistas da ciência, que posteriormente foram denominados “realistas”. Já em 1978, Hilary Putnam havia proposto o célebre “argumento do milagre” (*no miracle-argument*), que defendia que, a não ser que alguém adote a posição realista de interpretação das teorias, o crescente sucesso preditivo alcançado na história da ciência seria simplesmente

⁷⁷² Van Fraassen, 1980.

⁷⁷³ Idem, 1989.

⁷⁷⁴ Van Fraassen, 1980.

um milagre. Se pretendemos admitir que a ciência não é fruto de um milagre, precisamos também admitir que o sucesso preditivo crescente das teorias indicam uma aproximação gradativa da verdade.⁷⁷⁵ As teorias científicas não podem ser consideradas *estritamente verdadeiras*, mas devem ser consideradas *aproximadamente verdadeiras*.⁷⁷⁶

Laudan respondeu a esse argumento no seu famoso artigo *Confutation of convergent realism*, onde defendeu que a história da ciência, longe de sustentar a posição realista, a confuta. Observando a história da ciência como um todo, há vastos exemplos de teorias com relativo sucesso preditivo que simplesmente terminaram se mostrando falsas (flogisto, éter eletromagnético, calórico, etc). Há vastos exemplos de teorias que sucederam outras e não transformaram as predecessoras em casos particulares; há vastos exemplos históricos de teorias que não podem ser consideradas mais próximas da verdade do que as suas antecessoras. Além disso, várias dessas teorias que foram consideradas falsas eram extremamente bem-sucedidas por um longo tempo, como a teoria geocêntrica ptolomaica. Ao contrário do que defendem os realistas, a evidência histórica reforça a tese oposta a que defendem. Alguns autores têm chamado este argumento de “meta-indução pessimista”: todas as teorias científicas até o momento se mostraram eventualmente falsas, portanto, indutivamente, não podemos admitir que elas sejam aproximadamente verdadeiras. Trata-se de uma simples e clara lição da história.⁷⁷⁷

Mas Laudan adverte que com essas observações ele não está concluindo que a ciência nada tem a ver com a verdade, e nem representa, de algum modo, a realidade. É claro que todos gostaríamos que a ciência de fato representasse a realidade do mundo. Entretanto, ele afirma, há “uma diferença entre *querer acreditar* em alguma coisa e ter de fato *boas razões* para acreditar”.⁷⁷⁸ A conclusão do filósofo é que não é possível inferir o realismo do sucesso preditivo das teorias científicas, e, conseqüentemente, inferir do realismo que as teorias são aproximadamente verdadeiras. Caso alguém deseje fazer essa defesa, outro caminho é necessário. E esse caminho passa por esclarecer, e talvez até formalizar, o conceito de “aproximadamente verdadeiro” usado pelos realistas. Sem isso, a defesa do realismo se torna bastante prejudicada. Mas, naturalmente, essa formalização é dependente do próprio conceito de *verdade*, cujo esclarecimento já se mostrou historicamente uma tarefa extremamente complexa. Esse ponto permanece, portanto, sem resposta. Mas Laudan alerta que, ainda que

⁷⁷⁵ Putnam, 1984.

⁷⁷⁶ Outras propostas realistas procuram entender as teorias científicas como uma síntese entre a concepção semântica e sintática, e procuram estabelecer outros fundamentos além do argumento do milagre para defender a verdade aproximada das teorias. Ghins, 2013.

⁷⁷⁷ Losee, op. cit., 260-261.

⁷⁷⁸ Laudan, 1981a.

se pudesse inferir o realismo do sucesso da ciência, a própria noção de “sucesso da ciência” é difícil de ser esclarecida sem uma “coerente teoria de confirmação”. A ausência dessa teoria, diante de tantas tentativas frustradas no passado, e diante de problemas tão tenazes – como o da subdeterminação – torna improvável um desfecho simples para essa questão. Tais dificuldades justificam porque esses problemas permanecem pendentes até os dias de hoje.

As observações do parágrafo anterior nos levam ao *segundo caminho* trilhado pela filosofia da ciência atual, diante do fracasso em esclarecer a racionalidade da ciência: o *novo reconstrutismo lógico*. Na verdade, o reconstrutivismo lógico que iniciou com os positivistas nunca se apagou completamente. A tradição sintática continuou, embora com muitas modificações. O que morreu com os positivistas foi a expectativa que a lógica clássica moderna (hoje, *lógica clássica*) poderia dar conta de esclarecer a racionalidade da ciência por meio de uma reconstrução lógico-empírica da linguagem. Já sabemos que a lógica clássica não é capaz disso. Ela não dá conta nem da complexidade da nossa linguagem em geral, nem da linguagem da ciência em específico. Contudo, novos sistemas lógicos têm sido desenvolvidos desde então, incluindo as chamadas lógicas não-clássicas, e esse projeto permanece como um promissor campo de pesquisa ainda hoje. Portanto, a meu ver, não se deve dizer que nenhum tipo de reconstrução lógica é possível porque o projeto dos positivistas fracassou. Reiterando, o projeto que fracassou foi a tentativa de produzir essa reconstrução a partir da lógica clássica moderna.

Na mesma linha das observações do parágrafo anterior, também é importante lembrar que o próprio confirmacionismo não morreu com os problemas apontados por Popper, Duhem, Quine e outros. Uma teoria probabilista de confirmação permanece viva e tem ganhado espaço nos últimos anos: o *bayesianismo*. Por meio uma abordagem de confirmação baseada em alguns teoremas do matemático inglês Thomas Bayes (1701-1761), o *modelo de confirmação bayesiano* é considerado por alguns como opção viável de fundamento para o confirmacionismo. Segundo esse modelo, seria possível mostrar com base em teoremas do cálculo de probabilidades que as hipóteses com predições bem-sucedidas pelo método H-D são de fato mais prováveis que outras. Trata-se, naturalmente, de uma formulação na mesma linha da teoria carnapiana, buscando bases probabilísticas para a confirmação, porém por caminhos distintos. Mas o modelo bayesiano padece de alguns problemas recalcitrantes. Além dos problemas evidenciados por Popper, sobre os fundamentos da própria probabilidade, esse modelo ainda busca construir uma teoria de confirmação probabilística com base em um controverso parâmetro relacionado ao *grau de crença dos agentes*. Não é difícil perceber que uma coisa é o grau de crença que alguém tem

na verdade de uma teoria, outra coisa bem distinta é a própria verdade da teoria. Como destaca Sprenger, citando indiretamente Glymour, “em vez de explicar a estrutura dos argumentos confirmatórios, a análise bayesiana mede os seus efeitos”.⁷⁷⁹ Mede os efeitos dos argumentos confirmatórios usados na ciência sobre os agentes que concedem ou não a sua aceitação. Isso significa que, caso não seja possível mostrar claramente qual é a relação entre o grau de crença dos agentes com a verdade dos argumentos científicos (ou ao menos verdade aproximada), dificilmente esse modelo pode oferecer respostas para as perguntas que efetivamente estão sendo buscadas pela filosofia da ciência. Em outras palavras, é um modelo que pode ser útil em algumas situações, mas tem pouca relação com os objetivos próprios da filosofia da ciência. Além disso, para explicar realmente prática científica é necessária uma teoria de confirmação *qualitativa*, uma vez que boa parte da história da ciência se fundamenta em argumentos desse tipo. De qualquer modo, o *bayesianismo* é um modelo confirmacionista que permaneceu vivo desde o início do séc.XX, e permanece ainda hoje em estudo.

Por fim, o *terceiro caminho* seguido pela filosofia da ciência a partir do fracasso em esclarecer a racionalidade do empreendimento científico é o que aqui chamo *descriptivismo histórico*. Losee afirma que, a partir da década de 1980, a concepção “normativo-prescritiva” da filosofia da ciência passou a ser alvo de intenso debate. Essa foi a concepção tradicional dominante que vigorou seguramente desde Aristóteles até Kuhn, cujo o objetivo era *prescrever* a maneira como a ciência deveria ser praticada pelos cientistas.⁷⁸⁰ Considerando tal abordagem pretenciosa, alguns filósofos sugeriram que o objetivo correto da filosofia da ciência deveria ser “a descrição da prática da avaliação científica” (não dizer como os cientistas deveriam fazer a ciência), surgindo, assim, as abordagens *descriptivistas* da filosofia da ciência.⁷⁸¹ Segundo Losee, as filosofias descriptivistas possuem duas versões: uma “modesta” e outra “robusta”. A versão modesta tem como objetivo a “reconstrução histórica da prática da avaliação científica”. Ou seja, o descriptivista modesto “pode procurar revelar os padrões implícitos em decisões como a rejeição de Aristóteles da partenogênese, na rejeição de Newton pelos vórtices cartesianos, ou pela insistência de Einstein que a interpretação de Copenhagen da mecânica quântica é incompleta”.⁷⁸² Ele investiga os padrões de racionalidade da ciência dentro do seu contexto histórico próprio. Essa abordagem requer “um certo trabalho de detetive, particularmente para episódios nos quais os pronunciamentos dos

⁷⁷⁹ Sprenger, 2011. Veja também Glymour, 1980b.

⁷⁸⁰ Losee, op. cit., p. 265.

⁷⁸¹ Ibid.

⁷⁸² Ibid.

cientistas e a sua prática não coincidem”.⁷⁸³ Já a versão do *descriptivismo robusto* se apoia nas conclusões obtidas pelo reconstrutivismo modesto, buscando retirar padrões para a reconstrução histórica da ciência *em geral*. Conforme afirma Losee:

A versão robusta da filosofia da ciência descritivista deriva das conclusões do descritivismo modesto, ou superimpõem a ele, uma *teoria* sobre prática avaliativa da ciência. Uma teoria proposta como uma contribuição ao nosso entendimento da ciência. Ela se propõe a explicar porque a ciência é como é. Uma filosofia da ciência descritivista tipicamente afirma que as práticas avaliativas da ciência exibem padrões que se conformam a certos princípios.⁷⁸⁴

Resumindo, para Losee, a versão do descritivismo modesto procura avaliar os princípios que norteiam as decisões referente a episódios específicos da ciência; o descritivismo robusto, procura princípios que norteiam a ciência em geral, ao longo do tempo. Relacionando as observações de Losee com as de Laudan, que considera as teorias do método científico como o ponto de convergência entre o historiador e o filósofo da ciência, poderíamos propor uma caracterização do descritivismo modesto como aquele cujo objetivo é descrever o *método* adotado, e os padrões de racionalidades implicados, em episódios específicos da história da ciência, de acordo com os parâmetros e princípios do contexto e época do próprio episódio. Já o descritivismo robusto buscaria desvelar os métodos e padrões de racionalidade gerais da ciência, supondo que hajam tais padrões perpassando a história do empreendimento científico como um todo. Naturalmente, Losee evita em usar o termo *método*, ou *lógica*, primeiro, porque ele está proximamente ligado à concepção normativo-prescritiva da ciência, mas em segundo lugar porque, como vimos, depois de Kuhn se tornou questionável que houvesse um método ou uma lógica universal perpassando toda a ciência. Então ele prefere usar uma expressão mais neutra e geral como “prática da avaliação científica”. Porém, a terminologia mais comum ao menos até a virada do séc. XX era mesmo “método” da ciência, razão pela qual aqui não se vê problema em adota-la, com as devidas ressalvas.

O que foi discutido nessa última seção esclarece os três caminhos distintos que se desenvolveram na filosofia da ciência a partir do fracasso no esclarecimento da racionalidade da ciência ao longo do último século. O retorno do instrumentalismo científico, o novo reconstrutivismo lógico e o descritivismo histórico de algumas correntes da filosofia da ciência. Sem qualquer pretensão de ser exaustivo na apresentação dos seus desdobramentos. Evidentemente, o presente trabalho se alinha mais com o último caminho, do descritivismo

⁷⁸³ Ibid.

⁷⁸⁴ Ibid, p.265.

histórico. Com esse quadro dos caminhos da filosofia da ciência atual é possível concluir o panorama histórico desse campo e alguns dos seus principais problemas, proposto para esse capítulo. Particularmente importante para esse trabalho é o *problema da racionalidade da ciência* e vários outros a ele ligados, que também foram citados. Entre eles, o *problema do empirismo*, o *problema da indução*, o *problema da confirmação*, o *problema das hipóteses alternativas*, o *problema do estatuto epistemológico e ontológico das teorias científicas*, entre outros. Ter esses problemas em vista é de particular importância para os desenvolvimentos posteriores. Isso porque, dos esclarecimentos acima fica claro que o que se propôs a realizar no primeiro volume dessa pesquisa está perfeitamente em sintonia com os objetivos do *descriptivismo modesto*, de investigar o método adotado e apresentado em um episódio específico da ciência, a saber, o desenvolvimento da teoria da gravitação universal e a solução do problema do sistema do mundo nos *Principia* de Isaac Newton, em 1687. Já o que se pretende no presente volume se alinha aos objetivos do *descriptivismo robusto*: usar as conclusões que se obteve na primeira etapa para se buscar princípios gerais de racionalidade da ciência. Mais especificamente, analisar o método dos *Principia* descrito no primeiro volume a partir de uma visão retrospectiva, partindo dos problemas, princípios e ferramentas da filosofia da ciência esboçados nesse capítulo, procurando por padrões e princípios gerais (ou candidatos a princípios gerais) que eventualmente orientem a prática científica ao longo do tempo, e permitam uma compreensão mais profunda do próprio empreendimento científico e da sua racionalidade.

Tendo em vista esses problemas gerais da filosofia da ciência, passemos agora a análise do método de Newton dessa perspectiva. Início com a apresentação dos estudos da tradição que seguiu a corrente descriptivista na análise específica do método de Newton, embora devemos estar cientes que a linha que separa o descriptivismo modesto e robusto de nem sempre é tão clara quanto pode transparecer à primeira vista. A seguir, entramos na apresentação do conjunto de estudos do método de Newton que aqui chamo de “tradição coheniana”.

16 A TRADIÇÃO COHENIANA E O MÉTODO DOS *PRINCIPIA*

Chamo aqui de “tradição coheniana” as interpretações do método de Newton que tiveram como ponto de partida a influente publicação de *Newtonian Revolution* (1980), de Isaac Bernard Cohen. A interpretação que Cohen denominou de “estilo newtoniano” (*Newtonian Style*) foi seguida, em maior ou menor medida, por George Smith, William Harper e Steffen Ducheyne, estabelecendo o estado da arte da historiografia newtoniana no que se refere ao tema do método nos últimos 30 anos.⁷⁸⁵ A seguir, apresento as principais teses e contribuições dessa tradição, logo após ofereço uma discussão sobre essas teses, ressaltando alguns problemas e críticas, para, por fim, apresentar uma alternativa interpretativa a essa tradição.

16.1 COHEM E O ESTILO NEWTONIANO

Os comentários e análises dos *Principia* tiveram início, evidentemente, muito antes de Cohen. A bem da verdade, essas análises começaram ainda com os contemporâneos e colaboradores de Newton, como Roger Cotes, David Gregory, entre outros. Continuaram nos séc. XVIII e XIX, com publicações voltadas para estudantes de matemática e filosofia natural, e entraram no século XX, com as interpretações mais críticas protagonizadas por Duhem, Lakatos, Feyrabend, Popper, Koyre e outros. Essas últimas análises, entretanto, foram relativamente superficiais. Esses filósofos estavam mais interessados numa visão panorâmica da ciência do que em detalhes de tratados específicos. Ainda assim, a conclusão da maioria deles sobre os *Principia* foi que Newton construiu efetivamente uma obra extraordinária, de impacto inegável, embora no campo particular da metodologia ele tenha sido um desastre.⁷⁸⁶ Foi somente no final do século XX, mais especificamente a partir do *Newtonian Revolution* de Cohen, que o *Principia* recebeu um foco diferenciado e uma análise mais detalhada.

Isaac Bernard Cohen é mais conhecido pela nova tradução comentada do *Principia* para a língua inglesa, publicada em 1999 em parceria com Anne Whitman. Mas foi na

⁷⁸⁵ As principais ideias de George Smith sobre o método de Newton estão resumidas em *The methodology of the Principia* (2002) e *The Newtonian Style in Book II of the Principia* (2001); As análises de Harper e Ducheyne estão sintetizadas nos seus livros *Isaac Newton's Scientific Method* (2011) e *The main Business of Natural Philosophy* (2012), respectivamente, sendo esses os estudos detalhados sobre a metodologia de Newton que tenho notícia.

⁷⁸⁶ Com efeito, chegou-se ao ponto mesmo de defender – como fez McMullin (2001) – que Newton produziu um “estrago” no campo da metodologia científica, com a sua ideia fixa de rejeição às hipóteses.

década de 1980 que a sua interpretação do método de Newton veio a público. No *Newtonian Revolution*, Cohen propôs uma interpretação acerca do modo como ocorrem as “mudanças científicas” no interior de uma revolução científica. Propôs essa interpretação, não obstante, por meio de um exemplo histórico: os *Principia* de Newton. À época, a obra de Thomas Kuhn sobre as revoluções científicas estava no auge dos debates em história e filosofia da ciência e, paralelamente ao estudo da “estrutura” dessas revoluções, pela análise panorâmica da história da ciência, Cohen propôs colocar uma *lente de aumento* no interior de uma dessas revoluções. Em particular, no interior da revolução que chamou de “newtoniana”. Nas palavras de Cohen, em vez de oferecer uma visão da “macroestrutura” das revoluções científicas – como era o caso da proposta por Kuhn – ele estava a oferecer uma visão da “microestrutura”, ou seja, uma visão microscópica do interior de uma revolução científica, evidenciando a natureza das transformações que ocorriam ao longo do seu desenvolvimento. É nesse contexto que Cohen investiga os *Principia* em mais detalhes, e propõe uma caracterização do método de Newton.

Partindo da sugestão dos seus antecessores, Cohen praticamente ignora as observações metodológicas de Newton e se concentra no que ele efetivamente fez no *Principia*. Dessa análise surge a sua conhecida caracterização do “estilo newtoniano”. O “estilo” de Newton poderia ser resumido em três elementos principais. Primeiro, Newton se utiliza de modelos matemáticos simplificados, ou, nas palavras de Cohen, “constructos ou sistemas matemáticos idealizados”. Trata-se de modelos matemáticos que são construídos de forma análoga a natureza, mas que tomam como ponto de partida condições mais simples que esta, o que poderia ser caracterizado por uma “idealização” das condições naturais – necessariamente muito mais complexas que as do modelo. O uso desses modelos é evidenciado já nas primeiras seções do Livro I do *Principia*, onde Cohen ressalta que não se cuida de um satélite percorrendo uma órbita em torno de um planeta, mas de um “ponto material” percorrendo uma trajetória em torno de um ponto fixo imaginário, num espaço e tempo absolutos, sem qualquer interferência ou resistência externa. O uso desses modelos matemáticos idealizados também encontra sustentação, segundo Cohen, no início da seção 11 do livro I, quando Newton afirma: “Até esse ponto estive estabelecendo os movimentos dos corpos atraídos em direção ao um centro imóvel; entretanto, dificilmente uma tal situação existe no mundo natural (...)”. O primeiro elemento do estilo newtoniano é, portanto, o uso de modelos matemáticos simplificados ou idealizados.

Em segundo lugar, o estilo newtoniano também é caracterizado por “aproximações sucessivas”. O modelo inicial é submetido a um processo de aproximações sucessivas que o faz se tornar gradativamente mais complexo à medida que as aproximações avançam e, em consequência, mais perto das efetivas condições da natureza. Cohen esclarece que os modelos do Livro I são, de início, “pontos materiais”, mas na seção 11, por exemplo, outros acidentes são acrescentados gradativamente, como a massa dos corpos, a interferência externa de um terceiro corpo e, por fim, um sistema de corpos interagindo entre si. O estilo newtoniano, portanto, caracteriza-se por essas aproximações sucessivas a partir do modelo inicial simplificado.

Em terceiro lugar, o estilo newtoniano é caracterizado pela maneira pela qual essas aproximações são realizadas. Depois de construir o primeiro modelo inicial simplificado análogo à natureza, Newton deduz consequências desse modelo e as compara à natureza. A partir das discrepâncias obtidas dessa comparação ele realiza adaptações no modelo, tornando-o um pouco mais próximo do sistema natural. Esse processo se repete algumas vezes e o modelo vai se tornando cada vez mais complexo. O estilo newtoniano poderia ser resumindo, por conseguinte, como um procedimento que envolve sucessivas aproximações de um modelo inicial idealizado, a partir de comparações das consequências dos modelos com a natureza. Cohen divide esse procedimento em três fases. Convém apresentar a síntese do próprio Cohen:

O estilo newtoniano tem três fases. A fase 1 geralmente começa com a natureza simplificada ou idealizada, levando a um constructo imaginativo no domínio matemático, um sistema no espaço geométrico no qual entidades matemáticas se movem num tempo matemático de acordo com certas condições que tendem a ser expressas como leis ou relações matemáticas. Consequências são deduzidas por meio de técnicas matemáticas e são transferidas para o mundo observável da natureza física no qual, pela fase 2, uma comparação e um contraste é feito com os dados experienciais e as leis e regras derivadas de tais dados. Isso geralmente leva a uma alteração do constructo ou sistema matemático original, ou uma nova fase 1, que por sua vez leva a uma nova fase 2. Então Newton começa com um ponto de massa num campo de força central (...) depois adiciona um segundo corpo interagindo mutuamente com o primeiro, e mais adiante ainda outros corpos (...). Eventualmente ele vai considerar também os tamanhos finitos dos corpos e suas formas e constituições específicas em vez de essencialmente pontos de massa (...). Na fase 3 Newton aplica o resultado obtido nas fases 1 e 2 à filosofia natural, de modo a elaborar o sistema do mundo.⁷⁸⁷

Como é possível depreender das palavras de Cohen, há ainda uma última etapa no estilo newtoniano que é a aplicação dos resultados das aproximações sucessivas na filosofia natural, com o objetivo de elaborar o sistema do mundo. É a “fase 3”, da síntese

⁷⁸⁷ Cohen, 1980, p.xii, xiii

de Cohen. Trata-se do momento em que Newton sai do domínio matemático e passa para o domínio da física. Essa etapa ressalta um ponto importante da abordagem de Newton que Cohen enfatiza diversas vezes na sua análise. A nítida separação entre o domínio matemático e o físico é que torna possível o estilo newtoniano. É a partir dessa distinção que ele pode construir o modelo matemático que pode ser aproximado por etapas sucessivas.

Cohen resumiu o estilo newtoniano de várias maneiras, em poucas palavras. Ele afirmou que se trata de “estágios sucessivos de aplicação da matemática a sistemas crescentemente mais complexos e gerais”⁷⁸⁸ ou “raciocínio imaginativo adicionado do uso de técnicas matemáticas aplicadas aos dados empíricos (...)”⁷⁸⁹. Para ele “a essência desse estilo foi a habilidade de separar o estudo das ciências exatas em duas partes: o desenvolvimento das consequências matemáticas de constructos ou sistemas imaginativos e a subsequente aplicação dos resultados derivados matematicamente para a explicação da realidade fenomenológica”.⁷⁹⁰ E destacou que o poder desse método está no fato que ele permite estudar as forças em relação a movimentos do mundo “sem qualquer consideração restritiva sobre tais forças poderem realmente existir (ou que realmente existam) na natureza”.⁷⁹¹ Acerca dessa última consideração, refere-se a uma consequência da distinção dos domínios matemático e físico. Uma vez que Newton distingue os domínios matemático e físico nitidamente, e retarda a entrada no domínio físico, ele fica livre para explorar as possibilidades do modelo matemático sem quaisquer restrições de natureza física.

A inspiração para denominar o método de Newton nos *Principia* de estilo newtoniano tem relação com a sua semelhança com o método de Galileu, designado por alguns comentadores de “estilo galileano” (*Galilean Style*). Segundo Cohen, assim como Newton, o filósofo italiano se utilizou fartamente de idealizações matemáticas, condições mais simples que a natureza. Por exemplo, nos seus estudos sobre a queda dos corpos, Galileu analisou o movimento sem considerar fatores complicadores como a resistência do ar, que para ele tornava a análise excessivamente complexa. Galileu, por conseguinte, partiu de condições mais simples que a natureza usando, também, uma espécie de modelos matemáticos simplificados, embora numa amplitude bem mais modesta que Newton. De

⁷⁸⁸ Ibid, p.141.

⁷⁸⁹ Ibid, p.62.

⁷⁹⁰ Ibid, p.xii.

⁷⁹¹ Ibid, p.xiii.

todo modo, a semelhança entre o método dos dois pensadores inspirou a referência oferecida por Cohen.

No que tange as principais teses do *Newtonian Revolution*, resta ainda ressaltar que talvez aquela de maior abrangência e desdobramentos históricos e filosóficos é a que defende que uma revolução na ciência foi gerada pelos *Principia* de Newton. Precisamente a revolução que originou a física-matemática que conhecemos hoje. Cohen propôs uma tese que diverge de uma parcela considerável de historiadores da ciência, que preferem localizar a origem da ciência física, tal como hoje a conhecemos, em personagens como Descartes, Galileu, Francis Bacon, Roger Bacon ou até Copérnico. Ele defendeu que os *Principia* de Newton deveria ser considerado como uma obra que promoveu uma revolução na ciência. E argumentou a favor dessa tese inicialmente a partir de evidências históricas: foram os sucessores imediatos de Newton, alguns dos grandes nomes da ciência do séc. XVIII, como Maupertuis, Clairaut, Lagrange, Laplace, e outros, que atribuíram aos *Principia* uma revolução. “É um fato histórico”, afirma Cohen, “que o tratado de Newton foi reconhecido como a primeira revolução na ciência”.⁷⁹² “O que contava para homens como Clairaut, Lagrange e Laplace”, continua ele, “era que Newton desenhara um modo de resolver problemas físicos e encaminhou uma direção que as ciências exatas têm seguido desde então”.⁷⁹³

Mas a tese de Cohen que uma revolução na ciência foi gerada pelos *Principia* não se apoiou, naturalmente, somente nos depoimentos dos sucessores imediatos de Newton no séc. XVIII. A investigação que o *Newtonian Revolution* se propôs a fazer teve o exato propósito de procurar o que poderia haver de revolucionário no tratado de Newton. E ao final dessa investigação Cohen concluiu que esse tratado gerou, efetivamente, uma revolução, e esta foi uma revolução, sobretudo, *metodológica*. De modo mais preciso, foi o “estilo newtoniano” que promoveu uma revolução na ciência. Essa percepção foi corroborada, inclusive, pelos sucessores de Newton. Cohen reitera que não é somente um “fato histórico” que os *Principia* foi reconhecido como revolucionário pelos sucessores de Newton; é um fato histórico “que esses cientistas dos sec. XVIII, que viram a revolução newtoniana na ciência, perceberam a revolução nos *Principia* e no estilo newtoniano (...)”.⁷⁹⁴ Resumindo, o que Cohen parece defender no seu livro é que Newton foi um dos precursores do uso de modelos matemáticos na ciência, e a maneira particular como ele

⁷⁹² Ibid, p.49.

⁷⁹³ Ibid, p.279.

⁷⁹⁴ Ibid, p.180.

aplicou esses modelos na filosofia natural – e ilustrou nos *Principia* – gerou uma revolução que fez nascer a ciência física-matemática atual.

A análise empreendida por Cohen sobre o estilo newtoniano tem, sem dúvida, muitos méritos. Talvez um dos maiores seja o de ter desbravado um dos mais difíceis tratados científicos da história da ciência e, além disso, apresentado um esboço coerente do método ali empregado. Mas é preciso ressaltar que, como qualquer trabalho pioneiro, naturalmente ficaram muitas lacunas e problemas interpretativos. Convém comentar, de modo preliminar, alguns deles.

Em primeiro lugar, Cohen praticamente ignora todas as observações de Newton sobre o método dos *Principia* na sua análise. E não é sem razão: o que Newton enfatiza em suas observações pouco – ou nada – se parece com a análise empreendida por Cohen. É certo que o historiador americano parte do pressuposto dos seus antecessores, que as palavras de Newton não devem ser levadas muito à sério. Mas ainda que isso fosse verdade, exige um certo esforço para acreditar que Newton seria tão ingênuo a ponto de não ter a mínima pista do que estava ele próprio fazendo. É possível defender que o matemático inglês era até certo ponto ingênuo quanto a questões metodológicas sem precisar necessariamente considerá-lo um total ignorante. Não obstante, a análise de Cohen não considera, e nem se aproxima, de qualquer das observações do próprio Newton.

Em segundo lugar, na análise de Cohen há uma tensão (para não dizer contradição) entre o aspecto “arbitrário” dos modelos matemáticos de Newton e a prerrogativa deles serem “análogos à natureza”. Em vários momentos do seu livro, Cohen enfatiza que Newton está trabalhando com modelos matemáticos “arbitrários”, com condições que nitidamente não se observam na natureza. Por outro lado, Cohen enfatiza em outros momentos que Newton lida com modelos “análogos a natureza”. É evidente que se são modelos arbitrários não podem ser análogos à natureza; e se são modelos análogos à natureza não podem ser arbitrários. E mesmo que Cohen considerasse à parte esses modelos arbitrários, e os julgasse, por exemplo, distintos de modelos “idealizados”, ainda assim resta a tensão desses modelos serem, ao mesmo tempo, “idealizados” e “análogos à natureza”. Se são modelos “idealizados”, no que exatamente são “análogos à natureza”? Se são “análogos à natureza”, no que exatamente são “idealizados”? Uma leitura cuidadosa do *Newtonian Revolution* revelará que Cohen não esclarece essa questão.⁷⁹⁵

⁷⁹⁵ Bechler (1982) e Ducheyne (2012) percebem igualmente esse problema.

Um terceiro problema na análise de Cohen do estilo newtoniano está relacionado aos aspectos empíricos do método de Newton, que são largamente desprezados. Embora Cohen admita que os aspectos empíricos têm algum papel nos *Principia*, ele passa longe de esclarecer qual seria. O mais próximo que ele chega disso é afirmar que as consequências dos modelos matemáticos são “comparadas com a natureza” e os desvios são considerados para ajustar o próximo modelo. Mas como essas comparações são feitas exatamente? Como esses “ajustes” são feitos? Seriam apenas nesses momentos que entrariam os aspectos empíricos? Parece claro que não, uma vez que o modelo inicial é supostamente “análogo à natureza”. Mas Cohen silencia sobre essas questões. E mais do que silenciar, ele chega mesmo a questionar o caráter empírico das leis do movimento, e que a *indução* tenha qualquer papel nos *Principia*.⁷⁹⁶ Em outras palavras, além de não esclarecer os aspectos empíricos do método, ele parece sugerir que ele é menos empírico do que Newton quer nos fazer acreditar. Nesse caso é inevitável a pergunta: porque, então, os *Principia* foi tão longe em explicar os fenômenos da natureza? Qual é o seu fundamento? Da mesma forma, Cohen não esclarece satisfatoriamente essas questões.

Um quarto problema com a análise oferecida por Cohen é o anacronismo. Ele se propõe a fazer uma análise do método dos *Principia* não nos termos do próprio Newton, ou nos termos do séc. XVII, mas da perspectiva contemporânea. É claro que não há problemas até aí. O problema é que ele parece impor ao método de Newton uma leitura excessivamente duhemianiana, que distorce a sua descrição. Cohen adota uma tese de “transformações dos conceitos científicos” muito semelhante às ideias de Duhem, e chega mesmo a enxergar nos *Principia* uma “primazia da matemática sobre os dados observacionais”⁷⁹⁷, com uma reminescência clara à “prioridade da teoria sobre os dados empíricos”⁷⁹⁸, a conhecida tese impregnacionista de Duhem. Aliás, é exatamente em razão dessa prioridade da teoria sobre os dados empíricos que Duhem precisa defender a sua tese das transformações das ideias e conceitos científicos. Além disso, a análise do método de Newton como “modelos matemáticos” também parece contaminada pela discussão sobre os “modelos científicos” (concepção semântica das teorias) que estava no auge na década de 1970, e continua ainda hoje.

Um quinto problema com a análise de Cohen é o fato dela ser abertamente *instrumentalista*. É difícil conciliar essa visão instrumentalista de “modelos matemáticos

⁷⁹⁶ Cohen, 1980, p.16.

⁷⁹⁷ Ibid, p.153.

⁷⁹⁸ Duhem, 1954.

idealizados” do estilo newtoniano com o professado *realismo* tanto de Newton quanto de Galileu em suas obras. Cohen afirma: “a matemática é exata e a natureza não é”.⁷⁹⁹ Mas é inegável o contraste que há dessa concepção com o prefácio à primeira edição aos *Principia*, em que Newton considera tanto a matemática quanto a mecânica e a natureza como exatos.⁸⁰⁰ A preferência de Newton pela *geometria mecânica* decorre do fato dela poder imitar precisamente a natureza. Na verdade, o próprio Cohen reconheceu esse problema em sua análise. Ele disse que “para Newton havia realmente uma possibilidade aberta para que a sua explicação da lei de Boyle realmente pudesse corresponder ao caso atual na natureza, e mesmo transcender o que entendemos por modelos”.⁸⁰¹

Um sexto problema com análise de Cohen é que o método denominado por ele de estilo newtoniano não se distingue, efetivamente, da abordagem *hipotético-dedutiva* (H-D). E sendo assim, não é possível falar nem em modelos que se aproximam gradativamente das condições da natureza, nem em qualquer revolução pelo estilo newtoniano. Não tendo esclarecido como (ou no que) o modelo inicial de Newton é análogo à natureza, o que resta à proposta de Cohen é um modelo matemático idealizado e *hipotético*. Bechler e Ducheyne já haviam chamado a atenção para o importante fato que, mesmo no modelo inicial (“one-body system”), Newton já parte da suposição de uma “força centrípeta”.⁸⁰² Não é pelo processo aproximativo descrito por Cohen que Newton chega ao resultado que há uma força central atuando nos satélites e planetas; ele inicia o processo aproximativo desse ponto. Isso significa que o método de Newton, no final das contas, é H-D. Ele parte de um modelo matemático *hipotético*, deduz consequências, e compara as consequências com a natureza. Isso é um problema, primeiro, porque significa que no final das contas o seu método não se distinguiria daquele de Galileu, Huygens e outros modernos. Eles também estavam trabalhando com elementos matemáticos e empíricos numa abordagem basicamente H-D. Na verdade, não apenas eles. Hooke, Boyle, Descartes e muitos outros estavam fazendo o mesmo. Em outras palavras, caso a abordagem de Newton nos *Principia* não se distinga essencialmente da abordagem dos modernos, Cohen falha em mostrar que houve efetivamente uma tal “revolução newtoniana”. Não seria correto afirmar que Newton produziu uma revolução metodológica com o seu “estilo”, uma revolução que deu origem à física-matemática atual. Penso que para mostrar claramente que uma revolução foi produzida pelos *Principia*

⁷⁹⁹ Ibid, p.92.

⁸⁰⁰ Veja o capítulo 3.do volume I.

⁸⁰¹ Ibid, p.105.

⁸⁰² Bechler, 1982, p.10; Ducheyne, 2012, p. 67.

é necessário não apenas estabelecer as transformações e impacto que ocorreram depois de Newton, ou com os outros cientistas que incorporaram o seu programa, mas mostrar igualmente, e de forma nítida, a diferença que havia entre a sua abordagem e a dos seus antecessores. Como a descrição de Cohen é basicamente H-D, ele fracassou em esclarecer essa última parte. Se Cohen estiver certo em sua descrição é muito difícil acreditar que uma revolução na ciência foi gerada pelos *Principia*; se de fato houve uma revolução na ciência gerada pelos *Principia* é muito difícil acreditar que a descrição de Cohen esteja certa.

Mas em segundo lugar, a abordagem de Newton ser basicamente H-D é um problema porque nesse caso a ideia de aproximações sucessivas que convergem gradativamente para as condições efetivas da natureza simplesmente não se sustenta. Devido o *problema da subdeterminação*, sempre se pode criar vários outros modelos alternativos tão bem adequados empiricamente quanto o anterior. E nesse caso, o que garante que qualquer desses modelos hipotéticos que se escolha vai convergir para o mesmo resultado? Todos os modelos alternativos apresentam igualmente discrepâncias ao serem comparados com a natureza. E todas as discrepâncias podem ser usadas para adaptar cada respectivo modelo. No final, continua-se sem uma indicação de qual é o modelo correto. Ao que parece, a menos que Cohen esclareça porque o modelo inicial é análogo à natureza, e *no que* é análogo (se é que é), a sua proposta não apresenta nada distinto de um tradicional uso de modelos matemáticos hipotéticos e instrumentais. Não há aproximações sucessivas em direção às condições efetivas da natureza. O que há são ajustes *ad hoc* dos modelos para manter a sua adequação empírica, o que a princípio poderia ser feito da mesma forma com qualquer outro modelo rival.

Embora Cohen não tenha explorado esses problemas e lacunas na sua interpretação, vários dos seus sucessores o fizeram. Em particular, George Smith continuou diretamente a proposta interpretativa do professor Cohen e ofereceu importantes contribuições que merecem aqui serem apresentadas. As suas contribuições enfretam o problema do modelo inicial hipotético e recolocam a possibilidade de uma efetiva revolução na ciência por meio do estilo newtoniano.

16.2 GEORGE SMITH E UM MÉTODO DISTINTO DO HIPOTÉTICO-DEDUTIVO

Apesar de todos os problemas, a proposta de Cohen do estilo newtoniano fez escola, e talvez a contribuição mais extensiva tenha sido oferecida George Smith no seu artigo *The methodology of the Principia*, publicado em 2002. A principal tese do artigo de Smith tem implicações profundas não apenas para a compreensão dos *Principia*, mas para a compreensão da própria ciência em geral. Smith defende que *o método de Newton nos Principia não é uma abordagem tipicamente hipotético-dedutiva*. As consequências mais imediatas dessa tese não são difíceis de perceber. Em primeiro lugar, a caracterização coheniana dos *Principia*, como uma abordagem por “aproximações sucessivas”, torna-se perfeitamente possível. Segundo, haveria uma diferença fundamental, afinal de contas, entre o método de Newton e dos seus antecessores. Em terceiro lugar – consequentemente – houve, de fato, uma revolução na ciência iniciada pelos *Principia*. Vale a pena, portanto, avaliar em mais detalhes a tese de Smith.

Diferentemente do seu predecessor, Smith não ignora as observações que Newton fez sobre o seu método. Ele inicia o seu artigo fazendo um inventário de todas os comentários metodológicos de Newton nos *Principia* e destaca uma passagem em particular, no escólio final da seção 11 do Livro I.⁸⁰³ Na conclusão desse escólio, ao esclarecer que lida somente com as “proporções matemáticas” das forças e não com as suas “qualidades físicas”, Newton faz um resumo da sua abordagem:

(...) a matemática exige uma investigação dessas quantidades das forças e suas proporções que se seguem de quaisquer condições que possam ser supostas. Em seguida, descendo para a Física, essas proporções devem ser comparadas com os fenômenos de modo a encontrar quais condições de força se aplicam para cada tipo de corpos atrativos. E então, finalmente, será possível argumentar de modo mais seguro sobre as espécies físicas, causas físicas, e proporções físicas dessas forças.⁸⁰⁴

Ao comparar essa descrição de Newton com a descrição oferecida por Huygens para o método da ciência, Smith mostra que o método dos *Principia*, ao menos pela descrição de Newton, não é H-D. O primeiro passo da sua abordagem é a investigação das quantidades e proporções matemáticas das forças. Inicia-se no “domínio matemático”, como Cohen já havia notado. Mas o importante aqui é perceber que essa investigação se dá pela análise dessas proporções a partir de “quaisquer condições que possam ser supostas”. Não somente a partir da condição que já se pressupõem no mundo, buscando posteriormente a confirmação dessa

⁸⁰³ Esse escólio é apresentado e analisado em detalhes no fim do APÊNDICE B.

⁸⁰⁴ CW, 588-589.

condição de forma hipotético-dedutiva. Newton investiga matematicamente uma variedade de “condições supostas” e, em seguida, compara, *todas elas*, com os fenômenos, a fim de determinar qual dentre elas é o caso. Apenas depois de se proceder com esses dois primeiros passos é que se poderia propor uma causa física para o fenômeno. A descrição apresentada por Newton no final da seção 11 não corresponde ao tradicional método H-D.

Mas seria essa uma diferença efetiva ou apenas retórica? Toda uma tradição de historiadores da ciência defendeu que as palavras de Newton sobre o seu método deveriam ser consideradas sob suspeita. Na sequência do artigo, Smith procura mostrar que Newton não apenas descreveu o seu método como distinto do H-D, como efetivamente procedeu de forma diversa desse método.

Smith percebeu o importante papel das proposições “arbitrárias” nos *Principia*. Essa importância pode ser notada em alguns corolários largamente ignorados nas proposições 2, 3 e 4 do Livro I. Na proposição 1 e 2, Newton demonstra a condição matemática da lei das áreas, dadas as leis do movimento. Se um corpo descreve áreas iguais em tempos iguais em relação ao um ponto de referência (ou seja, se possui *velocidade areal* constante), então ele está sendo impelido por uma força centrípeta, em direção a esse ponto, e conversamente. Um resultado por nós já conhecido. E isso vale para o espaço do ponto de referência estar em repouso ou movimento uniforme.⁸⁰⁵ Mas o que geralmente passa despercebido são os cor. 1 e 2 da proposição 2, que afirmam que um pequeno desvio na direção da força centrípeta em relação ao ponto de referência implicará não apenas na violação da lei das áreas, mas numa *aceleração areal*, ou, nas palavras de Newton, numa “descrição das áreas acelerada”, caso o desvio seja para um lado, ou “retardada”, caso o desvio seja para o outro.

Na prop. 3, Newton está lidando com a situação de um corpo *L* orbitando em torno de um corpo central *T* que não está em repouso, mas em movimento. Ele afirma que se o movimento do corpo *L* obedecer a lei das áreas, isso significa que ele está sob a ação de uma força centrípeta (exatamente da mesma maneira que ocorreria se o corpo *T* estivesse em repouso), adicionada do mesmo movimento do corpo *T*. Não interessa aqui discutir os detalhes dessa proposição, mas destacar os corolários 2 e 3, que declaram:

Corolário 2. Se as áreas forem proporcionais aos tempos *aproximadamente* (lit. *quamproxime*), a força remanescente tenderá em direção ao corpo *T* *aproximadamente* (lit. *quamproxime*).

⁸⁰⁵ Evidentemente, Newton está pensando nos corpos celestes aqui. Sendo o “ponto fixo” o Sol, esses resultados são válidos tanto para o Sol em repouso quanto em movimento, um ponto ainda controverso à época.

Corolário 3. E conversamente, se a força remanescente tender em direção ao corpo T *aproximadamente*, as áreas serão proporcionais ao tempo *aproximadamente*.⁸⁰⁶

Juntas, essas as proposições 2 e 3 estão a afirmar que se a descrição das áreas for constante, então há uma força centrípeta, e vice-versa. Se a descrição das áreas não for constante, não temos uma força centrípeta. E se a descrição das áreas for tal que não podemos saber se ela é *exatamente* constante, ou apenas *parece* ser constante mas não é, mesmo assim podemos saber que (1) há uma força pelo menos *aproximadamente* centrípeta atuando, e (2) há meios de determinar se ela é *exatamente* centrípeta, uma vez que um pequeno desvio para um lado ou outro implica numa descrição das áreas acelerada ou retardada, numa *velocidade areal* crescente ou decrescente, o que seria perfeitamente possível detectar, considerando-se um tempo suficientemente grande.

Smith ressalta que nesses corolários Newton está lidando com o problema da imprecisão dos dados empíricos. Newton sabia que a lei das áreas era baseada em observações astronômicas e, por mais diligentemente que fossem tomadas tais observações, elas careciam de exatidão. Os dados empíricos permitiam apenas admitir que os planetas obedeciam *aproximadamente* a lei das áreas. O mesmo se poderia afirmar sobre a lei harmônica. Disso decorre que não era possível aceitar como válidas para o mundo as deduções de uma hipótese que fosse compatível com esses dados empíricos, uma vez que sequer podemos conhecer *exatamente* esses dados. Ora, o que Newton está fazendo é, precisamente, tentar eliminar o *problema das hipóteses alternativas* (ou da *subdeterminação*): mesmo lidando com dados empíricos *matemáticos*, uma vez que esses dados não são exatos, sempre haverá um conjunto de hipóteses que são compatíveis com eles.⁸⁰⁷ Os corolários das prop. 2 e 3 acima nos mostram que não apenas Newton tinha consciência desse problema, como também procurou contorná-lo. Com efeito, Smith afirmou que “nada adiciona mais complexidade à metodologia de Newton do que a sua abordagem à inexatidão”.⁸⁰⁸

Mas como Newton lida com o problema da imprecisão dos dados empíricos? Como Newton contorna esse problema? Em primeiro lugar, ele explora teoricamente todas as variações possíveis que se aproximam das leis das áreas e dos períodos. Ele determina as condições matemáticas que geram todas essas variações. Nos corolários apresentados acima, Newton considera as condições e consequências tanto da força centrípeta *exatamente* direcionada para um determinado ponto, quanto as variações da direção da força nas

⁸⁰⁶ Ibid, p.448-449.

⁸⁰⁷ Smith não discute o problema da subdeterminação explicitamente em seu artigo. Isso será feito somente por Harper, seguindo as análises de Smith.

⁸⁰⁸ Smith, 2002, p.147.

vizinhanças desse ponto. Com razão, o leitor atento poderá questionar como Newton poderia obter “todas” essas variações uma vez que, do ponto de vista matemático, elas seriam infinitas. Mas é preciso notar que Newton está à procura de formulações gerais. Quando ele entra na proposição seguinte, a prop. 4, esse objetivo fica mais claro. Nessa proposição Newton demonstra que a condição matemática da *lei dos períodos* é uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância. Mas ele não para nesse ponto. Ele avança para determinar uma formulação geral para qualquer lei periódica de uma potência arbitrária n da distância; em outros termos, uma formulação geral de uma lei periódica arbitrária. No corolário 7, ele afirma:

E universalmente, se o tempo periódico está para qualquer potência R^n do raio R , e, portanto, a velocidade está para a razão inversa da potência R^{n-1} do raio, a força centrípeta estará para razão inversa da potência R^{2n-1} do raio, e conversamente.⁸⁰⁹

A generalidade da formulação do corolário 7 aumenta ainda mais no corolário 8, onde ele afirma a validade do cor. 7, e dos anteriores, para casos em que os corpos descrevem uma trajetória fechada “qualquer”, mesmo não regular. Por meio desses corolários, Newton está abarcando todas as possibilidades de movimentos periódicos possíveis semelhantes a aqueles constatados pelas observações astronômicas, e verificando as condições e consequências de tais movimentos.

Mas ele ainda não para nesse ponto. No corolário acima, o expoente n da formulação geral é um número inteiro. Não inclui possíveis expoentes próximos de 2 que não sejam números inteiros. Em vista disso, Newton aprofunda sua exploração teórica para considerar, na prop. 45, expoentes fracionários na vizinhança de 2. Ele conclui que se a força centrípeta for proporcional ao inverso da distância elevada a uma potência não *exatamente* igual a 2, mas muito próxima disso, ocorrerá uma leve precessão na órbita, mas o movimento obedecerá a lei harmônica *aproximadamente*. Em outros termos, Newton mostra com essas proposições que se a lei harmônica se observa *aproximadamente*, segue-se que há uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância *aproximadamente*. Juntamente com as prop. 2 e 3, esses resultados informam que se um movimento observa a lei das áreas e dos períodos *aproximadamente*, então há uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância *aproximadamente*. Resumindo:

$$LA_{\sim} \text{ e } LP_{\sim} \leftrightarrow F_{\sim c} \propto \frac{1}{D_{\sim}^2}$$

⁸⁰⁹ CW, p.451.

Onde $LA_{\sim}$ e $LP_{\sim}$ é a *Lei das Áreas* e *Lei dos Períodos* aproximadas, respectivamente.

Um leitor desatento do artigo de Smith poderia pensar que ele está defendendo que Newton propôs uma lógica um tanto estranha aqui. Uma vez que LA e $LP \leftrightarrow F_c \propto 1/D^2$, então $LA_{\sim}$ e $LP_{\sim} \leftrightarrow F_{\sim c} \propto 1/D^{\sim 2}$. É evidente que, do ponto de vista lógico, uma coisa não se segue da outra. Tal inferência não é válida. Mas não é isso que Smith está propondo. Newton deduziu as consequências de *todas* as variações de possíveis imprecisões na vizinhança das leis das áreas e períodos e constatou que, qualquer que seja o caso, $LA_{\sim}$ e $LP_{\sim} \leftrightarrow F_{\sim c} \propto 1/D^{\sim 2}$. Esse resultado, contudo, não permitem a Newton contornar o problema da imprecisão dos dados empíricos. Ele apenas trocou uma imprecisão por outra. Dizer que há uma força centrípeta direcionada aproximadamente a um determinado ponto, e inversamente proporcional ao inverso da distância elevada a uma potência aproximadamente igual a 2 termina por não resolver nada, uma vez que persiste ainda um conjunto infindáveis de hipóteses matemáticas possíveis. É por isso que importa reforçar que tanto na prop. 2 quanto na prop. 45, Newton deduziu consequências adicionais que tem um papel fundamental para essa problemática: se a força centrípeta for direcionada quase para um determinado ponto fixo, mas não exatamente, haverá um fenômeno acessório, a saber, uma *aceleração* na descrição das áreas ao longo do tempo; da mesma forma, se essa força centrípeta for proporcional ao inverso da distância elevada a uma potência muito próxima de 2, mas não exatamente igual a 2, haverá também um fenômeno acessório, a saber, a *precessão* da órbita. Esses “fenômenos acessórios” são imprescindíveis para o argumento de Newton, e para que ele seja capaz de contornar o problema da imprecisão dos dados empíricos.

A prop. 45 prediz a necessidade de um *fenômeno adicional* ocorrer caso a lei de força não seja *exatamente* proporcional ao inverso do quadrado da distância. A prop. 2 também prediz a necessidade de um *fenômeno adicional* caso a força centrípeta não seja *exatamente* direcionada a determinado ponto. E o mais importante: as referidas proposições predizem a necessidade de fenômenos plenamente *detectáveis empiricamente*, uma vez que a mobilidade ou imobilidade dos afélios dos planetas e satélites era um dado de fácil constatação, principalmente se levando em conta muitas revoluções, e as tabelas de observações astronômicas que já registravam essas posições desde séculos passados; além disso, uma descrição das áreas acelerada também seria facilmente detectável levando em consideração os dados astronômicos num espaço de tempo mais longo. Com base nesses fenômenos adicionais – ou *fenômenos cruciais* – Newton formulou o seu argumento. Embora Smith não tenha apresentado esses pontos exatamente dessa forma em seu artigo, penso que os

desenvolvimentos apresentados resumem bem a ideia geral até aqui. Do mesmo modo, Smith não apresenta a síntese do argumento de Newton que apresento a seguir, mas penso que será uma ferramenta bastante útil para a compreensão geral:

1. Se um corpo se move numa trajetória obedecendo a *lei das áreas* em relação a um centro *exatamente*, então ele está sujeito a uma força centrípeta direcionada a esse ponto *exatamente*, e vice-versa.
2. Se um corpo se move numa trajetória obedecendo a *lei das áreas* em relação a um centro *aproximadamente*, então ele está sujeito a uma força centrípeta direcionada a esse ponto *aproximadamente*, e vice-versa.
3. Se os corpos de um sistema se movem obedecendo a *lei dos períodos* em relação a um centro *exatamente*, então estão sujeitos a uma força $F_C \propto 1/D^2$ *exatamente*, e vice-versa.
4. Se os corpos de um sistema se movem numa trajetória obedecendo a *lei dos períodos* em relação a um centro *aproximadamente*, então estão sujeitos a uma força $F_C \propto 1/D^2$ *aproximadamente*, e vice-versa.
5. Pelos dados empíricos, os planetas primários são corpos de um sistema que movem em órbitas fechadas obedecendo a lei das áreas e dos períodos em relação ao Sol *exatamente*, ou, ao menos, *aproximadamente*.
6. Logo, os planetas estão sujeitos a uma força $F_C \propto 1/D^2$ *exatamente* ou *aproximadamente*.

Esta é a primeira parte do argumento. Newton chega à conclusão precisa de que os planetas estão sujeitos a uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância, pelo menos aproximadamente. Mas como é possível perceber, isso não é suficiente para estabelecer qual é exatamente a lei de força que opera na natureza. Então o argumento prossegue:

7. Se um corpo se movendo numa trajetória está sujeito a uma força centrípeta direcionada para um ponto ligeiramente diferente do ponto de referência (uma força *aproximadamente* centrípeta), então a descrição das áreas será acelerada.

8. Se um corpo de um sistema está se movendo numa órbita fechada sujeito a uma força centrípeta proporcional ao inverso da distância elevada a uma potência aproximadamente igual a 2, mas não exatamente, então haverá uma precessão da órbita.
9. Pelos dados empíricos, as áreas descritas pelos planetas primários em relação ao centro do Sol não apresentam qualquer aceleração ao longo do tempo. [fenômeno crucial].
10. Pelos dados empíricos, os afélios planetários não se movem em relação ao Sol, portanto não há precessão das órbitas dos planetas. [fenômeno crucial]
11. Logo, os planetas estão sujeitos a uma força *exatamente* centrípeta e *exatamente* proporcional ao inverso do quadrado.

Em símbolos:

- 1) $LA \text{ e } LP \leftrightarrow F_c \propto 1/D^2 \leftrightarrow \text{órbita sem precessão}$
- 2) $LA_{\sim} \text{ e } LP_{\sim} \leftrightarrow F_{\sim c} \propto 1/D^{\sim 2}$
- 2) $LA_{\sim} \leftrightarrow F_{\sim c} \leftrightarrow \text{aceleração areal}$
- 3) $LP_{\sim} \leftrightarrow F_c \propto 1/D^{\sim 2} \leftrightarrow \text{precessão da órbita}$
- 4) Pelos dados empíricos, observa-se $LA_{\sim}$, $LP_{\sim}$ e órbitas sem precessão.
- 5) Logo $F_c \propto 1/D^2$

Newton contorna o problema da imprecisão dos dados empíricos. Com o auxílio dos corolários geralmente esquecidos das prop. 2, 3 e 4, e com os dois *fenômenos cruciais* apresentados acima, ele foi capaz de deduzir *exatamente* a lei de força que ocorre no caso planetário. A considerar que as leis do movimento são empíricas, o resultado do argumento exposto acima deve ser admitido como rigorosamente empírico, ou rigorosamente deduzido dos fenômenos, diferindo, portanto, de uma *hipótese*.

Diante do argumento exposto acima, percebe-se que há um importante processo empírico *antes* de iniciar a sequência de aproximações sucessivas sugerida por Cohen. Smith procurou esclarecer esse processo em seu artigo, e abstrair a sua essência. Ele conclui que o argumento de Newton se sustenta em três pilares fundamentais: (1) “medições mediadas por teoria”; Newton utilizou-se fartamente de teorias que o permitem obter dados mais precisos e estáveis, indispensáveis para estabelecer as premissas empíricas acima; (2) “convergência de resultados”; Newton sempre busca resultados convergentes, ou medições convergentes, como

forma de trazer mais segurança para os dados e resultados que está lidando; e (3) “experimentos cruciais”; a busca de fenômenos e experiências que sejam decisivos, ou que sejam capazes de dar uma resposta definitiva para duas ou mais possibilidades consideradas. Para Smith, são esses elementos que permitem a Newton contornar o *problema das hipóteses alternativas* e prosseguir para um processo de aproximações sucessivas com a garantia que este convergirá para as condições da própria natureza.

Esclarecida a tese de Smith, convém agora retirar algumas implicações para os problemas do estilo newtoniano de Cohen, que foram levantados na seção anterior. Em primeiro lugar, a compreensão de Smith resolve a lacuna do papel dos “aspectos empíricos” na interpretação de Cohen. A força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância do primeiro modelo de Cohen (*one-body system*) tem por base um resultado rigorosamente empírico, como foi reforçado acima. Em segundo lugar, a tensão entre o uso de modelos “arbitrários” e a ideia de serem modelos “análogos a natureza” também é resolvida. Smith mostra que o papel desses modelos aparentemente arbitrários é justamente construir uma formulação geral que permite a Newton contornar o problema da imprecisão dos dados empíricos, e definir qual é o modelo que efetivamente pode ser considerado análogo à natureza. A variação mais fraca desse problema, dos modelos serem, ao mesmo tempo, “idealizados” e “análogos à natureza” também é resolvida. A questão era saber o que exatamente é idealizado nos modelos, e o que é análogo na natureza. Cohen não esclarece, mas Smith mostra que a lei de força obtida não é uma idealização ou simplificação. Ela garante a analogia, embora outros acidentes possam ser simplificados. Ducheyne vai chamar esse modelo de “isonomológico”: embora seja simplificado, a lei de força encontrada deve ser considerada a mesma que opera na natureza, pelo menos de forma aproximada.⁸¹⁰ Em terceiro lugar, a compreensão de Smith não conduz a uma visão essencialmente *instrumentalista* dos *Principia*, principalmente no que se refere às “forças”. Diferentemente de Cohen, que foi reticente a esse respeito, para Smith não há dúvidas que as forças nos *Principia* têm conteúdo real. O fato delas serem caracterizadas apenas como proporções matemáticas não significa que elas carecem de conteúdo real. Elas são *abstrações*. Elas são físicas e matemáticas. Isso fica claro a partir do argumento de Newton sintetizado acima. Elas são obtidas rigorosamente a partir das leis do movimento e dos fenômenos astronômicos, tanto aqueles explicitamente elencados por Newton quanto aqueles que aqui chamei de “fenômenos cruciais”. Assim, não há conflito entre o procedimento de Newton nos *Principia* e as suas crenças e tendências

⁸¹⁰ Ducheyne, 2012, p.80.

realistas. Em quarto lugar, e mais importante, a compreensão de Smith resolve o problema do estilo newtoniano, no final das contas, não se distinguindo do método H-D dos seus antecessores e contemporâneos. Ele mostra que os argumentos de Galileu e Huygens eram do tipo “*When-then*”, diferentes dos argumentos de Newton, que poderiam ser considerados do tipo “*If-then*”; ou seja, eles estavam trabalhando somente com a descrição matemática de fenômenos específicos (como a queda dos corpos), enquanto o Newton estava construindo uma teoria geral das forças e movimentos. Mas além disso, o método de Newton não é H-D, como o dos seus antecessores. Naturalmente, esse ponto também esclarece que o processo de aproximações sucessivas é, sim, possível.

Estabelecidos os detalhes e implicações desse processo inicial que antecede as aproximações sucessivas, cabe agora algumas palavras sobre os esclarecimentos de Smith acerca do próprio processo de aproximações. Mais especificamente, cabe esclarecer melhor o papel dos “desvios”, ou das “discrepâncias” nas aproximações sucessivas, para Smith. Uma vez que a lei de força encontrada é rigorosamente empírica, e corresponde de modo preciso ao caso da natureza, Newton pode construir um modelo provisório do movimento com base nessa lei. As consequências deduzidas desse modelo, evidentemente, apresentarão algumas discrepâncias quando comparadas com a natureza, não porque a lei força esteja errada, mas porque faltam elementos no modelo, e simplificações foram feitas em muitos dos seus elementos. Com efeito, as próprias simplificações podem ser entendidas como ausência de elementos que estão sendo ignorados no sistema. Assim, as discrepâncias são *informativas* no que se refere a esses elementos ausentes. Por exemplo, a discrepância do movimento da Lua, que apresenta uma leve precessão na sua órbita é entendida por Newton como a indicação de que há uma força adicional – no caso, do Sol – que passa a ser acrescentada no modelo. O modelo passa a ter dois corpos (“*two-body system*”). Na seção 11 acrescenta-se outros corpos e forças, além de massas e outros acidentes. O importante nesse processo é que o novo modelo mais exato deve resgatar, ao mesmo tempo, o sucesso empírico do modelo anterior, e explicar parte das suas discrepâncias remanescentes. É o que se observa na transição do modelo de corpo único para o modelo de dois corpos: a lei do inverso quadrado permanece a mesma – todo o sucesso empírico dessa lei permanece intacto – porém, o novo modelo agora também explica as discrepâncias do movimento da lua. Além disso, o novo modelo pode inclusive prever novos fenômenos. No caso do modelo de vários corpos da seção 11, todo o sucesso empírico dos modelos anteriores é mantido e, além disso, discrepâncias remanescentes são explicadas e novos fenômenos são previstos, como por exemplo, a perturbação nas órbitas de Júpiter e Saturno.

Smith entende que o processo acima é uma das características mais fundamental do método de Newton. Ele é capaz de transformar as próprias discrepâncias em evidência. Uma vez que o modelo anterior é pelo menos aproximadamente verdadeiro, os desvios das consequências desse modelo se tornam a evidência principal para o estabelecimento do próximo modelo, que além de resgatar o sucesso do anterior também explica algumas de suas discrepâncias. Smith caracterizou esse método como um processo de “transformar dados em evidência”, um dos elementos mais fundamentais do estilo newtoniano. Esse processo prosseguiu ao longo do Livro III, por exemplo, onde Newton continuou aperfeiçoando os modelos dos movimentos da Lua, da forma da Terra, dos cometas, e assim por diante. Smith destaca, ainda, que os próprios sucessores de Newton no séc. XVIII seguiram usando as discrepâncias para dar andamento ao processo de aproximações sucessivas, oferecendo gradativamente modelos mais complexos e próximos da natureza. Além disso – e mais surpreendente – ele sugere que o próprio Einstein, na formulação da teoria da relatividade geral, seguiu esse procedimento ilustrado por Newton.

Na época de Einstein, era bem conhecida a discrepância da órbita de Mercúrio. Mercúrio apresentava uma pequeníssima precessão em sua órbita, tendo o seu periélio avançando de 5700 arcos de segundo por século, ou seja 1,58 grau por século. Apenas para efeito de comparação, a precessão da órbita da Lua era cerca de 3 graus por revolução, ou seja, 3 graus a cada 27 dias, enquanto que a precessão de Mercúrio era menos de 2 graus a cada 100 anos. Foi natural os astrônomos da época de Newton não terem conhecimento dessa precessão. Mas as gerações seguintes a perceberam, assim como outras precessões, e resolveram cada uma dessas discrepâncias pela própria teoria da gravitação, uma vez que cada um desses desvios indicava uma nova força adicional que deixara de ser considerada. No entanto, mesmo com os modelos de Newton sendo aperfeiçoados por décadas de estudos, permaneceu em aberto uma diferença de 43 arcos de segundo ($0,011^\circ$) de precessão extra na órbita de Mercúrio, que não pôde ser explicada por nenhuma perturbação newtoniana. Depois de várias tentativas fracassadas de solucionar essa discrepância, Einstein propôs a teoria da relatividade geral que, ao mesmo tempo, recuperou todo sucesso empírico da teoria da gravitação e explicou a discrepância do periélio de mercúrio. Para Smith, portanto, a própria transição da gravitação universal para a relatividade geral se dá nos mesmos termos do programa iniciado por Newton.

Smith não aprofunda mais na sugestão dessa continuidade entre a gravitação universal e a relatividade geral. Contudo, esse exemplo é suficiente para ilustrar a essência do método proposto por Newton, e para sugerir a sua continuidade nos séculos que se seguiram. Em

suma, essas considerações mostram que o método de Newton nos *Principia* produziu, realmente, uma revolução na ciência. Ele relacionou os aspectos empíricos e matemáticos de tal modo que conseguiu contornar o problema da imprecisão dos dados empíricos e assim superar as deficiências da confirmação H-D. A partir daí pôde propor um modo de abordagem para o estudo da natureza em que as discrepâncias se tornam uma fonte fundamental de evidência, e levam a um aumento gradual na complexidade dos modelos, tornando-os cada vez mais exatos. Em razão do papel capital que os elementos empíricos têm nesse método, Smith propôs que a articulação de Newton fez nascer o que conhecemos hoje como “ciência empírica”. Houve, realmente, uma revolução newtoniana, e dessa revolução emergiu a “ciência empírica” atual.

Em resumo, Smith promoveu um surpreendente *upgrade* na compreensão do estilo newtoniano de Cohen. Suas análises resolveram diversos problemas e lacunas da análise do seu ilustre antecessor. No entanto, ele propôs tudo isso num artigo de cerca de 30 páginas. Vários temas e propostas de Smith foram apenas esboçadas nessas páginas. Foram os trabalhos de William L. Harper e Steffen Ducheyne, em *Isaac Newton's Scientific Method: turning data into evidence* (2011) e *The main business of natural philosophy: Isaac Newton's Natural-Philosophical Methodology* (2012) respectivamente, que aprofundaram e desenvolveram as teses de Smith. Vale concluir essa análise da tradição coheninana com a apresentação dessas duas recentes obras sobre a metodologia newtoniana.

16.3 HARPER, DUCHEYNE E UM MÉTODO MAIS SOFISTICADO QUE O H-D PADRÃO

Mesmo partindo de tradições interpretativas bastante distintas, Harper e Ducheyne basicamente procuraram desenvolver a promissora tese de Smith de que a abordagem de Newton é mais rica que o método hipotético-dedutivo. Especificamente, ambos procuraram esclarecer no que, exatamente, o método de Newton nos *Principia* se distingue do método H-D padrão. Começamos comentando o livro de Harper.

O livro de Harper é praticamente uma versão mais elaborada e aprofundada do artigo de Smith. De outra forma, o artigo de Smith é praticamente um esboço do livro de Harper. Percebe-se já pelo título: *Isaac Newton's Scientific Method, Turning Data Into Evidence on Gravity and Cosmology*. A expressão “turning data into evidence” é de Smith, e Harper faz questão de introduzi-la já no título do seu texto. Logo de início, Harper afirma que o rico método de “transformar dados em evidência foi central para a transformação da filosofia

natural em ciência natural, e continua informando o método da ciência até hoje”.⁸¹¹ Na sequência do livro ele vai aprofundar e detalhar as principais teses do artigo de Smith. Mas não só isso. O trabalho de Harper é um dos mais detalhados estudos dos *Principia* que tenho notícia. Ele segue o roteiro das primeiras proposições do Livro III, mas considerando todos os seus apêndices, a obra discute em detalhes quase todo o tratado de Newton. Além disso, o livro de Harper se propõe a analisar o método de Newton em aberta interlocução com a filosofia da ciência contemporânea – diferente de Smith, que restringiu a análise, na maior parte, aos interlocutores de Newton no século XVII.

Harper defende que uma das principais diferenças entre o método de Newton nos *Principia* e o método H-D padrão é que o primeiro tem um “ideal de sucesso empírico” mais rico que o segundo.⁸¹² Ele argumenta que, diferente da abordagem H-D convencional, a exigência de sucesso do método de Newton não é apenas a *predição* de fenômenos; é a predição dos *parâmetros matemáticos* dos fenômenos – que podem ser obtidos por “medições mediadas por teoria”, nos termos que Smith havia sugerido. Nas palavras de Harper, “esse ideal mais rico de sucesso empírico exige (...) uma *medição* precisa dos parâmetros pelo fenômeno predito”.⁸¹³ Um exemplo conveniente seria a hipótese dos vórtices em comparação com a hipótese da atração interplanetária. A consequência da hipótese dos vórtices é o movimento dos planetas em torno de um centro, num determinado plano. Os fenômenos astronômicos revelam os satélites e planetas em movimentos orbitais em torno de centros e aparentemente num determinado plano. Ou seja, a hipótese dos vórtices prediz o fenômeno que se propõe a explicar, qual seja, o movimento dos corpos celestes. Já no caso da atração, as consequências dessa hipótese é o movimento dos planetas e satélites em torno de determinados centros, obedecendo as regularidades matemáticas da lei das áreas e dos períodos. Medindo-se parâmetros matemáticos dos fenômenos é possível perceber que eles obedecem aproximadamente a lei das áreas e dos períodos. Em outros termos, a hipótese da atração não apenas é capaz de predizer precisamente os fenômenos, mas parâmetros matemáticos específicos desses fenômenos.

O ideal de sucesso empírico do método de Newton também é mais rico que o do método H-D padrão pelo uso do que Harper chama de “dependências sistemáticas”. Trata-se do uso das “formulações gerais” arbitrárias que Smith mostrou servirem para contornar o

⁸¹¹ Harper, 2011, p.1.

⁸¹² O que Harper chama de “método H-D básico”, ou “método H-D padrão”, é, segundo ele, a versão mais sofisticada do método H-D, que é a *bayesiana*. Relembrando, é a concepção que defende que a corroboração de uma hipótese pelo método H-D indica ao menos uma maior probabilidade de uma hipótese estar correta.

⁸¹³ Ibid, p.37. Grifo meu.

problema da imprecisão dos dados empíricos. Harper chamou essas formulações gerais de “dependências sistemáticas”, pois Newton não estaria somente demonstrando uma única dependência entre a força centrípeta e a lei das áreas, ou uma única dependência entre a lei do inverso do quadrado da distância e a lei dos períodos, mas um conjunto de “dependências sistemáticas” entre a *velocidade areal* e a direção da força central, e entre a órbita de um corpo em movimento periódico e a relação do período e raio da órbita. Harper exemplifica:

Considere a inferência de Newton para uma direção centrípeta da força mantendo um planeta na sua órbita a partir da sua descrição uniforme das áreas com referência ao centro do Sol. De acordo com a proposição 1 dos *Principia*, Livro I, se a direção da força é em direção ao centro do planeta, então o planeta se moverá num plano de tal maneira que a descrição das áreas será uniforme. Se a sua inferência fosse hipotético-dedutiva isso bastaria. A proposição 1 mostra que a força centrípeta prediz o fenômeno da lei das áreas. Portanto, a hipótese que a força mantendo um corpo em órbita é direcionada para o centro é confirmada pela adequação da lei das áreas aos dados. Mas Newton cita a proposição 2 do Livro I, que fornece a condicional conversas que se a descrição das áreas é uniforme então a força é centrípeta (...). Ele provou, além disso, os corolários que [afirmam que] se a taxa areal está aumentando, a força está descentralizada para frente, e se taxa areal está decrescendo, a força está descentralizada na direção oposta. Tomados em conjunto esses resultados mostram que o comportamento da taxa de variação com a qual as áreas são varridas a partir do centro dependem sistematicamente da direção da força mantendo um corpo em movimento orbital com respeito a esse centro. (...) Essas inferências de Newton são muito mais robustas do que as inferências hipotético-dedutivas correspondentes.⁸¹⁴

Os três critérios do método de Newton listados por Harper acima – a previsão de parâmetros matemáticos dos fenômenos, a convergência de medições mediadas por teoria, e o uso de dependências sistemáticas – revelam que o método de Newton nos *Principia* é mais rico o método H-D, ainda que considerado na sua versão mais sofisticada, probabilística (bayesiana).

Depois de esclarecer essas diferenças entre as exigências de sucesso empírico do método de Newton e do método H-D convencional, Harper também retira algumas consequências dessas diferenças, e aprofunda em outras teses de Smith, como uso das discrepâncias como evidência, e a transição não-revolucionária da gravitação para a relatividade geral. Acerca dessa última tese, ele fornece um rico panorama do problema do periélio de Mercúrio e das tentativas de solução desse problema, e procura mostrar como Einstein usou os próprios critérios do programa metodológico newtoniano para sustentar a sua teoria. Mais exatamente, Harper procura mostrar que, contrariamente à sugestão de uma *revolução* na transição da teoria de Newton para Einstein, popularizada pelo mais famoso livro de Thomas Kuhn, a mudança radical para a relatividade geral “está de acordo com os

⁸¹⁴ Ibid, p.37-38.

procedimentos avaliativos da própria metodologia de Newton”.⁸¹⁵ A partir do chamado “limite newtoniano”, a teoria da relatividade “recupera todo o sucesso empírico da teoria de Newton”, incluindo as “medições convergentes dos parâmetros” e, além disso, explica a discrepância do periélio de Mercúrio. “A relatividade geral”, afirma Harper, “faz melhor que a teoria de Newton nos próprios critérios de sucesso empírico de Newton”.⁸¹⁶ Ele afirma ainda que a sua revisão do problema do periélio de Mercúrio “sugere que o método científico de Newton informa a transformação teórica para a teoria de Einstein e também continua a informar o desenvolvimento e aplicação da estrutura de testes do sistema solar para as teorias relativísticas da gravitação ainda hoje”.⁸¹⁷

Uma consequência natural que Harper retira da análise que faz da transição da gravitação para a relatividade, bem como da continuidade dos critérios de Newton nas pesquisas recentes em cosmologia, é uma visão continuísta do progresso científico, com a qual ele encaminha a conclusão do seu livro. Ele defende que Kuhn não era um anti-progressivista, como muitos historiadores e filósofos da ciência parecem acreditar, e que o método de aproximações sucessivas de Newton exemplifica bem a caracterização do progresso científico do historiador da ciência estadunidense, que defendeu um “processo de evolução” da ciência por meio de “sucessivos estágios caracterizados por um detalhamento e refinamento no entendimento da natureza cada vez maior”.⁸¹⁸ Sem dúvida, essa visão kuhniana de progresso científico se aproxima da visão que emerge da compreensão da metodologia dos *Principia*. Mas vale dizer que na mesma passagem que Kuhn apresenta essa visão, ele faz a ressalva que não está se comprometendo com um “processo de evolução *em direção* a alguma coisa”.⁸¹⁹ É nesse sentido que Harper enfatiza que a visão de progresso que emerge do método dos *Principia* não é necessariamente equivalente à leitura que Laplace faz desse método, propondo a ideia de uma “teoria de tudo”, o que pressupõe, naturalmente, que o progresso científico é “em direção a alguma coisa”. Harper afasta a necessidade dessa associação de progresso científico com uma “teoria laplaciana de tudo”, que já se demonstrou problemática, principalmente na relação da relatividade com a teoria quântica. Além disso, ele também procura afastar as críticas de Laudan à tese do *realismo convergente* (aproximações sucessivas em direção às condições da natureza), argumentando que tal crítica toma como

⁸¹⁵ Ibid, p. 381.

⁸¹⁶ Ibid, p. 381.

⁸¹⁷ Ibid, p.384-385.

⁸¹⁸ Ibid.

⁸¹⁹ Ibid.

ponto de partida o modelo H-D convencional. A crítica de Laudan é enfraquecida em face da abordagem de Newton, que não é equivalente ao modelo H-D.

Naturalmente, o rápido esboço acima não faz justiça às ricas discussões de Harper no livro, mas é suficiente para mostrar as suas contribuições à tradição coheniana da análise do método de Newton. Resta, agora, apresentar as contribuições do filósofo belga Steffen Ducheyne.

O livro de Ducheyne – *The main bussiness of Natural Philosophy* – é composto, como já disse, a partir de uma tradição de pesquisa bem distinta de Harper, além de ter um escopo mais amplo que o seu antecessor. Enquanto Harper propõe uma análise do método dos *Principia* abertamente do ponto de vista da filosofia da ciência (descritivismo robusto), Ducheyne propõe uma análise mais histórica, nos próprios termos de Newton, ou melhor, nos termos da época do próprio Newton (descritivismo modesto). Assim, ao passo que Harper se propõe a analisar o “método científico” de Newton (uma expressão claramente estranha ao séc. XVII), Ducheyne se propõe a analisar a “metodologia da filosofia natural” de Newton. Além disso, enquanto Harper foca no método dos *Principia* somente, Ducheyne analisa o método dos *Principia* e da *Óptica*, levando em consideração também os escritos teológicos e alquímicos de Newton, além dos seus manuscritos. Em suma, o escopo da análise do filósofo belga é bem mais amplo que o de Harper.

No que se refere especificamente ao método dos *Principia*, percebo três grandes contribuições do livro de Ducheyne. Em primeiro lugar, ele mostra de modo convincente a influência da filosofia natural aristotélica no método de Newton. Mais exatamente, ele mostra a influência da tradição aristotélica de lógica e método nos objetivos e procedimentos de Newton. Esse ponto merece destaque principalmente porque em geral se destacam *as diferenças* entre a abordagem dos modernos e a tradição aristotélica, e não as semelhanças. Por meio de uma análise cuidadosa da biblioteca de Newton e das suas anotações de estudos, Ducheyne mostrou que as noções de “causa”, “análise e síntese”, “hierarquia das causas”, “ordem do conhecimento e ordem da natureza”, dessa tradição estão pressupostas na fundamentação do método de Newton e muitas delas são declaradas explicitamente pelo matemático inglês. Certamente, o método de Newton pode ser melhor elucidado por meio da compreensão dessa tradição. No entanto, penso que Ducheyne não explorou o suficiente as implicações dessa influência na estruturação do programa de Newton, lacuna que procurei suprir ao longo desse trabalho.

A segunda grande contribuição do livro de Ducheyne é a sua análise crítica da proposta de *estilo newtoniano* de Cohen. Um dos problemas em endossar a visão de Cohen do

estilo newtoniano é a compreensão que os modelos matemáticos do Livro I se tornam gradativamente mais complexos por meio de sucessivas “comparações com a natureza”. O fato é que não há qualquer indicativo de que Newton tenha realmente efetuado “comparações com a natureza” no Livro I dos *Principia*. Muito pelo contrário. Há indicativos de que ele não fez. Analisando o uso desses modelos no Livro I, Ducheyne sugere que Newton parece já saber exatamente onde quer chegar, mas em se tratando de um problema de alto grau de complexidade, ele parte de uma situação mais simples e vai aumentando gradualmente a complexidade do modelo até ser possível oferecer a solução para o problema proposto. Nas palavras de Ducheyne, o aumento da complexidade dos modelos seria uma questão “intra-teórica” e não “extra-teórica” (por comparações com a natureza). Seria uma espécie de abordagem metódica para chegar à solução de problemas teóricos mais complexos. David Gregory – um dos principais colaboradores de Newton – chegou mesmo a descrever a abordagem de Newton em termos muito semelhantes:

A melhor maneira de superar um problema difícil é resolvê-lo em alguns casos particulares mais fáceis. Isso esclarece muito a solução geral. É por esse caminho que Sir Isaac Newton afirma ter superado os problemas mais difíceis.⁸²⁰

Aparentemente, Ducheyne imagina que a abordagem que Newton usou no Livro I não difere muito da técnica sugerida acima por David Gregory. Os modelos do Livro I não aumentariam a sua complexidade gradativamente pela comparação com a natureza, mas em razão de uma técnica metódica que aborda um problema difícil a partir da resolução de casos mais simples, cuja complexidade vai sendo elevada gradativamente.

Mas a compreensão de que Newton não realizou “comparações com a natureza” no Livro I não leva Ducheyne a propor um rompimento com a visão de Cohen sobre o método dos *Principia*. Em vez disso, ele propõe a distinção entre uma “versão forte” e “versão fraca” do estilo newtoniano. Uma vez que enxerga uma certa ambiguidade na obra de Cohen em relação a essas “comparações com a natureza”, ele propõe duas possíveis interpretações do estilo newtoniano. Na “versão forte”, o aumento da complexidade dos modelos seria *fortemente* dirigido empiricamente por comparações sucessivas com a natureza; na “versão fraca”, a complexidade dos modelos seria *fracamente* dirigida empiricamente, sendo essa complexidade aumentada por fatores sobretudo intra-teóricos, e só ao final, no Livro III, que as comparações com a natureza e o processo de aproximações sucessivas teriam lugar. Cumpre dizer que o processo de aproximações sucessivas tomando lugar sobretudo no Livro

⁸²⁰ Newton, 2002, p. 150.

III já estava pressuposto nas análises de Smith e Harper, embora eles não tenham deixado esse ponto claro. Quando Cohen está falando das aproximações sucessivas dos modelos, as referências usadas são principalmente do Livro I, enquanto que as referências de Smith e Harper são sobretudo do Livro III e dos sucessores de Newton. Portanto, os esclarecimentos de Ducheyne, especialmente separando os limites dos Livro I e III, e levantando questionamentos se no Livro I ocorrem aproximações sucessivas por comparações com a natureza, é bastante oportuna. Entre as duas possibilidades de interpretação do estilo newtoniano, Ducheyne sugere que a “versão fraca” é mais fiel ao que se observa nos *Principia*: o aumento da complexidade dos modelos é fracamente dirigido empiricamente, ou seja, é mais determinada por fatores intra-teóricos.

A distinção mais nítida entre os Livro I e III feita por Ducheyne também é importante para a sua terceira grande contribuição, aqui assim denominada. Trata-se da sua contribuição para a discussão da tese de Smith, que o método de Newton não corresponde ao tradicional método H-D adotado pelos seus contemporâneos, e compreendido pela filosofia da ciência desde então como o método que subjaz a ciência.

Sinteticamente, Ducheyne argumenta que a diferença fundamental entre o método dos *Principia* e o H-D convencional⁸²¹ é que Newton busca a “causa verdadeira” dos fenômenos. Especificamente, ele busca uma causa que seja condição necessária e suficiente para explicar os fenômenos. *Tal fenômeno ocorre se, e somente se, tal condição estiver presente*. Newton busca uma causa que seja única. Para isso, naturalmente, ele precisa ou demonstrar ou que a causa apresentada é verdadeira, ou que todas as outras alternativas são falsas. No prefácio à segunda edição dos *Principia* Roger Cotes chega mesmo a declarar algo muito próximo disso. Ao descrever método dos *Principia* ele afirma que o objetivo de uma “verdadeira filosofia” é “demonstrar ou que essas causas [dos movimentos celestes] realmente existem, ou, ao menos, que outras não existem”. Qualquer uma dessas duas rotas descritas por Cotes como pertencentes a uma “verdadeira filosofia” conduzem ao mesmo destino, a saber, chegar em uma única causa. Esse é o objetivo de Newton. E sem dúvida o mais surpreendente é o *modo* como ele faz isso, o que para muitos poderia ser considerado impossível. Mas Ducheyne faz bem em destacar o objetivo: tudo o que Newton faz, todos os recursos e estratégias que usa, tem uma meta precisa: chegar, ao final, em uma única causa. Dito isso, cabe dizer que Ducheyne também faz esclarecimentos importantes sobre o *como*.

⁸²¹ Com método H-D padrão ou convencional Ducheyne está se referindo ao método H-D dos contemporâneos de Newton, tomando como referência o método H-D de Huygens. Como Harper considera a descrição do método H-D de Huygens como próxima da visão bayesiana, então podemos considerar que tanto Ducheyne quanto Harper e Smith estão contrastando o método de Newton à mesma versão do método H-D.

Para mostrar a diferença entre o método de Newton e o método H-D convencional, Ducheyne faz novamente a distinção entre os Livro I e III. Esses dois livros devem ser analisados separadamente, como domínios distintos. No Livro I, Newton parte dos parâmetros matemáticos dos fenômenos abstratos (leis do movimento e fenômenos astronômicos) e determina as condições matemáticas necessárias e suficientes para esses parâmetros. Nessa etapa, o método não é tipicamente H-D porque: (1) as hipóteses possíveis são restringidas pelas leis do movimento. Em outros termos, as hipóteses consideradas devem ser necessariamente compatíveis com as leis do movimento, que são princípios empíricos que relacionam causas e efeitos dos movimentos no mundo; (2) as hipóteses consideradas devem ser novamente restringidas pelas “dependências sistemáticas”. Com o auxílio das dependências sistemáticas, Newton consegue chegar nas condições matemáticas necessárias e suficientes para os parâmetros possíveis dos fenômenos astronômicos. Como já se esclareceu, não estamos diante de um procedimento H-D convencional, que admite os fenômenos sejam condição apenas necessária para a hipótese, mas não suficiente. O procedimento de Newton é muito mais restritivo.

No Livro III, o método usado nos *Principia* também não é equivalente ao método H-D padrão. Isso porque: (1) as hipóteses estão limitadas a aquelas que sobreviveram às restrições anteriores. Ou seja, as hipóteses permitidas devem ser compatíveis com as condições matemáticas possíveis estabelecidas no Livro I; (2) na comparação com a natureza, Newton usa “medições mediadas por teoria” e “convergência”, ou, ele exige “convergência de medições mediadas por teoria”, como Harper já havia destacado, que é um critério mais rígido que as exigências do método H-D; (3) as discrepâncias das comparações com a natureza não colocam em xeque as hipóteses, apenas sugere “forças adicionais”, que não são consideradas hipóteses *ad hoc*, como no método H-D convencional; (4) em virtude do ponto anterior, as discrepâncias não apenas não colocam em xeque as hipóteses já estabelecidas, como inauguram um processo de “aproximações sucessivas”, que também não encontra relação com o método H-D padrão; (5) fenômenos distintos daqueles inicialmente considerados são utilizados como testes, o que se soma aos critérios anteriores de convergência; e (6) a teoria e os resultados são considerados “provisórios”, pois podem ser aceitos como aproximadamente verdadeiros, e podem se tornar mais exatos ao longo do tempo, o que também é incompatível com o convencional método H-D.

Como se percebe dos parágrafos anteriores, o procedimento de Newton nos *Principia* é bastante distinto do convencional método H-D. Ducheyne procurou esclarecer que mesmo que se distinga os Livro I e III (o que não foi feito a contento por Harper e Smith), ainda

assim em ambos os livros o método utilizado é diverso do método H-D padrão. Essa é a terceira grande contribuição do livro de Ducheyne, que reforça as conclusões de Harper e Smith. As três maiores contribuições do livro do filósofo belga, portanto – a influência da filosofia natural aristotélica, a análise crítica do estilo newtoniano de Cohen, e as observações sobre a distinção entre o método de Newton e o H-D – resumem bem a sua parcela na tradição coheniana. O objetivo geral do método de Newton seria chegar a uma única causa, e para isso ele usa todos os recursos que tem à disposição para eliminar as causas alternativas.

16.4 DISCUSSÃO, ANÁLISE E CRÍTICAS À TRADIÇÃO COHENIANA

Até o momento se esclareceu que a tradição coheniana de análise do método de Newton é a tradição que considera o estilo newtoniano como referência para a compreensão do procedimento apresentado nos *Principia*. Como se procurou mostrar nas seções anteriores, esse estilo consiste na construção de modelos matemáticos idealizados que sofrem um processo de aproximações sucessivas em direção às condições que se observam na natureza. Esses passos seriam possíveis graças à distinção dos domínios matemático e físico; e a sua grande vantagem seria a possibilidade de lidar com os aspectos matemáticos da investigação da natureza sem ter de se comprometer com as causas físicas dos fenômenos. Como se mencionou, talvez o maior problema com essa caracterização seja que, no final das contas, ela não difere significativamente do tradicional método H-D, já utilizado pelos antecessores de Newton, o que faria que as aproximações sucessivas em direção à realidade não fossem possíveis, devido o problema da subdeterminação. Mas George Smith esclareceu que o método de Newton não corresponde ao convencional método H-D. A partir de uma abordagem rigorosamente empírica e trabalhando com formulações matemáticas gerais, Newton consegue contornar o problema da imprecisão dos dados empíricos e estabelece um resultado que constitui um modelo análogo à natureza. Smith, portanto, esclarece o aspecto *empírico* do método de Newton, e principalmente como a interação desse aspecto empírico com o matemático permite a Newton inaugurar um método mais rico que o H-D padrão, o que resolve muitos problemas na descrição de Cohen. Harper, por sua vez, mostra que a diferença entre o método de Newton e esse convencional H-D é que o primeiro adiciona alguns elementos a esse último, como um ideal de sucesso empírico mais rigoroso (a predição de parâmetros matemáticos dos fenômenos), a convergência de medições mediadas por teoria, e as dependências sistemáticas; e Ducheyne mostra que, diferente da abordagem H-D usual, Newton busca uma única e verdadeira causa para os fenômenos, uma causa que seja condição

necessária e suficiente para a sua explicação. Em conjunto, Smith, Harper e Ducheyne procuraram esclarecer como é possível a Newton – a partir dessa abordagem mais sofisticada que a H-D padrão – usar as discrepâncias como evidência para obter modelos cada vez mais exatos por meio de sucessivas aproximações. Resumindo, a tradição coheniana pode ser caracterizada pela adoção e desenvolvimento da ideia de estilo newtoniano de Cohen, que considera que Newton se utilizou de (1) modelos matemáticos idealizados, (2) aproximações sucessivas, (3) um procedimento mais sofisticado que o H-D padrão, e (4) discrepâncias como evidência para tornar os modelos mais precisos e próximos da natureza. Além disso, essa tradição defende que esses elementos geraram a revolução que deu origem à ciência natural empírica atual.

Estabelecida a caracterização do estilo newtoniano a partir da tradição coheniana, convém esboçar doravante algumas considerações críticas. Como é possível perceber, os três autores citados dessa tradição, apesar dos acréscimos, aderiram à ideia básica de Cohen de “modelos matemáticos simplificados”, que se submetem a um processo de “aproximações sucessivas por meio de comparações com a natureza”, usando principalmente os “desvios” ou “discrepâncias” dos modelos. Definitivamente, penso que não são esses pontos que caracterizam mais fundamentalmente o procedimento de Newton. Acredito que o método de Newton não pode ser caracterizado pelo uso de “modelos matemáticos simplificados” (ou idealizados), nem deve ser distinguido pela suposta realização de “aproximações sucessivas dos modelos por comparações com a natureza”. Começemos discutindo os “modelos idealizados”.

Newton realmente utilizou “modelos matemáticos idealizados”? Newton realmente usou modelos com condições mais simples que aquelas da natureza? Tanto Harper quanto Ducheyne seguiram a revisão inaugurada por Smith sobre a questão da “idealização” dos modelos. Mas nenhum deles aprofundou o suficiente nas implicações dessa revisão para a tese do estilo newtoniano de Cohen. Smith admitiu que Newton não trabalhou com “idealizações”, mas com “abstrações”. É imperativo se esclarecer a diferença. O que é, exatamente, uma *idealização*? É sinônimo de *simplificação*? É o mesmo que *aproximação*? Qual é a diferença – se é que há – entre uma *idealização*, *aproximação*, *simplificação* e *abstração*? A falta de um esclarecimento sobre esses conceitos prejudica o entendimento sobre o procedimento de Newton. Evidentemente a intenção aqui não é entrar em debates semânticos e conceituais, nem mesmo buscar entre as correntes filosóficas as diferentes compreensões sobre essas noções. Isso pode ficar a cargo de uma pesquisa em separado. Pretendo aqui apenas oferecer uma modesta delineação provisória desses conceitos, até certo ponto consensual, que acredito

que já servirá aos nossos propósitos de para lançar luz ao que foi realizado nos *Principia*. De modo bastante elementar, uma *idealização* pode ser entendida como uma operação intelectual, de qualquer natureza que seja, que altera as características ou propriedades de um objeto, tornando-as mais simples, ou perfeitas, do que na realidade o são. Por exemplo, tomar um objeto oval como se fosse uma esfera, ou tomar um determinado volume como uma superfície, mesmo sabendo que ele possui uma pequena espessura. Essa *idealização* dos objetos introduz fatores simplificadores que fornecem resultados que não são exatos, mas aproximados. É o caso do volume do objeto oval que será *aproximado* ao volume de uma esfera. Como se percebe, há uma relação direta entre *idealização*, *simplificação* e *aproximação*. A *idealização* geralmente consiste numa *simplificação* de um objeto complexo, que leva a resultados e propriedades *aproximadas*.

A *abstração* é uma operação diferente. Do latim *abstractio* (lit. “separação”), podemos entender esse processo como uma operação intelectual em que um elemento ou propriedade de um objeto concreto é considerada isolada do todo. Por exemplo, no caso de um objeto concreto que chamamos de *maçã*, podemos considerar isoladamente seus elementos ou propriedades constituintes, como forma, cor, textura, peso, etc. Em consequência, podemos analisar somente a *cor vermelha* da maçã, sem que seja necessário considerar a sua totalidade concreta, caso isso nos seja conveniente. Não é difícil perceber que há relações entre uma *idealização* e *abstração*, mas não são sinônimos. No sentido em que apresentamos essas operações, a *abstração* precede uma possível *idealização*. Considerar a *forma* de uma maçã isolada do seu todo concreto é uma *abstração*. Mas, em seguida, essa forma pode ser aproximada a um círculo, introduzindo uma *idealização*.

É evidente que alguém poderia se perguntar se em toda *abstração* já não ocorreria uma *idealização*. Penso que a resposta é negativa. Não tenho dúvida de que em alguns casos a *abstração* até pode ocorrer junto com a *idealização*. Se o processo de *abstração* é resultado da relação ou associação entre vários corpos concretos retirando deles propriedades gerais, abstratas, então me parece evidente que em certas associações essas propriedades abstratas serão idealizadas, uniformizando, por assim dizer, as propriedades dos corpos, que não são necessariamente idênticas. No entanto, há evidências de casos em que isso não ocorre. Por exemplo, ao levar em conta somente o *peso* de uma maçã e dizer que este é igual ao peso de uma pedra pelo equilíbrio de uma balança estática, não estamos fazendo uma operação da mesma maneira que o fazemos quando associamos a sua forma a de uma esfera. A *abstração* surge da relação entre um objeto concreto com outros, e certamente haverá propriedades entre objetos que *não serão iguais*. Nesse caso haverá *idealização*. No entanto, também haverá

propriedades que serão *iguais*, e nesse caso ocorrerá somente *abstração*. Percebe-se que as propriedades dos corpos concretos que podem ser estabelecidas por meio de relações sujeitas a *quantificação* – como o *peso da maçã* – fornecem exatamente as abstrações sugeridas acima. As propriedades matemáticas (quando se é possível estabelecer relações de identidades estritas no processo de abstração) são aquelas que mais nos aproximam da realidade da estrutura do mundo.

Creio que as considerações acima são suficientes para distinguir os processos de *idealização* e de *abstração*. Agora cabe perguntar sobre qual seria o caso dos modelos usados por Newton. De imediato adianto que a lei de força $F_c \propto 1/D^2$ não é uma *idealização*. Nas primeiras seções do Livro I, por exemplo, Newton não está construindo um modelo com condições mais simples que aquelas da natureza; ele está considerando, do fenômeno planetário concreto, apenas o *movimento* e as *propriedades do movimento*, sem levar em conta os tamanhos, formas ou massas dos corpos envolvidos. De outro modo, ele está considerando apenas uma *propriedade isolada* do fenômeno concreto, qual seja, o seu movimento. E quais são as características desse movimento, tomado isoladamente (ou abstratamente)? É um movimento que tem uma componente centrípeta acelerada proporcional a $1/D^2$. Trata-se de uma propriedade *abstrata* do fenômeno assim como o peso de uma maçã.

Uma objeção que poderia ser levantada é que os fenômenos de Kepler considerados são *aproximações*, portanto, Newton já parte de situações simplificadas ou idealizadas. Mas não custa lembrar que o que tanto Smith quanto posteriormente Harper e Ducheyne procuraram mostrar foi como Newton contornou o problema da imprecisão dos dados empíricos, ou de outro modo, como ele partiu de fenômenos matemáticos *aproximados* para chegar numa conclusão matemática *exata*. Creio ter ficado claro nos desenvolvimentos anteriores esse procedimento. Uma segunda objeção que poderia ser levantada é que as leis matemáticas são idealizadas porque a própria matemática é uma idealização. Aqui afirmo que há controvérsias. Em primeiro lugar, é preciso lembrar que Newton está trabalhando da perspectiva do *realismo matemático*. Aliás, essa é uma das razões das suas restrições com a álgebra.⁸²² Assim, dizer que a matemática é uma idealização já é adotar uma determinada concepção de matemática que, diga-se de passagem, diverge daquela de Newton. Mas em segundo lugar, e mais importante, quando Cohen sugere que Newton trabalha com “modelos idealizados” ele não está se referindo a esse possível e suposto tipo de idealizações realizadas involuntariamente no processo de abstração da mente, mas aquelas que são feitas

⁸²² Embora seja possível mostrar que a álgebra não implica necessariamente em *idealização*, mas em um segundo nível de abstração.

conscientemente para lidar com situações complexas. Nesse caso, penso que está claro que Newton não fez isso. Uma terceira objeção que poderia ser levantada é que Harper e Smith já haviam oferecido uma revisão da idealização em direção à abstração. Verdade. Mas como disse, eles não desenvolveram o suficiente as implicações disso para a interpretação do estilo newtoniano. O modelo de corpo único (one-body system) não é um sistema idealizado, ou mesmo simplificado, mas a consideração do fenômeno de modo *abstrato*, levando-se em consideração apenas as propriedades do movimento, sem incluir outros acidentes da situação concreta. Esse entendimento abre uma divergência importante do estilo newtoniano, que foi ignorada por Harper e Smith. Volto a isso mais adiante.

Além de considerar problemática a tese de que Newton usa *modelos simplificados* (no sentido de idealizações), também considero problemática a tese que considera que o método de Newton é caracterizado mais fundamentalmente por *aproximações sucessivas a partir de reiteradas comparações com a natureza*. Ducheyne percebeu a dissonância de considerar que Newton efetuou um processo aproximativo desse tipo no Livro I dos *Principia*. Ele não encontrou tais “comparações com a natureza” sugeridas por Cohen. E realmente não há. Mesmo diante disso, ele preferiu não romper com essa tradição e propôs uma “versão fraca” do estilo newtoniano, na qual o aumento da complexidade dos modelos não ocorre por “comparações sucessivas com a natureza”, mas por razões “intra-teoréticas”. No entanto, essa “versão fraca” do estilo newtoniano já não se trata mais do estilo newtoniano proposto por Cohen. Com efeito, Ducheyne precisa de um esforço considerável para salvar a proposta de Cohen apesar dessa discrepância que ele mesmo percebe entre a descrição do professor estadunidense e os *Principia*.

Vimos anteriormente que Cohen descreve o estilo newtoniano em três fases. As fases 1 e 2 se desenvolvem exclusivamente no domínio matemático do Livro I. Nitidamente, o processo de aproximações sucessivas ocorre nessas duas primeiras fases. Cohen afirma que a fase 1 “começa com a natureza simplificada ou idealizada” a partir da qual consequências são deduzidas e comparadas, na fase 2, com “os dados experienciais e as leis e regras derivadas de tais dados”. Isso leva a uma alteração, continua Cohen, “do constructo ou sistema matemático original, ou a uma nova fase 1, que por sua vez leva a uma nova fase 2 (...)”. Na fase 3, “Newton aplica o resultado obtido nas fases 1 e 2 à filosofia natural”. Diferentemente da descrição de Cohen, Ducheyne sugere que na sua “versão fraca” não ocorre comparações com a natureza no Livro I, e as aproximações sucessivas por comparações com a natureza ganham lugar somente – presumo – no Livro III. Há uma diferença bastante significativa entre as duas descrições. Ao meu ver, não há como conciliá-las; elas estão falando coisas distintas. O

processo de aproximações sucessivas proposto por Cohen é o processo pelo qual Newton teria *chegado* ao princípio da gravitação, por isso é localizado no Livro I. O processo de aproximações sucessivas proposto por Ducheyne se desenvolve *depois* de estabelecido o princípio da gravitação, por isso é localizado no Livro III. São duas propostas bem distintas. Uma está localizada na etapa da *análise*, a outra está localizada na etapa da *síntese*.

No caso das descrições de Harper e Smith, a situação não muda muito de figura. Infelizmente eles não foram claros o suficiente acerca de onde iniciaria, exatamente, o processo de aproximações sucessivas – se depois da determinação da lei da gravitação, ou se depois determinação da primeira lei de força. Aparentemente, eles estão mais alinhados como Ducheyne, e as aproximações sucessivas tem lugar principalmente no Livro III, após a determinação do princípio da gravitação. Mas ainda que não seja esse o caso (e elas iniciem logo após a determinação da primeira lei de força), o processo de aproximações sucessivas não começaria com um “modelo inicial simplificado”, como defende Cohen, mas com uma *lei de força* determinada rigorosamente a partir das propriedades matemáticas abstratas do fenômeno. Determinada essa lei, um modelo análogo ao fenômeno é construído e deduz-se consequências que são comparadas com a natureza. Nessa comparação surgem discrepâncias que são usadas para aperfeiçoar o modelo. Todavia, ainda assim, não fica de modo algum claro que são essas discrepâncias que geram uma alteração do modelo. Por exemplo, Newton inicialmente determinou a lei de força $F_C \propto 1/D^2$. Em seguida, construiu um modelo com base nessa lei, deduziu consequências e encontrou discrepâncias. A discrepância que aqui pode ser imaginada é, naturalmente, a precessão da órbita da Lua. Newton usa, então, essa informação para propor o modelo de dois corpos (*two-body system*), e acrescenta no modelo o corpo correspondente ao Sol, associado a uma nova força, que explica a precessão na órbita. O próximo modelo vai surgir apenas na seção 11 do Livro I, onde ele considera mais corpos e suas respectivas massas. Mas a grande pergunta é: quais são as discrepâncias que dão origem a esse novo modelo mais exato? Uma inspeção cuidadosa dos *Principia* mostrará que *nenhuma*. Não há uma discrepância claramente evidenciada nessa etapa. E em outras possíveis transições não fica claro quais são as discrepâncias, ou como elas são usadas para alterar os modelos. O único exemplo mais significativo que temos é o da órbita da Lua na primeira transição. Mas é preciso convir que isso não é suficiente. Portanto, de modo algum fica esclarecido que as discrepâncias são responsáveis pelas alterações nos modelos, e nem como, exatamente, essas alterações seriam realizadas.

Mas há mais. Há uma outra diferença fundamental entre a primeira e a segunda transição dos modelos, além do problema da falta de conexão entre discrepâncias específicas

e a alteração do modelo. Na primeira transição, foram adicionados novos corpos e forças no modelo, mas a lei de força ($F_C \propto 1/D^2$) não sofreu qualquer alteração. Novas forças são acrescentadas, mas todas elas seguem a mesma lei estabelecida. Já na transição do modelo da seção 11, a lei de força sofre uma significativa alteração, mudando de uma *força centrípeta* para uma *força de atração* entre dois corpos de massas m_1 e m_2 , que pode ser expressa pela relação:

$$F_C \propto \frac{m_1 m_2}{D^2}$$

Na primeira transição, apenas uma força adicional foi acrescentada, sem modificação da lei. Por outro lado, na alteração ocorrida na seção 11 ocorreu uma genuína mudança na lei de força. Em suma, a transição do *one-body system* para o *two-body system* é de natureza diversa da transição da lei do inverso quadrado para a lei da atração. E, aparentemente, ao propor a sua interpretação, Cohen estava imaginando transições desse último tipo, enquanto Harper e Smith parecem imaginar mais as transições do primeiro tipo. No entanto todos eles, ao que parece, falharam em separar esses dois tipos distintos de transição, colocando-as no mesmo bojo. De todo modo, se seguirmos o pensamento de Cohen – de que Newton *chegou* ao princípio da gravitação por aproximações sucessivas – teríamos genuinamente a transição de apenas dois modelos. Aquele construído com base em $F_C \propto 1/D^2$, e aquele construído com base em $F_C \propto \frac{m_1 m_2}{D^2}$. Se seguirmos o pensamento de Smith e Harper – de que Newton usou um processo de aproximações sucessivas *após* determinar a lei de força, temos também apenas uma transição entre dois modelos (*one-body system* para *two-body system*), pois na transição seguinte temos uma mudança de natureza diferente.

Nesse caso, caberia a pergunta: faz sentido falar que Newton procede por meio de modelos que se tornam gradativamente mais complexos num processo de aproximações sucessivas se, como efeito, estamos falando apenas de dois modelos em ambos os casos? Parece-me evidente que não. Alguma coisa parece estar faltando nesse quebra-cabeças. Além disso, se admitirmos que Newton chega primeiro à lei de força e, somente depois, constrói um modelo que de forma gradual que vai o tornando sucessivamente mais próximo da natureza – como parece ser o caso de Harper e Smith – inevitavelmente temos que reconhecer que há um rompimento com a ideia de Cohen, e que eles não estão defendendo a mesma coisa; que o mais importante de fato não seriam as “aproximações sucessivas do modelo por comparações do modelo com a natureza”, mas a maneira como Newton chega nas leis de força. As

aproximações sucessivas dos modelos seriam apenas um subproduto, uma consequência de se chegar na lei correta, e não o elemento mais fundamental do seu método.

Tendo em vista todos esses problemas, não seria mais razoável simplesmente abandonar o entendimento que o método de Newton é caracterizado fundamentalmente por essas aproximações sucessivas a partir das discrepâncias dos modelos? Não seria mais razoável abandonar esse entendimento de Cohen de que o método dos *Principia* é caracterizado por “modelos matemáticos idealizados” que se submetem a um processo de aproximações sucessivas? Não seria mais proveitoso para Harper, Smith e Ducheyne admitirem que Newton simplesmente não procedeu como Cohen propôs, mas que o *Principia* gerou um programa capaz de determinar as leis que regem os fenômenos, e cujo o subproduto é a aproximação gradual dos modelos, mesmo que de um modo ainda a ser esclarecido?

O que deve ter induzido Cohen ao erro, em primeiro lugar, foi o caráter aparentemente arbitrários dos modelos do Livro I e II, que reforçaram a tese de idealizações matemáticas. Sem o esclarecimento do papel desses modelos arbitrários, e com a referência de uma ciência pós-euleriana, é quase inevitável não pensar em idealizações. Em segundo lugar, Cohen também deve ter sido induzido ao erro pelo aumento gradual da complexidade dos modelos no Livro I, que sugere, à primeira vista, um processo de aproximações sucessivas por comparações com a natureza. Ducheyne mostrou que essas “comparações” eram pura especulação de Cohen, e sugeriu que o aumento da complexidade era dirigido muito mais teoricamente, que empiricamente. Ainda assim, permaneceu associado à interpretação de Cohen, da mesma forma que Harper e Smith o fizeram.

No próximo capítulo, pretendo mostrar que há, de fato, um aumento na complexidade dos modelos nos *Principia*, mas esse aumento não ocorre através de sucessivas comparação dos modelos com a natureza (coletando discrepâncias), como propôs Cohen, nem puramente por fatores intra-teóricos, como Ducheyne sugere. Pretendo apresentar uma interpretação alternativa à tradição coheniana, mostrando que o aumento da complexidade dos modelos é explicado de modo cristalino pelo roteiro do programa da tradição de filosofia natural aristotélica que o próprio Newton professa seguir. Pelo roteiro da “hierarquia das causas”, associado ao método da análise e síntese. Penso que a apresentação dessa interpretação alternativa terminará de mostrar que os modelos aproximados efetivamente estão presentes nos *Principia*, e evidentemente eles são ajustados ao longo do tempo, contudo esses ajustes são regulados não somente pelas discrepâncias, mas principalmente por modificações nas leis de força. Essa compreensão nos levará a percepção que os modelos são apenas um dos

ingredientes que se articulam no programa de Newton, um programa muito mais amplo e complexo do que pode parecer à primeira vista.

17 UMA ALTERNATIVA À TRADIÇÃO COHENIANA

17.1 A HIERARQUIA DAS CAUSAS

No capítulo anterior foi esclarecido que a tradição coheniana entende que o método de Newton consiste no uso de modelos matemáticos idealizados que vão se tornando gradativamente mais complexos por meio de comparações com a natureza num processo de aproximações sucessivas. Foram levantadas críticas à tese de que esses modelos sejam realmente “idealizados”, bem como à tese que o aumento da complexidade dos modelos seja resultado de comparações sucessivas com a natureza com o uso das discrepâncias. Nesse capítulo argumento que o aumento da complexidade dos modelos não ocorre como Cohen sugeriu, por comparações sucessivas com a natureza, tampouco por razões intra-teoréticas, como propôs Ducheyne. No meu ponto de vista, o aumento da complexidade dos modelos nos *Principia* é norteado pelo método da análise e síntese e, em particular, pelo roteiro delineado pela hierarquia das causas. Essas balizas não apenas esclarecem a complexidade crescente dos modelos, como ensejam, ao meu ver, uma interpretação mais verossímil do método dos *Principia* e da ciência em geral. Vejamos como.

No volume I desse trabalho se esclareceu que o método da análise e síntese consiste em partir dos efeitos em direção às causas (análise), e depois, descobertas as causas, partir das causas em direção aos efeitos (síntese).⁸²³ No entanto, o percurso dos efeitos em direção às causas não ocorre de um só fôlego. Inicia com a causa mais próxima e segue metodicamente para causas mais gerais até se chegar na causa mais remota, ou na causa mais essencial. Relembrando as palavras do próprio Newton na *Óptica*, “a principal questão da filosofia natural é argumentar a partir dos fenômenos, sem inventar hipóteses, e deduzir as causas dos efeitos, até chegarmos à primeira causa, que certamente não é mecânica”.⁸²⁴ E mais adiante, na mesma obra, ele declara:

Assim como na matemática, assim também na filosofia natural a investigação das coisas difíceis pelo método da análise deve sempre preceder o método da composição [i.e., da síntese] (...). Por meio desse tipo de análise podemos proceder dos compostos para os ingredientes, e dos movimentos para as forças que os produzem; e em geral, *dos efeitos para as causas, e das causas particulares para a causas mais gerais até o argumento terminar no mais geral*.⁸²⁵

⁸²³ Cap. 14, volume I.

⁸²⁴ *Opticks*, p.369.

⁸²⁵ *Opticks*, p.380. Grifos meu.

As citações acima deixam claro que Newton não apenas afirmou estar seguindo o método da análise e síntese, como destacou que esse método consiste em avançar gradativamente em direção a causas cada vez mais gerais. É bom que se diga que as palavras de Newton aqui não são meramente retóricas. No primeiro volume foi evidenciado que ele de fato seguiu esse roteiro nos *Principia*.⁸²⁶ Inicialmente, ele partiu dos “efeitos”, ou dos fenômenos astronômicos. Os planetas e satélites se movem em órbitas ovais obedecendo aproximadamente as regularidades observadas por Kepler (a lei das áreas e dos períodos). A partir desses efeitos, ele se pergunta sobre a causa próxima. Qual é a causa desses movimentos planetários? Como já sabemos, a sua resposta foi uma força acelerativa centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância ($F_c \propto 1/D^2$) ou, mais exatamente, um movimento acelerado centrípeto proporcional a $1/D^2$. Estabelecida essa resposta, ele passa a se perguntar sobre uma causa mais geral. Qual é a causa desse movimento acelerado centrípeto? Como também já sabemos, a sua resposta foi “a gravidade”, a mesma causa responsável pela queda dos corpos na superfície da Terra. Consequentemente, a causa dos movimentos planetários passa a ser um movimento acelerado centrípeto proporcional a m/D^2 , (ou $F_c \propto m/D^2$), onde m é a massa do planeta, uma vez que a gravidade é proporcional à massa dos corpos acelerados para determinado ponto. Estabelecida essa nova resposta, Newton se volta novamente para causa mais geral. Qual é a causa da “gravidade” dos corpos? Ou seja, qual é a causa desse movimento acelerado dos corpos em direção ao centro da Terra, planetas ou Sol, que também é responsável pelo movimento dos planetas e satélites em suas órbitas? A sua resposta foi uma atração mútua entre os planetas e o Sol, entre os satélites e os planetas, etc. Consequentemente, a causa dos movimentos planetários passa ser uma força atrativa proporcional à massa dos corpos envolvidos, e inversamente proporcional ao quadrado da distância:

$$F_c \propto \frac{m_1 m_2}{D^2}$$

Como se percebe pelo parágrafo anterior, o aumento da complexidade dos modelos nos *Principia* é determinado pelo roteiro da hierarquia das causas. A cada novo degrau na hierarquia das causas, uma nova dependência matemática é identificada e acrescentada. Ao responder à questão da causa mais próxima, a lei de força deduzida contempla apenas a dependência da força em relação à distância D de um ponto fixo. Ao responder à questão da

⁸²⁶ Cap. 10 e 11, volume I.

causa mais geral, uma nova dependência é identificada e acrescentada à lei de força. Além de ser proporcional ao inverso do quadrado da distância até esse ponto fixo, a força também é proporcional à massa m dos corpos acelerados. Por fim, ao responder à questão da causa dessa gravidade nos planetas, outra dependência é identificada e acrescentada, qual seja, a massa m dos corpos centrais. Em outros termos, a lei de força não apenas é proporcional ao inverso do quadrado da distância, e à massa do corpo acelerado, mas também é proporcional à massa do corpo central, que, a essa altura, já se sabe que também participa do processo. Não há, portanto, uma condição “idealizada” (tornada propositadamente mais simples que a realidade), que gradualmente vai se tornando mais complexa. O que há é um processo de *abstração*. Inicialmente considera-se somente o movimento dos corpos e suas propriedades abstraídas da variedade de acidentes que compõem o fenômeno concreto, e a partir daí se determina a dependência que há lei de força somente no que se refere à distância de um centro. Depois, considera-se a lei de força somente no que se refere à *massa* do corpo acelerado, ignorando-se outros acidentes, inclusive a dependência da distância (que é tomada como fixa agora). Finalmente, considera-se o movimento e suas dependências em relação ao corpo central, chegando-se à lei de força na sua forma final. Há um processo de abstração no qual as dependências da lei de força em relação a diferentes variáveis são consideradas separadamente, e gradualmente, à medida que se avança para causas mais gerais.

Percebe-se que o tratamento que considera cada dependência separadamente se aproxima da abordagem já presente no séc. XVII e que mais tarde foi formalizada e conceitualizada por Euler como “função matemática”. Newton estava analisando o movimento dos planetas *em função* da distância de um ponto, depois passou para uma análise do mesmo movimento *em função* da massa do corpo acelerado e, por fim, *em função* do corpo central. Como se mostrou no volume I, essa abordagem pode ser percebida na seção de *Definições* do Livro I, onde Newton distinguiu as três formas de abordar matematicamente a força centrípeta (na sua forma “acelerativa”, “motriz” ou “absoluta”).⁸²⁷ Essas três formas provavelmente foram elaboradas após a conclusão dos resultados que levaram aos *Principia*, como uma maneira de tornar mais inteligível esse tipo de abordagem. Mas ressalto isso apenas para reforçar que, numa primeira análise, não houve alteração na lei de força ao longo desse processo, apenas acréscimos de novas dependências à medida que ele avançava para as causas mais gerais.

⁸²⁷ Seção 5.3, volume I.

Portanto, Newton de fato seguiu o roteiro da hierarquia das causas. Não se tratava somente de uma retórica sem maiores consequências práticas. Mas ainda assim cabe se perguntar se esse roteiro implica numa diferença significativa da proposta de Cohen. Por exemplo, alguém poderia se perguntar como são estabelecidas essas causas mais gerais. São demonstradas? São hipóteses causais? No caso de serem hipóteses causais, como seriam estabelecidas? Não é difícil perceber que se são hipóteses estabelecidas pelo tradicional método H-D, esse roteiro da hierarquia das causas, seguindo das causas particulares para as mais gerais, não se distinguiria muito de seguidas adaptações de um modelo inicial, como na proposta de Cohen do estilo newtoniano. A hierarquia das causas seria um mero expediente que poderia bem ser dispensado. No final das contas, a cada passo teríamos uma nova hipótese independente mais abrangente, ou mais detalhada, que seria colocada à prova. Confirmada, ela assumiria o lugar da anterior. A ideia de seguir das causas particulares para as causas mais gerais seria apenas um resquício terminológico da tradição aristotélica que pouco informaria acerca do efetivo procedimento adotado que seria, em última instância, H-D.

Mas cumpre aqui dizer que esse não é o caso. E já se percebe isso de imediato porque cada hipótese causal mais geral não é independente da anterior. Ao contrário, cada hipótese mais geral é compatível matematicamente com a anterior. Facilmente se vê que $F_C \propto m/D^2$ é compatível matematicamente com $F_C \propto 1/D^2$ e que $F_C \propto m_1 m_2 / D^2$ é compatível matematicamente com $F_C \propto m/D^2$ e, conseqüentemente, com $F_C \propto 1/D^2$. Somente desse fato já se percebe que não se cuida aqui do método H-D convencional. Cada uma das hipóteses causais não é independente da outra, como seria o caso se estivéssemos diante do método H-D convencional. Mas como são estabelecidas cada uma dessas hipóteses de causas mais gerais? Sem que se esclareça esse ponto o procedimento de Newton continua obscuro. Pelos estudos de Harper e Smith já sabemos que os critérios de Newton para a aceitação de uma hipótese são mais restritivos que aqueles do usual método H-D. Todavia, à luz do que também foi apresentado no volume I, convém esclarecer melhor como essas hipóteses causais são estabelecidas.

Inicialmente, Newton parte dos fenômenos astronômicos, considerando-os de forma abstrata. De outra maneira, ele parte somente das propriedades matemáticas dos movimentos, ou das suas regularidades matemáticas. Em seguida, ele usa a matemática para restringir as hipóteses causais possíveis. Qualquer hipótese que seja matematicamente inconsistente, ou melhor, qualquer hipótese que não seja matematicamente possível, está, por consequência,

excluída das cogitações. O leitor pode achar estranho uma impossibilidade matemática implicar numa impossibilidade física para Newton. Mas aqui é preciso ter em vista a metafísica de fundo adotada nos *Principia*, a *mecânica universal*. O mundo tem uma estrutura matemática (na verdade, *mecânico-matemática*). Tanto a matemática (geometria) quanto a natureza têm origem mecânica.⁸²⁸ Admitida essa tese, segue-se que todas as possibilidades matemáticas são, com efeito, possibilidades físicas. Talvez uma maneira mais útil de visualizar esse ponto seja dizer: todas as possibilidades matemáticas são *mundos possíveis*. E qualquer impossibilidade matemática implica num mundo que não é possível.⁸²⁹ Posto isto, percebe-se que uma infinidade de hipóteses causais já está excluída no ponto de partida, quais sejam, todas aquelas que são inconsistentes matematicamente. Então, em primeiro lugar, Newton restringe as hipóteses da causa procurada a aquelas matematicamente possíveis. É evidente que ele não afirma isso categoricamente, mas acredito que está implícito na sua abordagem. E na verdade não apenas na abordagem dele, mas de uma parte significativa dos modernos que compartilhavam essa ideia da estrutura matemática do mundo.

Em segundo lugar, Newton restringiu ainda mais as hipóteses causais possíveis por meio das leis do movimento. O que Newton faz tanto no Livro I quanto no Livro II dos *Principia* é fixar as leis do movimento e variar os mundos possíveis que são compatíveis com essas leis. Em outras palavras, ele toma as leis do movimento como *princípios necessários* e explora os mundos possíveis que podem ser construídos desses princípios.⁸³⁰ E vale aqui enfatizar que ele não está explorando os mundos possíveis caso se *assuma* as leis do movimento como verdadeiras – sendo elas, nesse caso, apenas “hipóteses de trabalho” (*working hypotheses*), como Smith e Ducheyne sugeriram.⁸³¹ Ele efetivamente as considera como verdadeiras. Ele mesmo as chama de “leis da natureza” em certas ocasiões.⁸³² Newton está convencido de que as leis do movimento por ele enunciadas são leis da natureza e devem ser, por conseguinte, consideradas verdadeiras, ou ao menos aproximadamente verdadeiras. É por isso que elas servem de restrição para as hipóteses causais dos movimentos planetários: qualquer que seja a causa desses movimentos, ela deve ser compatível com as leis da natureza. Caso não sejam compatíveis, sequer estamos diante de um mundo possível. Os Livros I e II podem ser entendidos como uma livre exploração dos mundos possíveis em que as leis do movimento são verdadeiras. Acredito que essa é uma das razões pelas quais ele

⁸²⁸ Veja o cap. 3, volume I.

⁸²⁹ Para melhor compreensão desse ponto, veja o cap. 10, volume I. Ou, mais especificamente a seção 10.5.2 e os apêndices B e C.

⁸³⁰ Veja a seção 14.2 do volume I.

⁸³¹ Ducheyne, 2012, p.73.

⁸³² Cohen, 1999, p. 109-110

também as apresenta como “axiomas”.⁸³³ Embora não sejam princípios indemonstráveis – ou seja, embora se possa discutir os seus fundamentos empíricos – o propósito dos *Principia* é tomar esses princípios como ponto de partida, assumindo-os como verdadeiros sem discussão, e explorar os mundos possíveis se seguem dessas premissas. No Livro II, por exemplo, Newton não procura mostrar somente que os vórtices são incompatíveis com a lei das áreas e dos períodos de Kepler. Antes disso, ele procura mostrar que, assumindo e fixando as leis do movimento, *não há mundo possível em que os vórtices possam gerar órbitas estáveis*. Ou seja, por mais que alguém imagine fluidos com as propriedades mais exóticas – e Newton o fez no Livro II – a tomar como ponto de partida as leis do movimento, a hipótese dos vórtices não se sustenta. Portanto, as leis do movimento eliminam uma infinidade de hipóteses que não são compatíveis com elas, incluindo a própria hipótese dos vórtices. Nenhuma dessas hipóteses pode ser considerada um mundo possível.⁸³⁴

Em terceiro lugar, Newton considera, dentre os mundos possíveis compatíveis com as leis do movimento, quais seriam compatíveis com os fenômenos astronômicos observados. Os fenômenos astronômicos obedecem aproximadamente a lei das áreas e dos períodos. Como sabemos, Newton demonstra que se a lei das áreas e dos períodos valem aproximadamente, então há uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância, pelo menos aproximadamente. A causa dos movimentos planetários é uma força centrípeta com essa proporção indicada, exatamente ou aproximadamente. Em outras palavras, qualquer que seja o caso do mundo atual, está entre essas possibilidades. Novamente, Newton reduz de modo drástico o número de hipóteses causais possíveis.

Em quarto lugar, Newton procura fazer a última etapa de eliminação de hipóteses e determinar qual é o caso exato do mundo atual. Como já vimos anteriormente, aqui ele se depara com um problema de grande complexidade, uma vez que está limitado pela imprecisão dos dados empíricos. Mas Harper e Smith nos mostraram como Newton contorna esse problema e chega numa solução. Caso o movimento acelerado centrípeta fosse realmente proporcional a uma fração próxima a $1/D^2$, mas não exatamente, haveriam consequências no movimento planetário que não se observam no mundo atual, como a precessão das órbitas, aceleração areal, etc. Como essas consequências não se observam, Newton conclui que a causa próxima dos movimentos planetários é uma força centrípeta exatamente proporcional a $1/D^2$.

⁸³³ Acredito que esta não é a única razão. Veja seção 3.5, volume I.

⁸³⁴ Veja seção 10.5.2 e seção 14.2, volume I; veja o apêndice B.

Nesse ponto alguém poderia levantar a questão: como Newton pode usar condições que não existem no mundo para inferir aquelas que existem? Importa aqui enfatizar novamente que esse raciocínio contrafactual é sustentado pela metafísica de fundo adotada, que o mundo tem uma estrutura matemática, e, portanto, as possibilidades matemáticas são mundos possíveis. Ao explorar desdobramentos matemáticos possíveis, ele está explorando mundos possíveis, dentre os quais pode estar incluído o mundo atual. Isso esclarece porque, e como, Newton pode usar condições que não ocorrem na natureza para inferir acerca daquelas que ocorrem. Dado que o mundo tem uma estrutura matemática, e dado que as leis do movimento são as leis da natureza, Newton pode explorar os mundos possíveis dentro dessas restrições e eliminar hipótese incompatíveis até restar uma única. O resultado obtido nesse processo é, portanto, robusto. Sendo as premissas aceitas (a mecânica universal, leis do movimento, lei das áreas e períodos de Kepler), a causa próxima dos movimentos planetários como uma força centrípeta exatamente proporcional a $1/D^2$ deve ser aceita – como Newton disse em outro lugar – como “a mais rígida consequência”.⁸³⁵

Após estabelecer rigorosamente qual é o caso do mundo atual, ou seja, qual é a causa próxima do movimento planetário, Newton repete o procedimento. Ele fixa as leis do movimento, fixa a lei de força agora conhecida, e se pergunta pela causa mais geral. Qual é a causa desse movimento centrípeto acelerado proporcional a $1/D^2$?

A essa altura, com todas essas restrições, as hipóteses possíveis já são num número bastante reduzido. Basta avaliar qual delas é compatível com a proporção encontrada. Como se mostrou no volume I, Newton testa, agora, a hipótese da gravidade e constata que ela é compatível matematicamente com a causa próxima estabelecida, a força proporcional à $1/D^2$.⁸³⁶ Sobre essa etapa, vale a pena fazer duas observações aqui. A primeira, sobre a conhecida polêmica do “fudge factor”, que Newton teria ajustado ligeiramente os dados iniciais para que o resultado do teste da Lua fosse concordante.⁸³⁷ À luz do que foi exposto nos parágrafos anteriores essa polêmica perde força. Desde o início do processo Newton procura mostrar que, dadas as premissas, certas hipóteses não constituem mundos possíveis. Essas hipóteses são eliminadas. Aquelas, entretanto, que persistem como mundos possíveis,

⁸³⁵ Em carta a Henry Oldenburg, Newton escreveu: “A naturalist would scarce expect to see ye science of those [colors] become mathematicall, & yet I dare affirm that there is as much certainty in it as in any other part of Opticks. For what I shall tell concerning them is not an Hypothesis but the most rigid consequence, not conjectured by barely inferring ‘tis thus because not otherwise or because it satisfies all phaenomena (the Philosophers universall Topick,) but evinced by ye mediation of experiments concluding directly & wthout any suspicion of doubt”. *Correspondence*, 1, p. 96–97. Sublinhado meu.

⁸³⁶ Veja seção 10.4 e 14.2 do volume I.

⁸³⁷ Veja Westfall, 1973.

permanecem na disputa. Ora, o que Newton mostra no teste da Lua é que, dada a margem de incerteza que há na distância Terra-Lua e outros dados considerados, é *perfeitamente possível* que a aceleração de um corpo na superfície da Terra *coincida exatamente* com o movimento acelerado centrípeta da Lua. Observe que o ponto central aqui não é saber se o teste efetivo coincidiu exatamente ou não, se Newton adulterou os dados ou fez escolhas convenientes para isso; o ponto central é mostrar que é *perfeitamente possível* que esses fenômenos considerados coincidam em seus resultados, ou seja, que a hipótese causal de que a gravidade é a causa dos movimentos planetários é compatível matematicamente com as restrições anteriores. E, além disso, e principalmente, que não há outra hipótese alternativa que apresente tal nível de compatibilidade para rivalizar com ela.

A segunda observação que deve ser feita é que o teste da Lua realizado por Newton, a luz do contexto até aqui apresentado, não pode ser considerado como um teste único e isolado, como no caso do convencional procedimento H-D. Na verdade, uma infinidade de hipóteses já havia sido eliminada nos passos precedentes. O nível de restrição e especificidade do teste é altíssimo. E por isso a convergência do resultado do teste da Lua, ainda que sendo apenas compatível matematicamente, tem uma solidez impressionante. Portanto, a gravidade como causa da força centrípeta proporcional a $1/D^2$ pode ser vista por Newton como rigorosamente estabelecida. O resultado do teste da Lua, ao lado da ausência de outras hipóteses alternativas possíveis, levam-no a aceitar essa causa mais geral. Se ao menos houvesse outra hipótese possível poderíamos considerar a questão em aberto, aguardando uma solução. Mas não foi o caso. No momento em que todas as hipóteses foram reduzidas a uma única, compatível matematicamente com o resultado prévio da causa próxima deduzida, então essa conclusão pôde ser dada como estabelecida, e novas dependências decorrentes dessa conclusão, acrescentadas.

Determinada a hipótese da gravidade como causa da força centrípeta, Newton passa, em seguida, para a investigação da causa mais geral. Qual é a causa da gravidade? Ou melhor, qual é a causa do movimento acelerado em direção ao centro do planeta que abrange tanto corpos na superfície da Terra até satélites a grandes distâncias, e que é proporcional a m/D^2 ? Note que o nível de restrição aumentou mais um grau. Não basta a hipótese ser matematicamente possível, ser compatível com as leis do movimento, e ser compatível com $F_c \propto 1/D^2$. Qualquer que seja a causa mais geral procurada, além de compatível com tudo isso, deve também ser proporcional à massa do corpo acelerado. Como foi mencionado no volume I, no séc. XVII existiam várias hipóteses aventadas para a causa da gravidade e dos

movimentos planetários.⁸³⁸ Além da hipótese dos vórtices, havia também a hipótese das ondas mecânicas e da força magnética. Tanto a hipótese dos vórtices como a das ondas mecânicas já haviam se mostrado incompatíveis com as leis do movimento e os fenômenos astronômicos. Mas a hipótese da atração magnética ainda não havia sido afastada. Nessa etapa, Newton esclarece que a atração magnética não é compatível matematicamente com a dependência do inverso quadrado. Portanto, deve igualmente ser eliminada.

No entanto, a hipótese da atração magnética era uma especulação em cima de uma hipótese menos geral, defendida principalmente por Robert Hooke. A hipótese de que tanto os movimentos dos planetas quanto a própria gravidade teriam origem numa atração mútua entre os planetas. Se essa atração tinha origem magnética ou elétrica era outra questão. Então Newton verifica se a hipótese geral da *atração* poderia ser compatível matematicamente com $F_C \propto m/D^2$, e como já sabemos, a resposta foi afirmativa. Se considerarmos uma força de atração proporcional ao inverso do quadrado da distância entre os corpos celestes, teremos que a força atuando no corpo menor acelerado será precisamente proporcional a m/D^2 , e direcionada a um ponto muito próximo do centro do corpo maior. Em suma, dada tal proporção, a única hipótese compatível restante é a da atração mútua.⁸³⁹

Newton não foi capaz de realizar um teste empírico (semelhante ao teste da Lua) para estabelecer essa hipótese. O seu fracasso em chegar numa solução para o problema dos três corpos o impediu disso.⁸⁴⁰ No entanto, da perspectiva apresentada até o momento, ele não precisava necessariamente desse teste empírico. Na seção 11 do Livro I, ele mostrou que a hipótese da atração mútua era perfeitamente compatível matematicamente com as dependências estabelecidas anteriormente. E não apenas isso. Era a única hipótese compatível. Assim, diante do nível de especificidade das restrições anteriores, e diante da ausência de qualquer outra possibilidade alternativa – mesmo imaginada – para a causa mais geral, não haveria razão para não aceitar essa hipótese como estabelecida, mesmo sem um teste empírico direto.⁸⁴¹ Estabelecida a hipótese, ele acrescentou novas dependências decorrentes dela, a saber, que a força também é proporcional à massa do corpo central. Chegamos, portanto, em $F_C \propto \frac{m_1 m_2}{D^2}$.

Do procedimento delineado nos parágrafos anteriores é possível perceber que há realmente uma diferença genuína entre o roteiro da hierarquia das causas seguido por Newton

⁸³⁸ Seção 10.5.2, volume I.

⁸³⁹ Para mais detalhes, veja o APÊNDICE C.

⁸⁴⁰ Veja seção 10.5.4 e 14.2 do volume I.

⁸⁴¹ Seção 14.2, volume I.

e o convencional método H-D. Não se trata de uma diferença meramente retórica ou de um resquício terminológico da tradição aristotélica. Cada etapa é estabelecida de um modo rigoroso, e a etapa subsequente é limitada pela anterior, tornando o processo gradualmente mais restritivo até chegar na causa mais geral.

Mas como sabemos, Newton não parou na atração mútua entre os planetas. Ele procurou uma causa ainda mais geral. Qual é a causa da atração mútua entre os planetas? Nesse grau de generalidade as alternativas já eram muito escassas. Na verdade, a hipótese de Hooke considerava não apenas a possibilidade de haver uma atração mútua entre os corpos celestes, mas entre todos os corpos e todas as partículas dos corpos. Uma atração *universal*.⁸⁴² Newton, então, testa se essa hipótese de Hooke é compatível matematicamente com as anteriores, e chega a uma conclusão afirmativa. A hipótese imaginada de uma atração mútua entre todas as partículas dos corpos, proporcional às suas quantidades de matéria e ao inverso do quadrado da distância entre elas, gera uma atração mútua entre os planetas com igual proporção, que gera uma aceleração descendente nos corpos exatamente na proporção observada pela gravidade, que gera um movimento centrípeto acelerado em direção ao centro dos planetas na mesma proporção, que gera o movimento orbital planetário que obedece aproximadamente às leis de Kepler. A hipótese da atração mútua entre as partículas foi estabelecida com sucesso.⁸⁴³

Como sabemos, muitos contemporâneos de Newton questionaram as suas inferências a partir do momento em que ele começou a cogitar a atração mútua entre os planetas.⁸⁴⁴ Um elenco ainda maior passou a questionar o passo adicional de cogitar a atração mútua não apenas entre os planetas e corpos, mas entre as partículas dos corpos. Inclusive ainda hoje, alguns comentadores – como Harper e Ducheyne, por exemplo – colocam em questão a suposta generalização da atração interplanetária para a atração universal entre todas as partículas dos corpos. Essa hipótese parece muito longe de qualquer evidência empírica. Se ele não propôs qualquer teste para atração interplanetária, menos ainda para atração entre as partículas.⁸⁴⁵ Mas aqui é preciso novamente notar o que Newton está fazendo no processo até aqui esboçado. Ele está distinguindo as hipóteses – mesmo imaginadas – que são matematicamente possíveis, dadas certas condições empíricas previamente estabelecidas, daquelas que não são. O que Newton fez foi mostrar a hipótese da atração interplanetária não pode ser afastada como incompatível, por conseguinte, persiste com o estatuto de um *mundo*

⁸⁴² Seção 7.1, volume I.

⁸⁴³ Seção 10.6.2, volume I.

⁸⁴⁴ Seção 10.5.1, volume I.

⁸⁴⁵ Ibid.

possível; e da mesma forma o seu homólogo mais geral, a hipótese da atração entre as partículas dos corpos. Ele pode até não ter mostrado que esse era o caso atual da natureza, mas mostrou que esse era um mundo possível e, com efeito, o único mundo possível restante de todo o universo de hipóteses conhecidas já consideradas. E não apenas isso. Ela foi, sim, submetida ao crivo da experiência, na verdade, ao mais severo teste de todos, pois precisava ser compatível matematicamente com todas as dependências até então estabelecidas. Os questionamentos sobre essas duas últimas inferências de Newton geralmente se apoiam numa concepção parcial do procedimento dos *Principia*, que ignora a interdependência entre os testes sucessivos, e tende a considerar esses últimos passos ou como meramente hipotéticos-dedutivos (no sentido tradicional), ou como fruto de pura generalização. Penso que está claro a essa altura que não é esse o caso.

Mas Newton também não interrompeu o processo de ascender para as causas gerais nesse último ponto. Após estabelecida essa causa mais geral, a lei de força sofre novamente novos acréscimos.⁸⁴⁶ Desta feita, não é uma nova dependência adicionada, mas novos fatores. No caso de dois corpos esféricos extensos independentes, a lei de força agora deve ser expressa como uma somatória vetorial da atração das combinações de cada par de partículas dos corpos. Newton realizou essa complexa análise na seção 12 do Livro I, e a lei de força poderia agora ser resumida como:

$$F_C \propto \frac{\sum m_{1i} \sum m_{2i}}{D_{CG}^2}$$

Onde m_1 e m_2 são as quantidades de matemática de cada partícula dos corpos esféricos 1 e 2 respectivamente e D_{CG} é a distância entre o centro de massa dos dois corpos extensos. É fácil perceber que o resultado acima é compatível matematicamente com os anteriores. Mas seria essa atração mútua entre cada partícula de matéria dos corpos a *causa final*? Caso a sua resposta fosse afirmativa, Newton teria que assumir que a matéria tem um poder inerente de atrair. Caso contrário, ele ainda deveria procurar uma causa mais geral para a atração da matéria. Não nos é novidade que ele escolheu a última opção e prosseguiu a investigação, perguntando-se sobre a causa da atração mútua entre as partículas de matéria.⁸⁴⁷ Nas últimas páginas dos *Principia*, Newton levanta a hipótese dessa atração ser produzida por propriedades elétricas dos corpos, mas ele não possuía dados sobre essas propriedades para

⁸⁴⁶ Veja seção 10.6.2, volume I.

⁸⁴⁷ Veja a seção 12.1.3, volume I.

avaliar a compatibilidade matemática com as causas prévias.⁸⁴⁸ Para isso seria necessário um longo percurso de experimentos no campo ainda pouco desbravado da eletricidade, até se estabelecer as dependências matemáticas desses fenômenos. Como sabemos, essa sugestão foi seguida pelos sucessores de Newton que desenvolveram as teorias da eletricidade seguindo o seu modelo. Mas isso não o impediu de continuar especulando sobre outras hipóteses para atração mútua entre as partículas, como a hipótese de um éter com propriedades elásticas.⁸⁴⁹ Essas hipóteses, não obstante, jamais deixaram o estatuto de *hipóteses* para Newton, uma vez que ele não encontrou meios de testar a compatibilidade matemática delas com as dependências estabelecidas anteriormente.

De todo modo, a conclusão que chegamos nessa seção é que o aumento da complexidade dos modelos dos *Principia* não é dirigido primariamente por uma série de comparações sucessivas e com a natureza, a partir de um modelo inicial idealizado, como Cohen propõe, tampouco por razões intra-teoréticas como sugere Ducheyne. O aumento da complexidade dos modelos é norteado pelo método da análise e síntese, em particular pelo roteiro da hierarquia das causas, e cada etapa desse processo é estabelecida num rigoroso procedimento em que as hipóteses são determinadas de um modo mais restritivo que o convencional método H-D. Essa conclusão, entretanto, leva-nos a outras questões. Se o método de Newton nos *Principia* não é caracterizado pelas aproximações sucessivas de um modelo matemático simplificado, conforme a tradição coheniana sugere, mas é caracterizado pela determinação de uma lei de força exata, na qual as dependências matemáticas são estabelecidas de modo preciso, como justificar o número significativo de passagens no tratado fazendo alusões ou mesmo menções diretas a processos aproximativos? Como explicar o simples fato de haverem discrepâncias entre as consequências do modelo e a natureza? Além disso, se o roteiro da hierarquia das causas se baseia sobretudo na determinação das causas associadas a leis matemáticas, qual seria, exatamnete, o papel dos “modelos matemáticos” nessa interpretação? Nas próximas duas seções que encerram esse capítulo entraremos nessas questões.

17.2 DICREPÂNCIAS, NOVOS FENÔMENOS E MODELOS

A interpretação particular do método de Newton apresentada na seção anterior não esclarece somente a razão do aumento da complexidade dos modelos nos *Principia*. Muito

⁸⁴⁸ Veja seção 14.2, volume I.

⁸⁴⁹ Newton realizou essas especulações nas *Queries*, da *Óptica*.

além disso, esclarece também o papel das discrepâncias, da predição de novos fenômenos, e o papel dos diferentes tipos e finalidades de modelo utilizados no tratado. Começemos falando das discrepâncias.

Como vimos, os representantes da tradição coheniana reforçaram a importância fundamental das discrepâncias no método dos *Principia*. Eles argumentam os desvios dos modelos quando comparados com a natureza, em vez de falsear uma hipótese (ou em vez de servir como um *contraexemplo*) servem para impulsionar a pesquisa. De algum modo as discrepâncias se tornam “evidência” para desenvolvimentos posteriores. Já sabemos que pela interpretação aqui proposta essa tese fica no mínimo prejudicada. O aumento da complexidade dos modelos, observada até aqui, não é dirigida pelas discrepâncias, e sim pelo roteiro da hierarquia das causas. Mas isso cria um problema adicional. As discrepâncias inegavelmente estão presentes nos *Principia*, e a interpretação proposta deixa no mínimo dúbia a explicação para a presença delas. Se a lei de força – por exemplo $F_C \propto 1/D^2$ – é exata, ou melhor, se essa lei é o *caso atual* da natureza, o que explica o simples fato de haverem discrepâncias na comparação com o mundo? O leitor já deve ter percebido a resposta, mas mesmo assim vale a pena reforçar: a *lei* não é exata; as *dependências* encontradas é que são. Ou seja, a lei é exata *a menos* das dependências que ainda nela estão ausentes. Ou ainda, a lei é exata, porém *incompleta*. Essa é uma das principais razões dos desvios na comparação com a natureza. Uma vez que encontramos *uma* das dependências da lei, já temos resultados aproximados. Porém, necessariamente haverá discrepâncias, pois outras dependências ainda estão desconsideradas. Por isso mesmo se espera que uma nova hipótese causal mais geral, caso esteja correta, não apenas seja compatível com a causa anterior estabelecida, mas explique algumas discrepâncias sobressalentes. Isso ocorre porque a causa mais geral estabelecida inclui novas dependências na lei antes desconsideradas, e agora essas novas dependências produzem consequências mais exatas, e antes não previstas.

Voltando ao exemplo da lei de força $F_C \propto 1/D^2$. Sabemos que ao ser aplicada para o caso da Terra-Lua, ela leva a discrepâncias. Enquanto a lei de força prevê que a Lua se mova numa trajetória sem precessão, na realidade se constata que a órbita da Lua precessiona cerca de 3° por revolução. Se a causa próxima (a lei de força $F_C \propto 1/D^2$) é exata, essa discrepância não pode ser entendida como um *contraexemplo*, ou uma indicação de que a hipótese deve ser modificada. Isso significa apenas que outras dependências estão ausentes, e ao serem descobertas, devem necessariamente explicar a discrepância. Como sabemos, a hipótese mais geral da *atração*, além de ser compatível com a lei de força acima, ainda explica a

discrepância do movimento da Lua. Esse esclarecimento revela porque as discrepâncias chamaram tanto a atenção da tradição coheniana, a ponto de defenderem que ela é que direcionava o aumento da complexidade dos modelos. De fato, num processo como o descrito acima, a discrepância se torna *evidência*. A causa mais geral deve ser compatível com a anterior mais restrita e deve, ainda, explicar discrepâncias (pois as discrepâncias já são esperadas, e a sua explicação no modelo mais geral, também é). Portanto, as discrepâncias se tornam uma fonte fundamental de informação para o estabelecimento da causa mais geral. No caso específico da Lua, qualquer que fosse a causa mais geral dos movimentos planetários, as novas dependências deveriam produzir cerca de 3° de precessão na sua órbita. É uma informação matemática de fundamental importância que servirá como um dado empírico para um futuro teste de uma hipótese mais geral. Longe de ser apenas um *contraexemplo*, nesse procedimento as discrepâncias tornam-se dados empíricos de grande valor.

Mas nesse contexto não são apenas as discrepâncias que se tornam evidências de grande valor. A previsão de *novos fenômenos* também. Se temos uma causa mais geral estabelecida, que acrescenta novas dependências na lei, essas novas dependências podem não apenas explicar discrepâncias pendentes, como prever novos fenômenos. Na verdade, trata-se de duas faces da mesma moeda. A explicação das discrepâncias é a dedução, pela causa mais geral, de novos fenômenos não preditos pela causa anterior, mas que não eram desconhecidos, pois já figuravam como discrepâncias. Já essa outra fonte de evidência é a predição de novos fenômenos pela causa mais geral, porém fenômenos realmente *desconhecidos*. É o caso das perturbações das órbitas de Júpiter e Saturno na conjunção. A hipótese mais geral da atração interplanetária, além de ser matematicamente compatível com a anterior, ainda explica discrepâncias do movimento da Lua, e prevê um fenômeno totalmente desconhecido, a perturbação na referida órbita dos dois planetas. É também o caso do fenômeno exemplificado pelo famoso experimento da balança de torção de Cavendish, em 1797, que detectou atração entre duas pequenas massas, segundo a predição da hipótese mais geral da atração universal entre todos os corpos e partículas. Portanto, uma consequência natural do procedimento exposto na seção anterior é que a cada avanço em direção a causas mais gerais, deve ocorrer, *de forma natural*, a explicação de discrepâncias e a predição de novos fenômenos. Nesse sentido, tanto a explicação de discrepâncias quanto a predição de novos fenômenos se tornam poderosas fontes de evidências complementares à compatibilidade matemática entre a causa mais geral e a anterior. Retorno a discussão das discrepâncias e novos fenômenos mais adiante. Passemos, antes disso, à questão do papel dos modelos matemáticos nos *Principia*,

dos diferentes tipos e finalidades de modelos, e das fartas referências a aproximações nesse tratado.

Como afirmei no fim da seção anterior, um dos problemas com a interpretação alternativa que se propõe aqui são as fartas referências a *aproximações* nos *Principia*. Acerca disso, em primeiro lugar é preciso notar que nenhuma dessas referências está vinculada à determinação das leis de força e suas dependências. E quando está vinculada (indiretamente, ao menos), como nos cálculos das “órbitas giratórias”, na seção 9 do Livro I, o que realmente interessa ao argumento não é o *resultado exato do cálculo do ângulo de precessão*, mas que *haverá uma precessão* em certas circunstâncias. Ou seja, não afeta o argumento que leva às conclusões sobre as referidas leis.⁸⁵⁰ Em segundo lugar, e mais importante, a maior parte das referências a aproximações ocorre na etapa da *síntese*. Um dos grandes problemas da tradição coheniana foi de não distinguir os modelos dos *Principia* nas etapas de *análise* e *síntese*.

A etapa da *análise* já foi esclarecida nas seções anteriores. Trata-se da determinação das causas, seguindo o já referido roteiro da hierarquia das causas, avançando das causas mais próximas para as mais remotas ou gerais. Como já é possível perceber, na prática, esta etapa está associada com a determinação da *lei de força* e suas dependências matemáticas, o que também ocorre progressivamente, acompanhando as descobertas das causas mais gerais. Mas é interessante perceber que após a determinação de cada causa mais geral é possível – e recomendável – aplicar uma etapa de *síntese* até ocorrer a substituição da causa por outra mais geral. Em outros termos, há um *espaço* – um *gap* – entre a determinação de uma causa próxima e a sua substituição por uma causa mais geral, um espaço que é preenchido precisamente pela *síntese*. Após o estabelecimento de uma causa pela *análise*, inicia-se a dedução de consequências a partir da causa, construindo-se um modelo do mundo (*síntese*). Esse modelo é comparado com o mundo concreto e se registram discrepâncias. A *síntese* prossegue até que se estabeleça uma causa mais geral (uma lei de força mais ampla, com dependências adicionais). Após o estabelecimento da causa mais geral, o processo de *síntese* é repetido. Deduz-se consequências da nova lei, e se constrói um novo modelo mais exato que pode, inclusive, explicar discrepâncias e predizer fenômenos e fatos desconhecidos da natureza. E o ciclo de *análise* e *síntese* prossegue até onde for possível. O procedimento descrito poderia ser resumido como abaixo:

⁸⁵⁰ Veja a seção 10.2, volume I.

1. Estabelecimento da causa próxima – lei de força incompleta (Análise).
2. Dedução de consequências e construção de um modelo do mundo (Síntese).
3. Comparação do modelo com os dados (empírico-matemáticos) do mundo. Registro de discrepâncias. (Síntese)
4. Estabelecimento da causa mais geral, compatível matematicamente com a anterior – lei de força com novas dependências (Análise).
5. Dedução de consequências e construção de um novo modelo do mundo, mais exato. Explicação de discrepâncias, predição de novos fenômenos (Síntese).
6. Comparação do novo modelo com os dados do mundo. Registro de novas discrepâncias. (Síntese)
7. Repetição dos passos anteriores.

Sobre o procedimento de análise e síntese acima é necessário fazer algumas observações. A primeira é que as *discrepâncias* não são necessariamente usadas aqui para adaptar os modelos, como a tradição coheniana propõe. Como já foi mencionado anteriormente, essa proposta não faria esse procedimento efetivamente distinto do método H-D tradicional. No caso em tela, as discrepâncias não são a *motivo* da adaptação dos modelos; o modelo é modificado a partir da determinação de uma causa mais geral, e a explicação de parte dessas discrepâncias serve de *evidência convergente* de que a causa mais geral determinada é correta. Em outras palavras, o novo modelo não é criado para explicar as discrepâncias (à maneira *ad hoc*), ou mesmo para *adaptar* o modelo inicial; a causa mais geral é determinada primariamente pela sua compatibilidade matemática com a anterior, e a explicação das discrepâncias é uma mera consequência *independente* que serve como uma evidência adicional, e convergente, de que a causa proposta é verdadeira. Então, é preciso distinguir claramente o procedimento acima daquele proposto pela tradição coheniana.

A segunda observação é que são naqueles interlúdios de *síntese* que ocorrem frequentemente os procedimentos aproximativos dos *Principia*. É no momento em que se procura construir um *modelo do mundo* a partir da *lei* determinada, para em seguida compará-lo com os dados da natureza. E isso ocorre porque, nesse caso, inevitavelmente, deve-se considerar no modelo todos os acidentes do mundo atual. Além disso, à medida que se repete o ciclo de *análise* e *síntese*, a complexidade da lei estabelecida também aumenta, e mais difícil se torna a tarefa da *síntese*. Assim, na etapa de construir um modelo do mundo, devido ao número de variáveis, devido à carência de todos os dados referente aos acidentes do

mundo, devido à dificuldade dos problemas matemáticos que se apresentam a partir desses acidentes, recorre-se a todo tipo de procedimento aproximativo, ou de simplificação. Por exemplo, as descrições dos movimentos da Lua, das marés, dos cometas, da precessão dos equinócios, da forma da Terra usam todos processos aproximativos e simplificações em abundância. Mas note, todos estão na etapa da *síntese*. Na etapa de construir um modelo do mundo. No caso do modelo do movimento da Lua é preciso notar que, uma coisa é a determinação da lei do inverso quadrado para o movimento planetário, incluindo aí o movimento da Lua; outra coisa é a construção de um modelo preciso desse movimento a partir da lei determinada, para compará-lo com os dados do mundo. Nesse momento Newton lança mão de proporções aproximadas de distâncias, tamanhos, usa simplificações da órbita – considerando-a como perfeitamente circular – para então concluir que uma força do tipo inverso quadrado atuando na Lua em direção à Terra e ao Sol gera uma precessão da mesma ordem observada pelos astrônomos. O mesmo podemos observar quando Newton se propõe a construir um modelo do sistema solar. Em momento algum ele supõe a lei de força não estar correta, mas para construir o modelo do mundo ele precisa calcular todas as perturbações dos astros entre si, conhecendo precisamente todas as distâncias e quantidades de matéria, e todos os outros acidentes. A princípio, ele mesmo concluiu que o intelecto humano não seria capaz de executar tal trabalho.⁸⁵¹ Esses exemplos, portanto, não podem ser utilizados como evidência de que Newton usa um procedimento aproximativo para *chegar* às leis; eles são evidências que ele usou as aproximações para construir um modelo de mundo *a partir* das leis. Realmente existem modelos aproximados que se tornam gradativamente mais precisos nos *Principia*, mas tais modelos se desenvolvem sobretudo nas etapas de *síntese*.

A quarta observação sobre o procedimento de *análise* e *síntese* exposto mais acima – que se segue imediatamente das observações do parágrafo anterior – é que a qualidade e precisão das informações fornecidas pelas discrepâncias depende, naturalmente, da qualidade e precisão da *síntese*. Ou seja, a qualidade das discrepâncias depende da qualidade das aproximações empreendidas na etapa da *síntese*. Como vimos, a lei de força determinada é exata a menos das dependências que nela estão ainda ausentes; ao se deduzir consequências e se comparar com os dados do mundo surgem discrepâncias que são dados matemáticos precisos que podem ser usados como evidências de convergência numa eventual determinação de uma causa mais geral. Mas se a construção do modelo do mundo atual na *síntese* for realizada por meio de aproximações grosseiras, torna-se evidente que as discrepâncias não

⁸⁵¹ Newton, 1965, p.301.

serão informativas a respeito das dependências ausentes na lei de força, pois a sua origem sempre pode ser as aproximações malfeitas. Podem até ser informativas para detectar erros de aproximação, ou elementos que faltam no modelo. Mas não para sugerir uma causa mais geral.⁸⁵² Por essa razão, o interlúdio da síntese entre cada etapa de análise não é um processo simples, nem rápido. Pode levar anos ou décadas. Com efeito, pode levar até séculos para que um modelo do mundo a partir de uma lei (mesmo exata!) esteja suficientemente preciso para que as suas discrepâncias se tornem, efetivamente, informativas para a determinação de uma causa mais geral. Em outros termos, a etapa da síntese é um programa de pesquisa em si mesmo.

Portanto, nos *Principia* realmente há a utilização de modelos aproximados que gradualmente se tornam mais exatos. Mas esse processo ocorre sobretudo na etapa da síntese. Diferente do que sugere a tradição coheniana, quando se adiciona novos corpos e forças não se está alterando o modelo e sim apenas o aperfeiçoando, ou tornando o *mesmo modelo* mais exato. Esse processo não se confunde – e é de natureza diferente – daquele da etapa da análise, em que se determina a lei de força e acrescenta, gradativamente, novas *dependências* nessa lei após o estabelecimento de uma causa mais geral. Na subida dos degraus da *análise* se tem genuinamente uma mudança qualitativa de modelo, e por essa razão pode haver inclusive modificações conceituais profundas na transição. Um dos principais problemas na interpretação da tradição coheniana foi tratar indiscriminadamente os modelos nesses dois tipos distintos de transição. Na etapa da análise o objetivo não é construir modelos de fenômenos, mas determinar as *leis matemáticas* (associadas às causas) que regem os fenômenos, ou, ao menos, parte das dependências matemáticas dessas leis. Até pode haver o uso de modelos nessa primeira etapa, mas eles atendem a uma finalidade específica: são modelos que representam *mundos possíveis* a partir de leis matemáticas hipotéticas também possíveis, que são usados apenas como suplemento na determinação das *leis* que efetivamente operam no mundo atual. Creio que essa sutil distinção entre os tipos de modelos e seus usos nos *Principia* contribuiu para que a tradição coheniana os considerasse como parte de um único pacote. Mas não são. O diagrama abaixo pode tornar mais claro essa diferença entre os modelos nas duas etapas.

⁸⁵² Naturalmente, isso significa que as discrepâncias são usadas para aperfeiçoar os modelos, mas somente na etapa da síntese. Elas não são usadas para a modificação da lei de força. Novamente, a falta da distinção entre as etapas da análise e síntese na tradição coheniana os leva a não considerar propriamente o papel das discrepâncias nos *Principia*, ou mesmo a superestimar o seu papel.

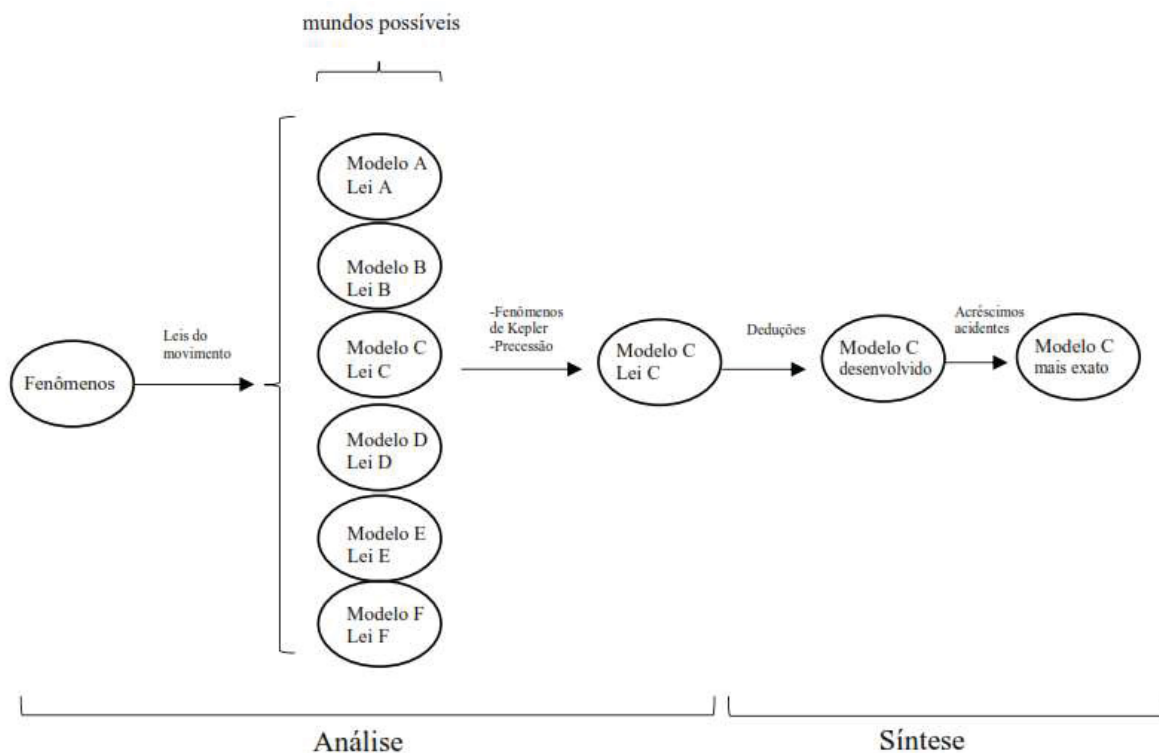


Figura 98 – Diferença dos modelos nas etapas da análise e síntese nos *Principia*. Fonte: o autor.

Na etapa da análise, Newton parte da restrição das leis do movimento e desenvolve livremente modelos matemáticos (mundos possíveis), sob variadas leis de força. Restringindo ainda mais as opções de modelos possíveis à compatibilidade com os fenômenos de Kepler e a lei de precessão das órbitas, ele determina qual é a lei que opera no mundo atual, e o modelo inicial correspondente. Digamos, a lei e o *modelo C* na figura. Esse modelo é, então, desenvolvido na etapa da síntese, deduzindo-se consequências e acrescentado-se acidentes. O modelo se torna gradativamente mais exato. A partir desse processo, novos fenômenos são descobertos por meio de predições bem-sucedidas, enquanto outras predições não se ajustam à realidade, permanecendo como problemas a serem resolvidos com o prosseguimento da síntese. Alguns desses problemas são resolvidas à medida que a síntese avança, com acréscimos de outros acidentes, porém outros resistem, apesar dos aperfeiçoamentos do modelo. Não havendo uma fonte provável para esses problemas no interior do processo de síntese, eles passam a ser considerados como “exceções” do modelo, ou, para usar o termo que temos preferido, “discrepâncias”. Esse modelo só vai efetivamente mudar quando, pelo processo de análise, uma causa mais geral for estabelecida, juntamente com a aplicação da lei que rege o fenômeno (A *lei C*, no nosso diagrama). Quando isso ocorre, não temos mais um mero aperfeiçoamento do *modelo C*, mas uma mudança qualitativa, e várias discrepâncias remanescentes são explicadas, e novos fenômenos preditos e descobertos. Os limites do

modelo C são ampliados, e todo o processo volta a se repetir. Portanto, as mudanças sofridas pelo modelo durante a etapa da síntese são de natureza distinta das mudanças na etapa da análise. No primeiro caso temos apenas aperfeiçoamentos a partir da mesma lei de força; no segundo temos uma mudança na lei de força. Não acredito que a tradição coheniana tenha considerado adequadamente essas diferenças entre os usos, finalidade e funções dos modelos nas etapas da análise e síntese nos *Principia*, bem com as diferenças das modificações dos modelos em cada etapa.

Do que foi exposto nos parágrafos anteriores acredito que fica mais claro o papel dos modelos, das discrepâncias e das aproximações nos *Principia*. Em relação aos modelos, em especial, é fundamental distinguir, como vimos, o seu uso nas etapas da análise e síntese. Na análise, o ponto central é determinar as causas e leis matemáticas associadas em operação na natureza. Essas leis devem ser rigorosamente estabelecidas, e para isso se usam modelos. Na etapa da síntese, o objetivo é construir um modelo do mundo *a partir* dessas causas e leis já estabelecidas. Uma mudança genuína de modelo ocorre apenas com a determinação da causa mais geral e alteração da lei matemática que rege o fenômeno. Caso contrário, estamos diante apenas de aperfeiçoamentos do mesmo modelo, pois a lei básica que rege o fenômeno permanece no mesmo estado. Esse ponto – e os demais discutidos nessa seção – ficam ainda mais claros quando se considera a transição da gravitação para a teoria da relatividade de Einstein, o que será tratado na seção 19.3. Mas no momento, convém reforçar que o que salta à vista nessa descrição é o papel das *leis matemáticas* em todo esse processo, e a sua importante função de coordenar a construção, o aperfeiçoamento e a transição entre os modelos. Esse é um ponto que tem relevantes implicações para a filosofia da ciência, razão pela qual pretendo concluir esse capítulo refletindo sobre ele.

17.3 IMPLICAÇÕES PARA A FILOSOFIA DA CIÊNCIA

Um dos problemas atuais da filosofia da ciência que foi mencionado nas seções 15.6 e 15.7 é o problema do estatuto epistemológico das teorias científicas. Na ocasião mencionei que o fracasso em esclarecer os fundamentos e racionalidade da ciência levou ao ressurgimento do *instrumentalismo científico*. Convém esclarecer um pouco melhor esse problema para relacioná-lo com as conclusões da seção anterior e, em especial, com as conclusões acerca do papel das leis científicas. Poderíamos dizer que há quatro possíveis respostas para o problema do estatuto epistemológico das teorias científicas: (1) elas são estritamente verdadeiras; (2) elas são falsas; (3) elas são aproximadamente verdadeiras; e (4)

elas não são verdadeiras e nem falsas; são apenas *úteis* ou *não-úteis* (tese do instrumentalismo). Reflitamos melhor sobre essas teses.

As teses (1) e (2) acima geralmente são descartadas pela maioria dos filósofos e cientistas. No caso da primeira tese – que as teorias científicas são *estritamente verdadeiras* – haveriam apenas duas alternativas possíveis. Ou elas são verdades *analíticas*, como as relações da lógica e da matemática, verdadeiras *a priori*, para usar a terminologia de Kant; ou são juízos *sintéticos*, contingentes, que podem ser verdadeiros ou falsos de acordo com algum critério de correspondência com a experiência. Como o objetivo da ciência é versar precisamente sobre conhecimentos do mundo natural, a primeira alternativa já está descartada. Resta a segunda. No entanto, a tentativa de estabelecer critérios correspondências entre os conhecimentos da ciência e a realidade foi precisamente o malfadado projeto dos positivistas lógicos, que procurou estabelecer tais critérios por meio da análise lógica da linguagem. Evidentemente, o conhecimento é mediado pela linguagem, e sem conseguir revelar como a linguagem é construída a partir do mundo, não se vislumbra possibilidades de sucesso desse projeto. Foi o que ocorreu com o projeto positivista. Além disso, ao longo do séc. XX, as teorias científicas mais bem-sucedidas foram substituídas por outras, revelando que, na melhor das hipóteses, elas eram apenas “aproximadamente verdadeiras”. O caso mais emblemático foi a mecânica newtoniana sendo substituída pela mecânica relativística e quântica nas primeiras décadas do séc. XX. Isso gerou praticamente um consenso entre os filósofos sobre a impossibilidade da tese (1). Por outro lado, a tese (2), de que as teorias são simplesmente *falsas*, jamais foi considerada seriamente, uma vez que na prática isso implica no fim da ciência.

As teses que realmente sobreviveram, por conseguinte, foram (3) e (4). Com uma predominância para (3). As teorias científicas não são *estritamente verdadeiras*, mas são pelo menos *aproximadamente verdadeiras*. Mas como vimos no cap. 15, uma das versões desse entendimento é a tese chamada por Laudan de “realismo epistemológico convergente”, que basicamente defende que as últimas teorias científicas de um domínio são mais próximas da realidade que as anteriores e, portanto, ao longo das transições teóricas há uma *convergência* para a verdade. Isso explicaria porque certas teorias bem-sucedidas seriam substituídas por outras, mas ainda assim não deveriam ser consideradas *falsas*, e sim aproximadamente verdadeiras. Contudo, esse entendimento se mostrou extremamente difícil de se justificar, como bem mostrou Laudan, e ainda hoje permanece sem esclarecimento. Por isso surgiu a alternativa da tese (4), que defende que diante do fracasso todas as tentativas de justificar que as teorias científicas são verdadeiras ou, pelo menos, aproximadamente verdadeiras, o melhor

que poderíamos fazer – como bons empiristas – é manter uma posição cética, adotando alguma forma de *instrumentalismo*. Tudo o que podemos dizer sobre as teorias científicas é se são ou não *úteis*.

O quadro do problema do estatuto epistemológico das teorias científica esboçado acima é importante para a nossa discussão porque evidencia que, em sua análise do estilo newtoniano, Cohen propôs, na verdade, uma variação da tese do realismo convergente. Segundo Cohen, o que Newton fez em sua ciência foi propor modelos matemáticos que gradativamente convergem para as condições da natureza. De imediato é importante perceber que não havia, e não há, qualquer grande novidade apresentada na proposta de Cohen em relação à compreensão usual do progresso da ciência desde a década de 1950, pelo menos, com o declínio do positivismo lógico. O mais relevante para os filósofos da ciência desse período não era *se* as teorias progridem por uma espécie de aproximações sucessivas; até certo ponto isso era o senso comum. O mais importante era *como*, exatamente, isso ocorria, e como esse procedimento poderia ser justificado e esclarecido, se é que podia. Portanto, o que poderia haver de novidade no *Newtonian Revolution* de Cohen seria ou descrever *como* esse procedimento era executado por Newton, e mostrar que ele eventualmente iniciou com os *Principia* (uma tese relacionada à história da ciência e da metodologia científica), ou usar o estudo dos *Principia* para abrir caminho no esclarecimento de como esse processo de aproximações em direção à verdade poderia ser *justificado* (uma tese relacionada à filosofia da ciência). Aparentemente, Cohen seguiu principalmente o primeiro caminho, mas falhou em sua descrição, o que comprometeu também o segundo caminho.

Como já foi evidenciado anteriormente, a descrição de Cohen de uma convergência dos modelos dos *Principia* em direção a realidade simplesmente não se sustenta. Essa descrição não se distingue de abordagem hipotético-dedutiva convencional, com adaptações *ad hoc* dos modelos e, portanto, não é capaz de garantir qualquer convergência em direção às condições da natureza. A tese de Cohen não é suficiente para superar o problema da subdeterminação. Isso fica ainda mais evidente com o artigo de Laudan sobre a refutação do realismo convergente, publicado um ano após o lançamento do *Newtonian Revolution* de Cohen. Como já vimos, na conclusão do artigo, Laudan afirmou que não havia até o momento – e ainda não há – uma justificação plausível para a defesa que as teorias científicas convergem para a verdade (ou para as condições da natureza). Pelo menos até que os realistas esclareçam como se dá a confirmação na ciência, e associado a isso, o que vem a ser, precisamente, um conhecimento *aproximadamente verdadeiro*. Por isso, voltando ao ponto, o mais importante para os filósofos não era *se* as teorias progridem por aproximações

sucessivas, mas *como* isso ocorre exatamente e, em seguida, como isso pode ser justificado. Cohen apresentou a tese de que o estilo newtoniano procede por meio dessas aproximações, mas falhou em explicar precisamente o *como*.

Smith, Harper e Ducheyne, no entanto – já bem distantes da década de 1980 – avançaram na descrição de Cohen, evidenciando porque os modelos de Newton não podem ser considerados abordagem tipicamente H-D. Existe uma lei matemática estabelecida empiricamente de modo rigoroso, e o modelo é construído a partir dessa lei. Trata-se de um modelo “isonomológico”, nas palavras de Ducheyne, e por isso a convergência para as condições da natureza é possível. Convém apresentar um esquema que distingue a proposta deles daquela de Cohen:

Proposta de Cohen:



Proposta da tradição coheniana:

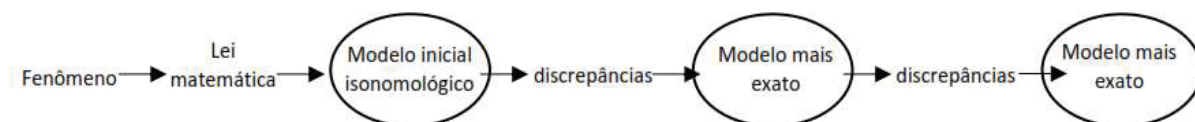


Figura 99 – Diagrama comparativo do estilo newtoniano. Fonte: o autor.

A comparação entre as duas propostas acima deixa claro que a segunda sana o problema do modelo inicial H-D. Mas o fato é que ela ainda não esclarece satisfatoriamente como o processo de convergência em direção às condições da natureza ocorre a partir do modelo. Após o estabelecimento da lei, o modelo é ajustado e torna-se mais exato por meio das discrepâncias. Contudo, evidenciei anteriormente que há vários problemas com essa sugestão. A meu juízo, nesse ponto a tradição coheniana manteve o mesmo vício que já existia na proposta original de Cohen.

Para resolver os problemas que enxergava nas duas propostas acima, sugeri que há um processo aproximativo de fato ocorrendo nos *Principia*, mas que esse processo deve ser distinguido nitidamente nas etapas da análise e síntese. A tradição coheniana teria misturado

as duas etapas, e enfatizado mais a etapa da síntese. Procurei mostrar que na etapa da síntese o modelo isonomológico é tornado mais exatos pelo acréscimo gradativo de novos elementos e acidentes no modelo, completando o seu arcabouço a partir da lei matemática que o estrutura e coordena. Na etapa da análise, a estrutura nomológica do modelo é alterada, uma vez que a própria lei matemática que lhe dava origem se modificou. Temos, nesse caso, uma aproximação de natureza diferente da anterior, que amplia o alcance do próprio modelo, e permite que ele atinja uma precisão além dos limites do modelo prévio. O diagrama abaixo será útil para comparar com essa proposta com aquela da tradição coheniana:

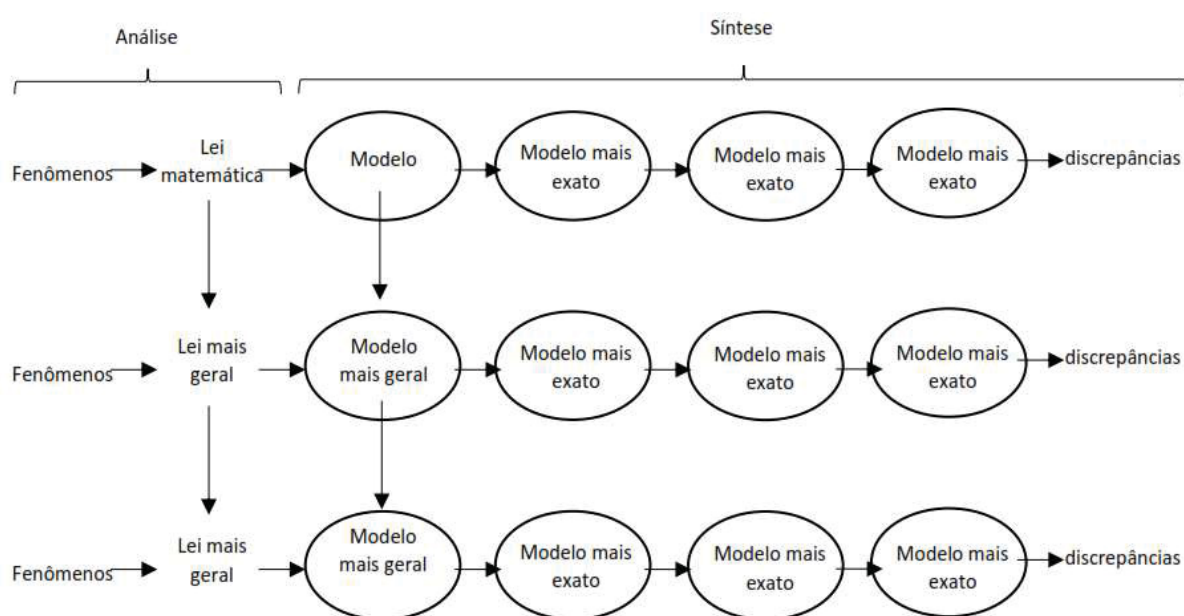


Figura 100 – Diagrama de transição de modelos na análise e síntese. Fonte: o autor.

Como se percebe pelo diagrama acima, há uma transição de modelos *vertical* e *horizontal*. Há um processo aproximativo vertical e horizontal, correspondendo, respectivamente, às etapas de análise e síntese. Nas aproximações horizontais, novos acidentes e deduções são adicionados aos modelos a partir da resolução de problemas matemáticos, muitas vezes, bastante sofisticados. Nas aproximações verticais, temos a determinação de uma lei matemática mais exata, obtida a partir do roteiro da hierarquia das causas. As discrepâncias não são os motivos primários na determinação das causas mais gerais que dão origem aos novos modelos, mas se somam aos “fenômenos” que terminam por culminar na lei mais geral.

Acredito que o esquema acima é capaz de esclarecer como, exatamente, os modelos usados por Newton nos *Principia* podem se aproximar gradualmente das condições da própria

natureza. Naturalmente, a relevância da sistematização acima descrita para a filosofia da ciência está em que ela coloca em questão precisamente a refutação da tese do realismo convergente, bem como propostas instrumentalistas como a de Van Fraassen. Não há dúvidas, pela simples análise dos diagramas acima, que as *leis científicas* têm um papel absolutamente fundamental na coordenação dos modelos científicos. Sem elas, de fato restaria senão o instrumentalismo científico, uma vez que os elementos de analogia estrutural dos modelos com a realidade simplesmente deixariam de existir. É um grande equívoco propor eliminação das leis das teorias científicas, como fez Van Fraassen.⁸⁵³ As leis são fundamentais principalmente porque pelo reconhecimento do seu papel é possível questionar a refutação do realismo convergente, evidenciando um caminho viável para defesa que as teorias científicas de fato se aproximam das condições da realidade. E não apenas isso. Elas evidenciariam também que essa ciência teria iniciado precisamente com os *Principia* de Newton, o qual teria marcado o surgimento de um novo modo de investigar a natureza, efetivamente mais seguro que as propostas dos seus antecessores e contemporâneos.

O problema que vislumbro na tentadora caracterização acima está relacionado precisamente ao grau de solidez com que as *leis matemáticas* (associadas às causas dos fenômenos) são estabelecidas no procedimento de Newton. Quero acreditar que as seções anteriores serviram para esclarecer *como* essas leis foram estabelecidas nos *Principia*, mas resta saber se de fato elas podem ser consideradas justificadas pelos procedimentos descritos. Em outras palavras, uma coisa é a *descrição* do que Newton fez para estabelecer essas leis; outra coisa é questão se elas podem ser consideradas realmente *justificadas*; o fundamento que justifica essas leis. Portanto, importa questionar: é mesmo possível defender que essas leis são válidas? Qual é o fundamento da sua validade? Como elas são justificadas pela experiência? Elas são de fato justificadas pela experiência? Caso não se possa estabelecer esse fundamento, toda a proposta aqui construída, por mais verossímil que pareça, simplesmente desmorona (numa análise do ponto de vista da racionalidade da ciência). A crítica ao realismo convergente prevalece. Evidentemente, a partir daqui iniciamos um outro tipo de abordagem nesse trabalho, não mais de procurar descrever e esclarecer o método de Newton, mas de tentar analisar os fundamentos da sua validade. Entremos, portanto, nesse espinhoso terreno no próximo capítulo.⁸⁵⁴

⁸⁵³ Sobre isso, veja também Ghins, 2013.

⁸⁵⁴ Naturalmente, refiro-me aqui à abordagem do “descritivismo robusto”, nas palavras de Losee (2001).

18 O CONFIRMACIONISMO DE NEWTON

Nos capítulos anteriores foi esclarecido que para Cohen o método de Newton é caracterizado pelo uso de modelos matemáticos simplificados que são submetidos a um processo de aproximações sucessivas que gradativamente convergem para as condições da natureza. Foi esclarecido também que se a descrição de Cohen não se distingue da abordagem H-D, no final das contas ela não se sustenta. Devido o problema da *subdeterminação*, não há como garantir essa convergência para as condições da natureza. Trata-se do uso convencional de modelos matemáticos, que esbarra em todos os problemas de justificação já discutidos pela filosofia da ciência ao menos desde a década de 1950. Só é possível falar em “adequação empírica” dos modelos, e não que eles efetivamente sejam capazes de convergir para as condições da natureza. No entanto, Smith, Harper e Ducheyne argumentaram que o método de Newton não é equivalente ao típico método H-D. Os modelos são construídos com base numa lei empírico-matemática que é estabelecida de modo unívoco. Ducheyne enfatiza que Newton de fato procura determinar uma única hipótese que explique o fenômeno, que seja condição necessária e suficiente para ele. No método H-D convencional, uma hipótese é proposta, deduz-se consequências, e caso essas consequências ocorram de fato, ela é considerada no máximo *provável*. Por outro lado, o método de Newton propõe não *uma*, mas um *conjunto* de hipóteses possíveis (mundos possíveis), explora as consequências de todas elas, e compara-as, todas, ao mundo natural. Assim é capaz de chegar à conclusão sobre qual delas é o caso do mundo atual. Não deixa de ser um tipo de procedimento *hipotético-dedutivo*, mas diferente do tipicamente assim considerado. Harper chama esse procedimento de análise de “dependências sistemáticas” dos fenômenos. Seria dessa forma que Newton estabelece empiricamente as leis matemáticas que coordenam a construção dos modelos aproximativos, e garante a convergência desses modelos para a realidade.

A questão central do presente capítulo é retomar o ponto de como as leis e causas dos fenômenos são estabelecidas por Newton, e se perguntar se elas podem ser consideradas efetivamente justificadas pela experiência. Em outras palavras, que tipo de justificação esse método H-D de Newton é capaz de fornecer? Que o método H-D dedutivo de Newton é distinto do convencional, a tradição coheniana e as análises anteriores já deixaram claro. O mais importante agora é se perguntar se esse procedimento é capaz de justificar as hipóteses, ou qual o grau de segurança que é capaz de fornecer a elas. Por exemplo, esse método é capaz de produzir *confirmações qualitativas*? Ou fornece, no máximo, hipóteses mais *prováveis*,

como no método H-D convencional? A tradição coheniana não enfrentou essa questão, até porque foge ao padrão de uma abordagem *descritivista modesta* que a maioria deles adotou. Todavia não há dúvidas que esta é a questão central aqui, numa análise do ponto de vista da filosofia da ciência. Embora Harper, Smith e Ducheyne não tenham discutido diretamente esse problema, os textos analisados dos dois últimos autores parecem indicar que eles acreditam na possibilidade de uma confirmação *qualitativa*. Já Harper – que adotou uma abordagem mais alinhada com o *descritivismo robusto* – afirmou abertamente que o método H-D de Newton fornece uma maior probabilidade que o convencional, quando submetido a uma análise bayesiana. Ele parece assumir, portanto, que o método de Newton *não é capaz* de fornecer confirmações qualitativas. Mas mesmo ele também não abordou essa questão diretamente.

O problema com o possível entendimento de Harper acima é que para defender que o método H-D de Newton fornece apenas *maior probabilidade* para as hipóteses testadas, ele precisa ignorar o fato que Newton era radicalmente contrário a essa concessão probabilística. Todo o seu conflito com Hooke sobre as cores, em 1672, e com vários outros interlocutores da *Royal Society*, ocorreu devido a sua recusa em aceitar tanto a especulação quanto o probabilismo de muitos filósofos experimentais.⁸⁵⁵ Para defender esse entendimento, Harper tem que admitir que, ou Newton falhou em construir uma ciência com base numa evidência qualitativa (ou demonstrativa), e na prática aderiu a alguma forma de probabilismo; ou tem que admitir a confirmação qualitativa simplesmente não é possível, e por isso é mais proveitoso caracterizar o método H-D de Newton já diretamente em termos bayesianos, como conferindo apenas maior probabilidade para as hipóteses testadas. Tenho a impressão que Harper seguiu esse último caminho. Diante das extremas dificuldades já evidenciadas Popper, Duhem, Quine e outros, em relação à confirmação H-D qualitativa, ele simplesmente procurou avaliar o procedimento de Newton diretamente em termos probabilísticos.

Mas para os propósitos desse trabalho, o caminho supostamente trilhado por Harper acima não serve. Não pretendo tentar ajustar Newton aos parâmetros pré-estabelecidos da filosofia da ciência, e sim, ao contrário, permitir que o método Newton possa trazer luz, eventualmente, a algum problema da filosofia, ainda que seja o difícil problema da

⁸⁵⁵ Na introdução da sua *Lectiones Opticae*, Newton afirma que “com a ajuda dos filósofos geômetras e geômetras filósofos, em vez das conjecturas e probabilidades que estão sendo espalhadas por todos os lados, poderemos finalmente alcançar uma ciência da natureza apoiada na mais alta evidência.” (Newton, 1984, p. 87-89). No debate com Robert Hooke sobre a natureza da luz é possível perceber também que Newton rejeita retoricamente o método H-D como caracterizado por Huygens e os modernos. E na descrição do seu método no escólio da seção 11 do Livro I, ele descreve o seu método como efetivamente distinto do método H-D, conforme George Smith mostrou. Veja a seção 13.2.1 do volume I para a citação completa do *Lectiones Opticae*.

confirmação. A seguir, vou admitir que Newton está tentando efetivamente produzir genuínas *confirmações qualitativas* das hipóteses, e observar até onde isso nos leva. Em outros termos, pretendo admitir que Newton estava buscando inferências que fornecessem critérios necessários e suficientes para a aceitação ou o afastamento conclusivo de uma hipótese. Caso o método de Newton seja capaz de fornecer confirmações qualitativas, teríamos uma outra teoria de confirmação distinta da abordagem H-D convencional, que poderia servir de fundamento para a compreensão da ciência e o esclarecimento da sua racionalidade, inclusive fornecendo base para a defesa da convergência das teorias científicas para a realidade. Por outro lado, caso se mostre que o método H-D de Newton não seja capaz de fornecer confirmações qualitativas, teremos ao menos estabelecido os limites dessa teoria de confirmação, e ainda poderíamos analisar até que ponto ela foi incorporada na ciência posterior. Vejamos se Newton conseguiu o seu intento.

18.1 CRITÉRIOS DE CONFIRMAÇÃO DE NEWTON

Para analisar o problema da justificação das leis e causas propostas nos *Principia* é preciso mostrar claramente quais são os *critérios* de confirmação utilizados por Newton, e avaliar se são efetivamente suficientes para a aceitação de uma hipótese. Começemos comentando sobre os critérios de sucesso empírico elencados por Harper⁸⁵⁶. Como vimos, Harper esclareceu que o ideal de sucesso empírico do método H-D de Newton é mais rico que o método H-D padrão. Ele estabeleceu três critérios que revelam essa diferença: primeiro, ele exige a predição de *parâmetros matemáticos* dos fenômenos; segundo, usa *dependências sistemáticas*; terceiro, exige a *convergência* de medições mediadas por teoria. A pergunta oportuna aqui é a seguinte: seriam esses critérios levantados por Harper suficientes para uma confirmação *qualitativa*?

Naturalmente, já sabemos que o filósofo não discutiu diretamente se os critérios acima seriam suficientes para uma confirmação qualitativa. Certamente seria útil iniciar essa investigação analisando esses critérios, e avaliando se eles poderiam ser considerados, eventualmente, suficientes para a confirmação qualitativa de uma hipótese, e se não, porque não. Mas para reduzir a extensão dessa análise apresento, desde logo, uma síntese dos critérios que emergem da discussão realizada na “alternativa à tradição coheniana”, deixando

⁸⁵⁶ Harper, 2011.

para outra oportunidade a discussão sobre se os critérios que aqui se apresentarão são ou não equivalentes a aqueles apresentados por Harper.

Pois bem, baseando-se nos estudos descritivos desse trabalho, bem como na análise dos estudos da tradição coheniana, considero que os critérios de confirmação que mais se adequam a aqueles adotados por Newton nos *Principia* para o estabelecimento de uma hipótese podem ser resumidos em três: (1) a hipótese deve ser compatível com o fenômeno que pretende explicar (deve predizer o fenômeno, como no método H-D convencional); (2) a hipótese deve ser compatível com certas condições iniciais consideradas verdadeiras, ou aproximadamente verdadeiras; e (3) todas as hipóteses alternativas que satisfaçam (1) e (2), se houverem, devem ser eliminadas até restar somente uma única. Somente após satisfazer essas três condições uma hipótese poderia ser considerada *confirmada*.⁸⁵⁷ O segundo critério – a compatibilidade com algumas condições iniciais verdadeiras – merece um esclarecimento. É bom que se informe logo de início que não estou associando essas “condições iniciais” necessariamente com aquelas discutidas por Hempel, Popper, Duhem e outros. Aqui me refiro a condições iniciais que são “verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras”, recaindo a ênfase precisamente no estatuto epistemológico dessas proposições. Portanto, uso a referida expressão em analogia às *condições iniciais* ou *condições de contorno* nos problemas da matemática. Qualquer problema matemático pode ser resolvido se tivermos suficientes *condições iniciais* ou *condições de contorno* para encontrar a solução. Caso essas condições sejam desconhecidas, o problema poderá não ter solução, ou melhor, terá infinitas soluções. Com as apropriadas condições iniciais qualquer problema matemático pode ser resolvido. O papel dessas condições é, basicamente, restringir drasticamente o número de possibilidades de solução até ser possível obter uma resposta única. Por exemplo, na equação $x + y + z = 10$ é evidente que temos infinitas soluções. Mas se temos uma informação adicional que atua como uma condição inicial, que há uma relação entre x e y que pode ser expressa como $y = x^2$, o número de soluções possíveis reduz drasticamente, embora continuem infinitas. Mas caso se acrescente uma terceira condição inicial, chegaremos na solução do problema. De maneira análoga poderíamos considerar os problemas físicos.⁸⁵⁸

⁸⁵⁷ Como vimos anteriormente, Ducheyne deixa implícito que, para Newton, a eliminação das hipóteses é condição necessária e suficiente para a determinação das causas dos fenômenos. Porém, ele não desenvolve as consequências desse entendimento, e prefere não opinar sobre o que isso poderia significar, e nem mesmo arrisca sugerir a possibilidade de Newton estar lidando genuinamente com confirmações *qualitativas* das hipóteses.

⁸⁵⁸ Naturalmente, não se trata de uma analogia perfeita. Como se sabe, as condições iniciais nos problemas matemáticos estão relacionadas geralmente a condições nas quais a variável temporal é considerada igual a zero. Portanto, também não procure o leitor na analogia uma correspondência exata com a terminologia da matemática.

Vejamos a explicação desse procedimento no caso do problema sobre a causa do movimento planetário. Qual é a causa do movimento dos planetas? Inicialmente temos uma variedade de hipóteses possíveis. Mas sabemos que, qualquer que seja a causa, deve ser um fenômeno capaz de gerar um movimento contínuo numa órbita fechada. Essa restrição já limita o número de hipóteses possíveis. Entretanto, de nada adianta supor que *vórtices* de matéria podem gerar esse tipo de movimento. Há várias outras hipóteses possíveis. Precisamos de outras *condições iniciais* para restringir o número de soluções. Nesse caso, Newton usou as leis do movimento. As leis do movimento são condições empírico-matemáticas da natureza que podem ser consideradas verdadeiras (ou aproximadamente verdadeiras). Qualquer que seja a hipótese considerada como causa dos movimentos planetários, deve ser necessariamente compatível com essas leis. Com base nesse raciocínio, Newton escreveu os Livros I e II dos *Principia*. Como já mencionei, esses livros tratam, basicamente, de *mundos possíveis* nos quais as leis do movimento são necessárias. Mais especificamente, os Livros I e II dos *Principia* promovem uma livre exploração das propriedades e consequências matemáticas dos mundos possíveis em que as leis do movimento são válidas, mas investigando especialmente as propriedades matemáticas das causas dos movimentos em órbitas fechadas, que era o caso do movimento planetário. Ou seja, as propriedades matemáticas dos vórtices, ondas mecânicas, atrações num espaço sem resistência (sob variadas leis de força). Somente essa restrição já seria suficiente para afastar a hipótese dos vórtices e das ondas mecânicas. Mesmo considerando as propriedades mais exóticas de fluidos diversos, Newton mostrou que, dadas as leis do movimento, os vórtices não poderiam gerar órbitas estáveis como aquelas do movimento dos planetas. Tampouco as ondas mecânicas de vibração poderiam.

Mas naturalmente essa condição inicial, por si só, também não é suficiente para solucionar o problema. Ainda que se eliminassem as hipóteses do movimento de uma matéria que preenche o espaço ser a causa do movimento dos planetas, haviam infindáveis hipóteses atrativas, sob as mais variadas leis de força, que se poderia imaginar. Newton, então, adota uma segunda condição inicial: o movimento planetário deve obedecer aproximadamente às regularidades matemáticas expressas na lei das áreas e dos períodos de Kepler. Inicialmente, essa segunda condição inicial reforça a eliminação da hipótese dos vórtices. Dadas as leis do movimento, não é possível obter vórtices que gerem órbitas fechadas estáveis para os corpos, e menos ainda vórtices que produzam movimentos que obedeçam aproximadamente a lei das áreas e dos períodos. Já no caso das hipóteses dos planetas perfazendo suas órbitas num espaço sem resistência, Newton determinou que os movimentos planetários segundo as

condições dadas seriam possíveis, mas somente para o caso de uma força exatamente ou aproximadamente proporcional a $1/D^2$. Novamente, ele reduziu drasticamente o número de hipóteses.

Da mesma maneira, a restrição do parágrafo acima não soluciona o problema de Newton. Existe uma infinidade de leis de força no intervalo de *aproximadamente proporcional a $1/D^2$* . O que Newton fez para transpor essa dificuldade? Procurou outras *condições* que o permitissem restringir ainda mais os resultados. Ele explorou as consequências das duas hipóteses em questão – uma força *exatamente* proporcional a $1/D^2$, ou uma força *aproximadamente* proporcional a $1/D^2$ – e dessa exploração encontrou outras condições para contornar essa dificuldade: a precessão das órbitas dos planetas. Ou seja, Newton usou uma terceira condição inicial, ou, poderíamos também dizer, *condição de contorno*, para prosseguir em direção à solução: a imobilidade dos afélios das órbitas planetárias. Essa condição tornou possível a Newton dar o último passo para chegar numa solução única para o problema da lei de força necessária para gerar o movimento planetário num espaço sem resistência. Dadas as três condições iniciais, o movimento planetário deveria ser gerado necessariamente por uma aceleração centrípeta *exatamente* proporcional a $1/D^2$. Qualquer que seja a causa física do movimento planetário, ela deve obedecer a essa proporção matemática. A hipótese de Hooke, portanto, que o movimento dos planetas era gerado por uma força que obedece a proporção do inverso do quadrado da distância, foi *confirmada*. Ela prediz o movimento orbital fechado; ela é compatível com algumas condições iniciais que podem ser consideradas verdadeiras (ou aproximadamente verdadeiras); e não restou qualquer hipótese alternativa que satisfizesse as duas condições anteriores.⁸⁵⁹

Como é possível perceber dos parágrafos anteriores, os três critérios de confirmação – a predição do fenômeno que se pretende explicar, a compatibilidade com algumas condições matemáticas iniciais, e a eliminação das hipóteses alternativas – foram utilizados para se chegar na solução. Mas não é difícil perceber que esses três critérios poderiam bem ser reduzidos para dois: (1) a predição do fenômeno que se pretende explicar, e (2) a eliminação

⁸⁵⁹ Alguém poderia comparar o que Harper chamou de “predição de “parâmetros matemáticos dos fenômenos” pode ser entendido como as condições matemáticas iniciais que mencionei aqui. No entanto, cabe dizer que o sentido aqui empregado é mais amplo. As condições matemáticas iniciais não pertencem somente ao fenômeno que se pretende explicar. Não basta a hipótese ser compatível a lei das áreas e períodos de Kepler. Ela deve ser compatível, igualmente, com as leis do movimento. E caso haja necessidade de continuar restringindo as hipóteses, outras condições empírico-matemáticas podem ser utilizadas, ou procuradas, como a lei que rege a precessão dos planetas. Fica claro, portanto, que ser compatível com os “parâmetros matemáticos dos fenômenos” não é suficiente para eliminar todas as hipóteses alternativas, e chegar a uma confirmação efetiva da hipótese.

das hipóteses alternativas. As “condições matemáticas iniciais” teriam a única função de reduzir o número de hipóteses alternativas até restar uma única.

A pergunta que se pode fazer na sequência é se Newton prossegue seguido tais critérios na continuidade da investigação da causa dos movimentos planetários. Penso que sim. Após confirmada a hipótese de que os movimentos planetários são gerados por uma aceleração centrípeta proporcional $1/D^2$ em um espaço com resistência desprezível, essa aceleração se torna o fenômeno partir do qual se investigará a causa mais geral na próxima etapa. Qualquer que seja a causa física dos movimentos planetários, ela deve ser compatível com esse fenômeno. Ou melhor, deve predizer essa proporção. Ou ainda, deve ser condição necessária e suficiente para esse fenômeno. Quais seriam as hipóteses físicas possíveis? Das hipóteses ainda possíveis, restava a hipótese da gravidade, da atração, atração magnética e elétrica, da atração universal das partículas, e a hipótese da ação de algum tipo de éter elástico. No entanto, dessas hipóteses, as atrações magnéticas e elétricas se propunham como causas mais gerais, ou seja, como causas da própria gravidade (movimento de queda na superfície da Terra); a atração universal das partículas se propunha como uma causa ainda mais geral, qual seja, a causa da própria atração magnética e elétrica; e o éter elástico, como causa da própria atração universal. Em outras palavras, a hipótese como menor grau de generalidade após conclusão da proporção do inverso quadrado era a *gravidade*, e esta seria a consequência de todas as demais hipóteses possíveis. Na verdade, a gravidade – uma propriedade considerada apenas para os corpos terrestres até então – era uma hipótese de menor generalidade até que a aceleração centrípeta, uma vez que essa aceleração não englobava apenas a Terra. Assim, caso a hipótese da gravidade estivesse correta, a aceleração centrípeta deveria ter como consequência imediata a mesma aceleração dos corpos em queda na superfície da Terra, o ponto em comum que havia em todas as hipóteses consideradas. Como já sabemos, a compatibilidade entre a aceleração centrípeta do tipo inverso quadrado com a aceleração da queda dos corpos na superfície se mostrou estabelecida.

$$a_c \propto 1/D^2 \rightarrow S \propto t^2 \quad (\text{Para } D = \text{raio da Terra})$$

A compatibilidade entre a aceleração centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância e o fenômeno da queda dos corpos na superfície da Terra estabeleceu que essa aceleração centrípeta não apenas é a causa dos movimentos planetários, mas a causa da queda dos corpos. E isso não somente pelo fato dela cumprir o critério da predição desse fenômeno;

mas porque essa hipótese é compatível com a condição matemática inicial $S \propto t^2$ (considerada verdadeira ou aproximadamente verdadeira) e não há qualquer outra hipótese alternativa nesse grau de generalidade (todas as outras leis de força foram eliminadas). Ou seja, a hipótese de que a aceleração centrípeta que gera o movimento planetário – e em particular o movimento da Lua – seja também a causa da gravidade na superfície da Terra pode ser considerada *confirmada*.

Todavia a questão formulada mais acima não se tratava de qual era a causa da queda dos corpos, mas sim de qual era a causa da aceleração centrípeta proporcional a $1/D^2$ que provoca os movimentos planetários. Ocorre que é essa conexão com a gravidade que permite perceber que a aceleração centrípeta é, também, proporcional à massa dos corpos, portanto $a_c \propto m/D^2$. E nesse sentido, pode-se levantar a hipótese de que a causa da aceleração centrípeta dos planetas é, com efeito, um tipo de *força gravitacional* (que se distingue da *gravidade* no sentido aristotélico) que se manifesta em todos os planetas e no Sol, dirigida para o centro desses astros, e que é responsável pelos movimentos orbitais dos satélites em torno dos planetas, e dos planetas em torno do Sol. Essa força é compatível com o fenômeno das acelerações centrípetas dos satélites e planetas, e com as condições matemáticas $a_c \propto m/D^2$ e $S \propto t^2$. Na ausência de outra hipótese possível nesse grau de generalidade, e diante das compatibilidades apresentadas, a hipótese pode ser considerada *confirmada*. Temos, portanto, que:

$$F_{\text{gravitacional}} \propto m/D^2 \rightarrow a_c \propto 1/D^2$$

A aceleração centrípeta é a causa da queda dos corpos, e a força gravitacional exercida pelos planetas é a causa da aceleração centrípeta.

Seguindo o mesmo raciocínio, avança-se para uma hipótese física mais geral. Qual é a causa dessa *força gravitacional* em direção ao centro dos planetas e do Sol? As hipóteses que ainda persistem são as mesmas já citadas acima. Seguindo a ordem de generalidade, a hipótese física a ser considerada agora seria a *força de atração*. A *atração* poderia satisfazer as já bem restritas condições matemáticas estabelecidas? Como sabemos, a resposta também é afirmativa. Explorando as consequências matemáticas da hipótese de uma força de atração proporcional ao inverso do quadrado da distância, percebe-se que esta pode, de fato, produzir uma força gravitacional proporcional a m/D^2 , nos termos que foi confirmado na etapa anterior. Resumindo:

$$F_{\text{atração}} \propto \frac{m_1 m_2}{D^2} \rightarrow F_{\text{gravitacional}} \propto \frac{m}{D^2}$$

Avançando mais uma etapa de generalidade, considera-se, agora, a hipótese da força atrativa ser de origem magnética. Para que essa hipótese seja confirmada, relembremos, ela deve satisfazer as três condições impostas anteriormente. Primeiro, deve ser capaz de prever os fenômenos, nesse caso, uma força de atração. Sabemos que esse critério é satisfeito. Em segundo lugar, deve ser compatível com certas condições matemáticas iniciais consideradas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras. A principal dessas condições é a proporção da força atrativa acima. Mas, nesse caso, a condição falha. Realizando experimentos com a atração magnética, Newton concluiu que essa força não é proporcional ao inverso do quadrado da distância. A hipótese da atração magnética, portanto, foi eliminada.

Não havendo meios de considerar a hipótese da atração elétrica, Newton considerou, por fim, a hipótese de Hooke, da atração universal das partículas. Como sabemos, essa hipótese satisfaz os critérios de confirmação. Prediz os fenômenos da atração mútua dos planetas, é compatível com a condição matemática confirmada na etapa anterior, e não há qualquer outra hipótese alternativa que satisfaça essas duas condições. Ficou, portanto, *confirmado* que a força de atração universal das partículas é a causa atração mútua dos corpos celestes, que gera o movimento orbital dos astros e a gravidade na superfície da Terra.

Newton, portanto, está trabalhando com *confirmação qualitativa*. Ele formulou uma maneira de obter confirmações efetivas, fragmentando a investigação em etapas de generalidade crescente, e utilizando-se de condições matemáticas que poderiam ser consideradas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras. É claro que isso ainda não está estabelecido para o leitor, uma vez que cabem muitos questionamentos sobre essa proposta. Um dos questionamentos é a pergunta que foi dirigida aos critérios de Harper, que igualmente se aplicam aqui: o que garante que os três critérios propostos se constituem numa condição *suficiente* para a confirmação de uma hipótese? Outro questionamento é a validade da eliminação dessas hipóteses alternativas. Como se dá, exatamente, essa eliminação? A hipótese é falsificada? Pode-se demonstrar que é falsa? Uma vez que a possibilidade de confirmação se sustenta, em última instância, na eliminação dessas hipóteses alternativas, não é possível endossar esse procedimento sem que se esclareça esse ponto. Além disso, como a eliminação depende de se considerar as condições iniciais como verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras, como justificar o estatuto dessas condições? Para discutir essas

questões ofereço as próximas duas seções. Nelas, pretendo esclarecer o que é precisamente a confirmação que aqui se supõe, e que é possível, sim, proceder genuinamente a eliminação de hipóteses.

18.2 CONFIRMAÇÃO E FALSEAÇÃO

Na seção anterior foi proposta a interpretação de que Newton está, de fato, trabalhando com *confirmação qualitativa* nos *Principia*. Foi sugerido que uma hipótese causal pode ser considerada *confirmada* se satisfizer três critérios: (1) predizer o fenômeno que pretende explicar; (2) for compatível com certas condições matemáticas iniciais consideradas verdadeiras, ou aproximadamente verdadeiras; (3) se todas as hipóteses alternativas que satisfazem (1) e (2) forem eliminadas. A questão que levantei no fim da seção anterior é se esses critérios seriam, de fato, suficientes para defender um confirmacionismo qualitativo. Outra questão que levantei é se é possível, realmente, eliminar as hipóteses alternativas de modo decisivo. Começemos com a última questão.

Qual é a natureza exata da eliminação das hipóteses proposta na seção anterior? As hipóteses são *falseadas*? E caso sejam, como essa eliminação se relaciona com os problemas clássicos do *falseacionismo*? Como mencionado na seção 15.4, o falseacionismo padece pelo menos de três problemas graves, quais sejam, o problema da *base empírica*, o problema da *impossibilidade de falsear uma hipótese isolada*, e o problema da *prática científica*, que revela que as teorias geralmente convivem com muitas evidências contrárias, *contraexemplos* ou discrepâncias. Esses contraexemplos, bem ao contrário de falsear uma hipótese, levam os cientistas a procurarem explicações *ad hoc* para salvá-la. Como então, defender a eliminação de hipóteses que aparentemente se percebe nos *Principia*?

Importa enfatizar aqui que a falseação efetuada por Newton nos *Principia* é bem distinta daquela assumida por Popper e Duhem. Considere, por exemplo, a proposição clássica “todos os cisnes são brancos”, obtida por indução. A Regra 4 dos *Principia* afirma que qualquer proposição que seja uma generalização indutiva deve ser considerada “verdadeira, ou aproximadamente verdadeira”, a despeito de qualquer hipótese contrária (entenda-se, aqui, *contraexemplo*), que deverá ser admitida como “exceção”, até que “outros fenômenos” possam fazê-la “mais exata”.⁸⁶⁰ Basicamente, o que Newton está dizendo nessa

⁸⁶⁰ “Na filosofia experimental, as *proposições formuladas por indução* a partir dos fenômenos coletados devem ser consideradas como exatamente verdadeiras, ou aproximadamente verdadeiras, não obstante qualquer hipótese contrária, *até que outros fenômenos tornem essas proposições ou mais exatas ou sujeitas a exceções*” (CW, p.796). Grifos meus.

regra é que não é possível falsear uma proposição universal obtida por indução. Mas tampouco isso significa que ela é imune à crítica. Na prática, o que ocorre é que a proposição é “ajustada”. *Tornada mais exata*.⁸⁶¹

Naturalmente, a pergunta que se faria aqui é *como*. Como a proposição obtida por indução é “ajustada”? Considere novamente o exemplo clássico dos cisnes, mas agora de um modo mais concreto. Sabe-se hoje que há cinco espécies de cisnes catalogadas, sendo todas elas de cor branca ou preta. Diferente dos patos e gansos, a maioria dos cisnes não são aves migratórias, e determinadas espécies são nativas de certa região. Os *cisnes brancos* (*cygnus olor*), por exemplo, são nativos da região da Eurásia, enquanto que os *cisnes negros* (*cygnus atratus*) são nativos do continente da Oceania, e mais exatamente da Austrália. Não é difícil de imaginar, portanto, que durante muito tempo todos os cisnes observados pelos europeus eram brancos, o que naturalmente os levou a concluir, por indução, que “todos os cisnes são brancos”. Mas suponha, agora, que estivéssemos junto com as expedições dos primeiros navegadores ingleses e franceses que descobriram e exploraram o continente da Oceania. E suponha que tivéssemos avistado um cisne negro. O que aconteceria após essa observação? Todo o histórico de observações anteriores resumidos na proposição “todos os cisnes são brancos” seria jogado fora? É evidente que não. Na prática, realmente consideraríamos esse fato uma “exceção”, que deveria ser explicada oportunamente, e continuaríamos declarando que “todos os cisnes são brancos”. A bem da verdade, sequer consideraríamos essa ave um *cisne*, pois segundo o nosso conhecimento, “todos os cisnes são brancos”! Poderíamos considerá-la como uma espécie de *ganso* maior que o normal, ou mesmo uma nova espécie de ave aquática desconhecida. No máximo, poderíamos registrar a descoberta de uma ave aquática desconhecida, de plumagem preta, que *se parece* com um cisne. Nada além disso. Essa perspectiva só poderia mudar depois de muitas expedições, muitas observações e análises mais detalhadas. Exemplifico.

Pela taxonomia atual, os cisnes são aves da família *Anserinae*, a mesma família dos patos, gansos e marrecos. Todas são aves *aquáticas*, aves cujo habitat natural são regiões úmidas, como lagos e rios, possuem penas impermeáveis, a capacidade de flutuar na água, voadoras, além de várias outras características peculiares. Existem algumas dezenas de espécies diferentes de patos, gansos e marrecos, mas em geral são aves multicoloridas, de pequeno porte (raramente atingindo 1m de altura). Os cisnes, entretanto, são aves monocromáticas e de grande porte, podendo atingir os impressionantes 1,70m de altura e 3m

⁸⁶¹ Veja a discussão sobre essa regra no cap. 12, volume I.

de envergadura das asas. Na suposição feita no parágrafo anterior, seria somente depois de muitas observações e induções que se poderia chegar a um quadro das características gerais dessa espécie de ave negra desconhecida, e se concluir que elas possuem todas as características dos cisnes (ou a maior parte), exceto a cor branca. Somente nesse momento, jamais antes, alguém poderia concluir, ou supor, “há cisnes negros”.⁸⁶² Ainda assim, essa eventual conclusão descartaria a proposição inicial “todos os cisnes são brancos” como falsa e desnecessária? Na verdade, não. Isso apenas “ajustaria” a proposição inicial, tornando-a mais exata. Em vez de dizer “todos os cisnes são brancos”, diríamos algo como “*a maioria* dos cisnes são brancos”. Ou ainda, “todos os cisnes são brancos ou negros”.

Será útil tentar escrever o procedimento descrito acima de uma maneira simbólica.⁸⁶³ Admita que a proposição “todos os cisnes são brancos” seja escrita como $C \rightarrow a$ (Se é cisne, então é uma ave branca)⁸⁶⁴. Se a observação de cisnes negros (ou melhor, aves negras que tem as mesmas propriedades dos cisnes exceto a cor branca) se repetisse suficientemente, uma nova generalização ocorreria, e então teríamos um ajuste na proposição inicial, que se tornaria: $C \rightarrow (a \vee b)$, onde b significa “ave negra”. Essa última proposição também poderia ser escrita como “todos os cisnes da espécie 1 são brancos” e “todos os cisnes da espécie 2 são negros”.

$$C_1 \rightarrow a$$

$$C_2 \rightarrow b$$

Resumindo, a hipótese inicial não foi descartada; apenas “ajustada”. De $C \rightarrow a$ tornou-se $C_1 \rightarrow a$. Somente o nível de generalidade da hipótese se tornou menos abrangente do que inicialmente concebido.

⁸⁶² Esse ponto é discutido em mais detalhes no cap. 9 e 12, volume I. Aqui não estamos falando acerca de como os cientistas pensam, ou como a ciência procede ou deveria proceder; estamos falando de *como todos pensamos*. A forma natural de elaboração do nosso conhecimento.

⁸⁶³ Nos desenvolvimentos simbólicos dessa seção não pretendo fazer uma formalização lógica rigorosa. Até porque, como o leitor poderá avaliar por si mesmo, não acredito que os raciocínios que serão simbolizados podem ser adequadamente representados pela lógica clássica. Essa tentativa de formalização rigorosa, portanto, ficará pendente para futuros trabalho. De todo modo, será útil uma representação simbólica preliminar.

⁸⁶⁴ Estou ciente que a notação $P \rightarrow Q$ nem sempre é a mais conveniente para expressar uma proposição universal. Isso é facilmente notado quando P representa um indivíduo particular. Por exemplo, a proposição “Se é Sócrates, então é filósofo” não é traduzida adequadamente por “Todo Sócrates é filósofo”. Essa tradução gera ambiguidades. Mas penso que não é o caso quando P se refere a um termo que representa não um indivíduo particular, mas um grupo de seres como, por exemplo, “cisne”. Nesse caso específico, penso que a proposição “Se é cisne, então é branco” pode ser traduzida por “Todos os cisnes são brancos” sem maiores problemas. Portanto, em razão dos objetivos modestos que vislumbro para esse capítulo, dispense a utilização de uma linguagem mais precisa, como a linguagem de predicados de primeira ordem.

Não é difícil perceber que o procedimento do parágrafo anterior poderia se repetir indefinidamente, e sempre teríamos a proposição inicial como verdadeira em certo grau de generalidade. À medida que se acumulam exceções, que depois são generalizadas, novos ajustes são feitos e a proposição inicial se torna mais exata que a anterior. A Regra 4 apenas procura reproduzir a maneira natural de construirmos os conhecimentos sobre o mundo. E disso decorre que o tipo de falseamento proposto por Popper no seu exemplo simplesmente não é possível. Não é possível que uma proposição que descreve a observação de um evento particular falseie uma proposição geral obtida por indução. Elas possuem níveis epistêmicos distintos. Sequer seria possível conceber essa proposição particular. De maneira semelhante, mesmo uma proposição geral obtida por indução (como a hipótese “há cisnes negros”) também não pode falsear outra proposição geral obtida por indução; pode apenas ajustá-la. Volto a esse ponto mais adiante.

O que interessa por ora é perceber que, embora uma *proposição geral* obtida por indução não possa ser falseada, uma *proposição particular* (ou melhor, uma proposição que descreve uma situação particular no mundo) pode. Considere, a título de exemplo, duas das espécies conhecidas de cisnes com plumagem branca, o chamado *cisne-branco* (*cygnus olor*) e o *cisne-trombeteiro* (*cygnus buccinator*). Essas espécies de cisnes são bastante parecidas, mas possuem características distintivas na cor do bico, no som que produzem, na forma como o pescoço fica posicionado sobre a água, entre outras. Na fase juvenil, essas duas espécies podem ser facilmente distinguidas pela cor dos pés. O *cisne-branco* tem pés cinza-escuro, e os *cisne-trombeteiro* tem pés amarelos. Chamemos essas duas espécies, respectivamente, de $C_{1.1}$ e $C_{1.2}$. Nesse caso, teríamos:

$$C_{1.1} \rightarrow a$$

$$C_{1.2} \rightarrow a$$

Onde a é *ave branca*. Considere, adicionalmente, que se queira determinar, numa situação particular, qual das duas espécies de cisne é o caso. O leitor, naturalmente, diria que é possível eliminar uma hipótese falsa observando os pés do cisne particular. De modo simbólico, chamemos de c e d as propriedades *pés-cinza* e *pés-amarelos*, das duas espécies de cisnes respectivamente. Teríamos, então, as proposições gerais:

$$C_{1.1} \rightarrow (a \wedge c)$$

$$C_{1.2} \rightarrow (a \wedge d)$$

As propriedades *c* e *d* (*pés-cinza* e *pés-amarelos*) são mutuamente excludentes porque se baseiam em outras propriedades gerais, *cinza* e *amarelo*, também construídas por indução, e, por esse preciso motivo, plenamente distinguíveis.

Considere, agora, que, ao avistar um cisne branco num lago, alguém cogite duas hipóteses possíveis, H_1 e H_2 , “a ave no lago é um *cisne-branco*” ($H_1 = C_{1.1}$), ou “a ave no lago é um *cisne-trombeteiro*” ($H_2 = C_{1.2}$). Naturalmente, se H_1 for o caso, então temos que $H_1 \rightarrow (a \wedge c)$, e se H_2 for o caso, temos $H_2 \rightarrow (a \wedge d)$. Suponha, ainda, que pela observação se registra que na situação concreta temos as propriedades $a \wedge d$ (cor branca e pés amarelos). Logo, a hipótese H_1 (*cisne-branco*) é falsa. Uma proposição que descreve uma situação particular pode perfeitamente ser falseada com o auxílio de proposições gerais estabelecidas por indução. Resumindo o argumento simbolicamente:

$$\begin{array}{c} H_1 \rightarrow (a \wedge c) \\ H_2 \rightarrow (a \wedge d) \\ \hline (a \wedge d) \therefore (a \wedge \neg c) \\ \neg H_1 \end{array}$$

Onde $c = \neg d$ ou $d = \neg c$. A hipótese de que o cisne particular observado no lago é um *cisne-branco* foi eliminada, ou falseada. Naturalmente, se a hipótese em questão fosse chamada de P , e as consequências dessa hipótese Q (as características do *cisne-branco*), então teríamos, trivialmente, o modus tollens:⁸⁶⁵

⁸⁶⁵ É preciso lembrar, todavia, que, em primeiro lugar, P aqui não é um enunciado universal, mas o enunciado de uma situação particular. Em segundo lugar, que Q é obtido por meio enunciados universais estabelecidos por indução. E em terceiro lugar, que o enunciado de observação que é utilizado para o teste da hipótese só pode assentado de modo objetivo levando-se em conta os enunciados universais estabelecidos por indução que estão pressupostos no argumento. Por essa razão talvez seja mais conveniente construir o argumento explicitando-se todos esses pontos. Seja P e R duas hipóteses e Q e S conjuntos específicos de consequências dessas hipóteses associadas a leis gerais estabelecidas por indução, que são suficientes para identificar inequivocamente as duas hipóteses e, portanto, mutuamente excludentes. Então, uma hipótese P pode ser falseada se:

$$\begin{array}{c} P \rightarrow Q \\ R \rightarrow S \\ \hline S \therefore \neg Q \\ \neg P \end{array}$$

$$\frac{P \rightarrow Q \quad \neg Q}{\neg P}$$

Alguém poderia perguntar por que não se poderia considerar simplesmente que houve a *confirmação* de que a subespécie H_2 era o caso, em vez do falseamento de H_1 . Porque para isso deveríamos ter uma bicondicional na primeira premissa geral $H_2 \leftrightarrow (a \wedge d)$, e não $H_2 \rightarrow (a \wedge d)$. Ou seja, pode haver outra espécie de cisne, ou até outro gênero de ave aquática branca, que tenha pés amarelos e não seja um cisne. Mas caso seja um cisne, certamente não será da espécie proposta por H_1 (*cisne-branco*). O argumento é capaz de *falsear* a hipótese H_1 , mas não de *confirmar* hipótese H_2 . Isso até poderia acontecer somente se todas as aves brancas observadas fossem cisnes, e não houvesse qualquer outra espécie conhecida de cisne, o que produziria, por indução, as premissas:

$$H_1 \leftrightarrow (a \wedge c)$$

$$H_2 \leftrightarrow (a \wedge d)$$

Nesse caso, seria possível considerar legítima a conclusão de que uma ave branca com a propriedade d (pés-amarelos) implica necessariamente na espécie de *cisne-trombeteiro* (H_2). Porém, não podemos esquecer que as premissas gerais acima são generalizações indutivas, e assim sendo elas podem ser revisadas, tornando-se mais exatas. Desse modo, a qualquer momento novas generalizações podem fazer com que a bi-implicação se modifique, tornando-se uma implicação de sentido único, ao revelar novos gêneros de aves brancas, ou mesmo outras espécies de cisnes. Rigorosamente falando, portanto, não teríamos confirmação definitiva, mas a hipótese falseada continuaria eliminada.

Seguindo esse mesmo procedimento, o processo de eliminação das hipóteses pode prosseguir. Imagine, por exemplo, que houvesse outra espécie de ave G com as mesmas propriedades do *cisne-trombeteiro* elencadas acima, a e d (plumagem branca e pés amarelos). E que houvesse *somente* esses dois tipos de aves conhecidas com essas propriedades. Obviamente, a observação dessas duas propriedades numa ave eliminaria a hipótese H_1 (*cisne-branco*), mas não implicaria imediatamente em H_2 . Restariam duas hipóteses. Em símbolos:

$$H_2 = C_2 \rightarrow (a \wedge d)$$

$$H_3 = G \rightarrow (a \wedge d)$$

$$(a \wedge d) \leftrightarrow (G \vee C_2)$$

$$\frac{a \wedge d}{H_2 \vee H_3}$$

A ave em questão pode ser tanto da espécie C_2 quanto da espécie G . Como se decidiria entre as duas possibilidades? Como se eliminaria uma das hipóteses nesse caso? Ora, nessa situação seria necessário consultar as propriedades gerais que em algum momento foram usadas para se distinguir as espécies G e C_2 , digamos, *gansos* e *cisnes-trombeteiros*. Suponhamos que, sem prejuízo que hajam outras propriedades, uma delas seja o tamanho do pescoço. Os cisnes têm a propriedade e (pescoço longo), e os gansos têm a propriedade f (pescoço curto). Teríamos, portanto:

$$H_2 = C_2 \rightarrow (a \wedge d \wedge e)$$

$$H_3 = G \rightarrow (a \wedge d \wedge f)$$

$$(a \wedge d) \leftrightarrow (G \vee C_2)$$

$$\frac{(a \wedge d \wedge e)}{\neg G}$$

$$\neg G$$

$$C_2$$

A hipótese de que o caso em particular pudesse se tratar de um *ganso* (G) foi eliminada. Além disso, a ausência de qualquer outra hipótese de uma ave branca com as propriedades $(a \wedge d \wedge e)$ torna *confirmada* a hipótese de que a ave é um *cisne-trombeteiro* (C_2). Não digo que se mostrou que a hipótese é *verdadeira*, uma vez que as proposições gerais sempre podem ser revisadas, tornando-se mais exatas; mas *confirmada*, posto que é compatível com certas propriedades e condições consideradas verdadeiras, e não resta qualquer hipótese alternativa a ser eliminada. Em outras palavras, a hipótese pode ser considerada pelo menos *aproximadamente verdadeira*.

Alguém poderia objetar dizendo que para fazermos uma tal eliminação das hipóteses temos que ter predefinido um quadro amplo de proposições gerais para lançar mão. Verdade. Mas isso não significa que esse quadro precisa estar completo. Considere, por exemplo, que na situação concreta inicialmente discutida – qual das espécies de cisne, *cisne-branco* ou *cisne trombeteiro* (C_1 e C_2) é o caso – nós não tenhamos acesso empírico aos pés das aves,

posto que elas estão flutuando num lago. Como procederíamos para eliminar a hipótese falsa? Seria possível?

Sem dúvida. Poderíamos explorar as duas espécies de cisnes procurando outras propriedades ainda não conhecidas, até que eventualmente encontrássemos alguma que pudesse servir ao propósito de eliminação. Por exemplo, suponha que nessa investigação dirigida sobre as duas referidas espécies de cisnes descobriu-se uma característica até então desconhecida do *cisnes-brancos*. Além dos pés cinza-escuro, eles têm parte do bico amarelo, enquanto que o *cisne-trombeteiro* tem o bico todo preto. Tratar-se-ia de uma propriedade encontrada a posteriori, também por indução, mas que foi estabelecida com o propósito específico de confirmar ou falsear uma hipótese de um caso concreto. Portanto, esse processo não depende que se tenha um quadro completo das propriedades dos corpos. Sempre que preciso, pode-se explorar ainda mais as propriedades gerais dos corpos até que se encontre alguma que possa servir ao propósito almejado.

Do que foi exposto até aqui é possível tirar algumas conclusões. Em primeiro lugar, percebe-se que é possível proceder eliminação de uma hipótese. Não o falseamento de uma proposição geral por meio de uma proposição que descreve uma situação particular, como no exemplo de Popper ilustrado anteriormente. Justamente o contrário: é possível falsear uma hipótese que descreve uma situação particular com o auxílio de proposições gerais estabelecidas por indução. Perceba que problema da *base empírica* é diluído aqui. A base empírica para o falseamento são as proposições gerais estabelecida pela indução. Não há necessidade de apelar para um convencionalismo de base empírica como Popper fez. As proposições gerais obtidas por indução são ao mesmo tempo empíricas, intersubjetivas e consensuais. Da mesma forma, o problema de Duhem (da impossibilidade de se falsear uma hipótese isolada) é diluído aqui. Não temos uma hipótese sendo testada juntamente com um conjunto de outras “hipóteses auxiliares”, como defendeu Duhem. O que temos é uma hipótese sendo testada junto com um conjunto de condições iniciais estabelecidas por indução, que, portanto, devem ser consideradas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras. A hipótese sob teste e as condições iniciais não têm mesmo nível epistemológico. Portanto, insisto, é possível falsear uma hipótese que descreve uma situação particular com o auxílio de proposições gerais estabelecidas por indução.⁸⁶⁶

Tenho consciência que a conclusão acima tem uma série de consequências epistemológicas importantes, mas deixarei essa discussão para mais adiante. No momento,

⁸⁶⁶ O problema de Kuhn (da incompatibilidade falseacionismo com a prática científica efetiva) também pode ser explicado sob a concepção aqui apresentada. Mas não farei isso agora.

importa enfatizar a segunda conclusão do que foi exposto até aqui. As eliminações de hipóteses que Newton empreendeu nos *Principia* são precisamente do tipo esclarecido no parágrafo anterior, portanto são perfeitamente possíveis de serem realizadas.

Considere, por exemplo, que P_2 seja a hipótese dos vórtices, e P_1 seja a hipótese de uma força centrípeta num espaço sem resistência. Ambas as hipóteses são condição suficiente para o movimento orbital geral q . Temos, portanto:

$$P_1 \rightarrow q$$

$$P_2 \rightarrow q$$

Não é possível decidir entre as duas possibilidades. No entanto, suponha que se explore as propriedades adicionais de P_1 e P_2 e se encontre que caso P_1 seja uma força centrípeta *aproximadamente* proporcional a $1/D^2$, teremos a propriedade a (lei das áreas e períodos aproximada), diferentes das propriedades de P_2 , determinadas sob os mais variados tipos de vórtices possíveis, que podemos representar por b . Nesse caso, se a situação particular analisada do movimento orbital planetário revelar as propriedades $q \wedge a$, teremos:

$$P_1 \rightarrow (q \wedge a)$$

$$P_2 \rightarrow (q \wedge b)$$

$$\text{—————} (q \wedge a)$$

$$\neg P_2$$

Onde $a = \neg b$ ou $b = \neg a$. A hipótese dos vórtices está eliminada. Mas isso implica que P_1 é o caso? Como sabemos, não. Como as propriedades $q \wedge a$ são apenas condição necessária, mas não suficiente, para P_1 , nada garante que essa hipótese é o caso. Todavia observando com cuidado o procedimento de Newton será possível perceber que o argumento acima tem um detalhe discrepante em relação ao argumento dos *Principia*. Na verdade, Newton estabeleceu uma bi-implicação na hipótese P_1 (força centrípeta aproximadamente proporcional a $1/D^2$). O argumento mais exato seria:

$$P_1 \leftrightarrow (q \wedge a)$$

$$P_2 \rightarrow (q \wedge b)$$

$$\text{—————} (q \wedge a)$$

$$P_1$$

Qualquer que seja a causa do movimento planetário, ela gera uma força centrípeta aproximadamente proporcional ao inverso do quadrado da distância.

Mas essa conclusão não resolve o problema, pois ainda há várias possibilidades de leis matemáticas que são igualmente condição suficiente para $q \wedge a$ (movimento orbital que obedece aproximadamente a lei das áreas e períodos). Chamemos essas hipóteses de $P_{1.1}$, $P_{1.2}$, $P_{1.3}$, $P_{1.4}$, etc. Então:

$$P_{1.1} \rightarrow q \wedge a$$

$$P_{1.2} \rightarrow q \wedge a$$

$$P_{1.3} \rightarrow q \wedge a$$

$$P_{1.4} \rightarrow q \wedge a$$

Como não é possível eliminar as hipóteses com as propriedades consideradas, explora-se outras propriedades que possam servir a tal propósito. Determina-se que se a hipótese for $P_{1.1}$ (força centrípeta *exatamente* proporcional ao inverso quadrado), então haverá a propriedade adicional c (ausência de precessão nas órbitas). Se as hipóteses forem as demais, haverá a propriedade d (precessão das órbitas). Se a observação do caso concreto revelar as propriedades $q \wedge a \wedge c$, então estarão eliminadas as hipóteses $P_{1.2}$, $P_{1.3}$, $P_{1.4}$, etc. A hipótese $P_{1.1}$ estará *confirmada*.

$$P_{1.1} \rightarrow (q \wedge a \wedge c)$$

$$P_{1.2,3,\dots} \rightarrow q \wedge a \wedge d$$

$$\frac{q \wedge a \wedge c}{\neg P_{1.2,3,4,\dots}}$$

As hipóteses alternativas $P_{1.2,3,4,\dots}$ foram eliminadas. Hipótese $P_{1.1}$ foi *confirmada*.

No argumento acima o leitor poderá notar que se poderia escrevê-lo como bi-implicações. A eliminação das hipóteses na etapa anterior não permite outras hipóteses alternativas além dessas. Portanto, ele também poderia ser escrito como:

$$P_{1.1} \leftrightarrow (q \wedge a \wedge c)$$

$$\begin{array}{c}
 P_{1,2,3\dots} \leftrightarrow Q \wedge a \wedge d \\
 \hline
 Q \wedge a \wedge c \\
 P_{1,1}
 \end{array}$$

Dos argumentos expressos acima (com a bi-implicação) o leitor pode ser levado a supor que, com o uso da matemática, Newton poderia confirmar diretamente uma hipótese sem a necessidade de eliminar as hipóteses alternativas. Mas aqui é preciso lembrar que o argumento de Newton não termina nesse ponto. Por exemplo, quando ele considera a hipótese que a causa da força centrípeta (ou da *aceleração centrípeta*) é uma força gravitacional dirigida ao centro dos planetas e do Sol, ele lida apenas implicações simples, e recorre a eliminação das hipóteses alternativas. E segue esse mesmo procedimento para outros graus maiores de generalidade. Ou seja, ainda que considerássemos que Newton procedeu uma confirmação sem recorrer a eliminação de hipóteses alternativas nessa primeira etapa, ele não foi capaz de reproduzi-la em todas as etapas seguintes. Portanto, não é uma regra geral. Mas ainda assim, independente dessa questão, fica claro que a matemática tem um papel importante nessas confirmações, ao qual volto mais à frente.

O que interessa agora é perceber que as considerações dos parágrafos precedentes nos colocam em condições de voltar às questões levantadas no início dessa seção. A primeira questão é se era possível, realmente, eliminar ou falsear as hipóteses. Como vimos, a resposta é afirmativa. De fato, não é possível falsear proposições universais na forma como Popper propôs, mas proposições que expressam hipóteses de situações particulares são faseáveis. A base empírica para o falseamento são as proposições gerais obtidas por indução. Esse é o caso das hipóteses eliminadas que ocorrem nos *Principia*, conforme se mostrou acima. A segunda questão era sobre a *confirmação*. Os três critérios apresentados na seção anterior são, de fato, suficientes para uma confirmação qualitativa? O que significa, precisamente, “confirmar” uma hipótese na exposição feita até aqui? Qual é a natureza dessa confirmação de que estamos falando? A essa altura acredito que já se começou a delinear uma resposta para essas questões, no entanto será útil abordá-las em separado.

18.3 CONFIRMAÇÃO E INDUÇÃO

Nas seções anteriores afirmei que Newton está trabalhando com *confirmação qualitativa* nos *Principia*, e que essa confirmação se baseia em três critérios: a hipótese causal deve predizer o fenômeno que pretende explicar; deve ser compatível com certas condições

iniciais consideradas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras; e deve ser *única*, restando as outras hipóteses alternativas eliminadas. Vamos analisar, agora, se essas três condições são, de fato, suficientes para a defesa de um confirmacionismo. Além disso, e principalmente, estamos em condição de discutir a natureza mais exata dessa *confirmação* que aqui se tem apresentado.

Começemos com um evento simples do cotidiano que seja análogo às hipóteses investigadas nos *Principia*. O exemplo de uma hipótese *causal*. “O fogo causa calor”. Afirmamos e acreditamos, sem embargo, nessa proposição. Mas como chegamos à essa conclusão? O que fundamenta a nossa convicção?

Naturalmente, chegamos a essa conclusão por meio de uma generalização indutiva. Como Hume ensinou, observamos durante um grande número de vezes a conjunção constante entre o fogo e calor e, da mesma forma, a ordem temporal do fogo sempre antes do calor, e daí concluímos que o fogo causa calor. Em suma, as nossas noções simples sobre a causa de fenômenos são estabelecidas pela *indução*. Já sabemos que uma proposição como essa não se justifica do ponto de vista lógico, mas ainda assim pode ser considerada aproximadamente verdadeira.⁸⁶⁷ No caso em tela, a relação entre o fogo e o calor pode ser escrita, convenientemente, como: *Fogo* $\rightarrow$ *calor*. Se há fogo, então há calor. O fogo é condição suficiente de calor. E se, além de ser condição suficiente do calor, o fogo também sempre ocorrer em precedência temporal em relação ao calor, então afirmamos com convicção que o “fogo *causa* calor”.⁸⁶⁸

Mas ignoremos por ora a questão da ordem temporal. Nesse caso, a proposição “o fogo causa calor” pode ser representada simplesmente por:

$$Fogo \rightarrow calor$$

Seguindo o raciocínio e a essa ressalva da seção anterior, a proposição acima pode ser entendida como “todo fogo causa calor”.⁸⁶⁹ Dessa perspectiva, a proposição significa que “todo fogo causa calor”, mas não que “todo calor é causado pelo fogo”. Há outros fenômenos que também podem produzir calor, além do fogo. No entanto, suponhamos que em todas as observações que fizemos o fogo gerou calor, e o calor foi gerado pelo fogo, sem exceção.

⁸⁶⁷ Veja especialmente a seção 12.2, volume I. Volto a essa questão na seção 18.5.

⁸⁶⁸ Estou assumindo aqui uma noção simplificada de causalidade inspirado nas reflexões de Hume. Acredito que a construção da noção de causa a partir da indução seja um pouco mais complexa que isso. Mas essa noção simplificada já servirá para os meus objetivos nesse trabalho.

⁸⁶⁹ Veja a nota 864.

Nesse caso, por indução, diríamos que “todo fogo gera calor, e todo calor é gerado pelo fogo”, e a proposição acima seria expressa como:

$$\text{Fogo} \leftrightarrow \text{calor}$$

O fogo é condição necessária e suficiente do calor. Se há fogo, então há calor. Se há calor, necessariamente há fogo. Note que nesse caso não diríamos apenas que o “fogo causa calor”; diríamos que o “fogo é *a* causa do calor”. Todo fogo gera calor e todo calor é gerado pelo fogo.

É claro que sabemos que há outros fenômenos que igualmente causam calor. Mas eles não são necessariamente conhecidos de imediato. Suponhamos que pela nossa experiência limitada dos fenômenos pensemos inicialmente que todo calor é gerado pelo fogo. Tão logo se amplie o campo da nossa experiência, e novas generalizações sejam feitas, as proposições “todo fogo gera calor e todo calor é gerado pelo calor” se tornam mais exatas. A bi-implicação acima torna-se uma implicação simples, ao lado de várias outras possibilidades que também causam calor, obtidas por indução. Por exemplo:

$$\begin{aligned}\text{Fogo} &\rightarrow \text{calor} \\ \text{corrente elétrica} &\rightarrow \text{calor} \\ \text{atrito} &\rightarrow \text{calor} \\ \text{movimento} &\rightarrow \text{calor}\end{aligned}$$

E a lista acima pode aumentar indefinidamente.

Mas a nossa mente não se contenta com esse estado de coisas. Depois de termos uma lista de fenômenos que causam o calor, imediatamente começamos a nos perguntar sobre a “verdadeira” causa do calor, que acreditamos ser uma única. Começamos a procurar algo que existe em comum em todos esses fenômenos, e que seja, em última instância, *a* causa do calor. Suponhamos que em todos os fenômenos listados acima, há um evento intermediário em comum, notado *a posteriori* por uma técnica e equipamentos mais sofisticados. Percebemos que o evento em comum em todos os casos é o *aumento da vibração dos átomos* do corpo. Em cada um dos fenômenos acima se percebe que há em comum o aumento da vibração dos átomos do corpo, portanto, por indução, é estabelecida uma nova conclusão:

$$\text{aumento da vibração dos átomos} \leftrightarrow \text{calor}$$

Voltamos, novamente, à bi-implicação. Diríamos, agora, que “o fogo causa calor”, mas que “o aumento da vibração dos átomos é *a* causa do calor” – a verdadeira causa. Nada impede, não obstante, que o mesmo processo apresentado acima se repita novamente. Novas generalizações podem ser feitas com o aumento do campo da experiência, a bi-implicação se torna uma implicação simples, e uma causa mais essencial passa a ser buscada novamente. Mas caso contrário, o *aumento da vibração dos átomos* permanece sendo *a* causa do calor. Além disso, essa conclusão não desfaz as generalizações realizadas anteriormente, apenas as tornam mais exatas. Em vez da lista acima, teríamos uma nova configuração:

Fogo → *aumento da vibração dos átomos* ↔ *calor*
corrente elétrica → *aumento da vibração dos átomos* ↔ *calor*
atrito → *aumento da vibração dos átomos* ↔ *calor*
movimento → *aumento da vibração dos átomos* ↔ *calor*

O que há em comum em todos os fenômenos que geram calor acima – fogo, corrente elétrica, atrito, movimento – é o fato de terem a vibração dos átomos aumentada, ainda que por razões diversas. Essa é a verdadeira causa do calor.

É claro que o fogo, calor e vibrações dos átomos aqui não é o exemplo mais oportuno, porque é questionável que essas vibrações dos átomos sejam detectáveis empiricamente. Mantive o exemplo apenas para conservar a analogia com o exemplo de Hume. Mas o argumento poderia ser perfeitamente refeito para situações em que se evita esse problema. Por exemplo, a causa do som. Inicialmente, a partir da experiência alguém poderia constatar que o choque entre objetos causa o som. Mais adiante, com a ampliação do campo da experiência, que a vibração dos objetos causa o som. Por fim, que a vibração do ar é a causa do som. Nesse caso, não temos o mesmo problema do exemplo do fogo. Temos instrumentos capazes de detectar vibrações no ar. Portanto, a conclusão do exemplo do fogo se mantém, ainda que não seja o exemplo mais adequado.

Retornando ao ponto, penso que o processo apresentado nos parágrafos acima representa bem como o conhecimento das causas é estabelecido de modo natural. Para ser considerado *causa possível* (ou parte da cadeia causal) o evento deve ser *condição suficiente* para o fenômeno. Para ser considerado *a causa* do evento – a verdadeira, a causa próxima – ela deve ser considerada condição necessária e suficiente. Como se chega nessa última conclusão? Simples. Ou eliminando as outras causas possíveis, ou retirando de um conjunto

de causas possíveis uma causa mais essencial, que seja comum a todas as outras. Em outras palavras, somente quando temos *uma única causa possível*, podemos assumi-la, por indução, como condição necessária e suficiente, e, portanto, como a verdadeira causa do evento.

Alguém poderia levantar uma objeção ao parágrafo anterior enfatizando que o procedimento de “eliminar causas possíveis” e aquele de “encontrar uma causa mais essencial a partir de causas possíveis” são dois procedimentos distintos. Concordo. Quando alguém se propõe a investigar “a causa do calor”, essa investigação pode ter dois sentidos bem distintos. Primeiro, pode significar a investigação da causa de *um* calor, em particular, como a causa do calor percebido numa determinada piscina de água natural. Tratar-se-ia da investigação de um evento particular no mundo que, por alguma razão, falta-nos informações. Em segundo lugar, a referida investigação pode significar a busca da causa do calor, *em geral*; ou seja, a busca da causa essencial do fenômeno que chamamos *calor*. São duas investigações bem distintas. Mas enfatizo que a resolução das duas situações ocorre de maneira muito similar.

No primeiro tipo de investigação – de um evento em particular – se conhecem várias *causas suficientes* do calor (fogo, corrente elétrica, atrito, movimento, materiais fundidos, etc) e o objetivo é saber qual dessas causas possíveis corresponde ao caso em particular. Com o auxílio de outras propriedades – ou efeitos – decorrentes de cada causa possível (condições iniciais), pode-se eliminar causas que não são compatíveis com a situação até restar uma única. Nesse caso, o fenômeno restante – por exemplo, um material magmático – pode ser considerado a condição suficiente *e necessária* para a produção daquele calor em particular, e, portanto, *a* causa do calor em questão. No segundo tipo de investigação – a causa do calor *em geral* – procura-se o que há de em comum em todas as causas suficientes de calor para se estabelecer a sua causa mais essencial, que também deve ser suficiente e necessária para a produção do calor, conforme já se evidenciou nos diagramas apresentados mais acima. Portanto, embora sejam dois tipos de investigação de causas distintas, a resolução de ambas é semelhante. Elas terminam quando se chega numa causa única para o fenômeno considerado.⁸⁷⁰

⁸⁷⁰ Não é difícil perceber que os dois tipos de investigação acima se complementam. Em especial, o avanço da investigação das causas dos fenômenos em geral, alimenta a elaboração dos elementos necessários para inferir as causas dos eventos particulares do mundo. O segundo tipo de investigação citada parece hoje estar intimamente ligado ao objetivo das ciências mais essenciais, que investigam as causas gerais dos fenômenos da natureza, como a causa da luz, do som, do fogo, do movimento, da eletricidade, e assim por diante. Já o primeiro tipo de investigação parece mais afeito a ciências particulares, como a geologia, meteorologia, oceanografia, etc, que procuram causa de eventos particulares do mundo. Tratar-se-ia de investigações como a causa da chuva, dos terremotos, das rochas, das águas termais, e assim por diante. O papel dessas ciências particulares seria estabelecer *cadeias causais*, a partir dos conhecimentos das ciências mais essenciais. Por exemplo, a causa próxima das águas termais é o material magmático sob a terra; a causa próxima desses materiais magmáticos é a fusão de rochas; a causa próxima da fusão das rochas são as altas temperaturas no interior da Terra; a causa

Voltando aos *Principia*, a primeira questão que poderia ser levantada é sobre qual tipo de investigação de causas que Newton está lidando. A resposta me parece ser *os dois tipos*. Primariamente, Newton se propõe a buscar a causa de um movimento em particular, o movimento dos planetas. Mas para isso ele precisa conhecer as causas dos movimentos *em geral*. Então, ele primeiro investiga as causas dos movimentos em geral, e depois, usa esses resultados para investigar a causa particular dos movimentos planetários. Ao abordar o caso dos movimentos orbitais em particular, ele considera, a princípio, várias causas que seriam condições suficientes para eles. Mas, em seguida, aplica os resultados da sua investigação geral sobre o movimento para eliminar as hipóteses incompatíveis com aqueles fenômenos, até restar uma única possibilidade. Dessas observações é possível perceber que para defender a causa que considera verdadeira para os movimentos planetários, Newton segue estritamente o procedimento natural pelo qual construímos os conhecimentos das causas particulares do mundo. E disso decorre que se não aceitarmos como suficiente a evidência de que uma força gravitacional dirigida para o centro do Sol e dos planetas num espaço livre de resistência é a causa dos movimentos planetários, também não podemos aceitar como suficiente a evidência de “o fogo causa calor”. Os critérios requeridos para a confirmação são rigorosamente os mesmos nos dois casos. Portanto, não há que se cogitar que os critérios de confirmação propostos não sejam, eventualmente, suficientes para *confirmação* de uma hipótese. Caso não sejam, também não temos critérios suficientes para conhecer qualquer outro conhecimento revelado pela experiência.

As considerações do parágrafo anterior já respondem uma das questões que foram levantadas sobre a confirmação no início da seção. Os critérios de confirmação que foram propostos são suficientes? A resposta é *sim*, porque eles não passam dos critérios que usamos para estabelecer qualquer outro conhecimento sobre as causas no mundo, mesmo os mais simples e imediatos. Caso não aceitemos esses critérios como suficientes, não podemos aceitar a proposição “o fogo causa calor” como um conhecimento estabelecido. É verdade que alguém poderia se aventurar a questionar a própria validade de conhecimentos como “o fogo causa calor”, e assim questionar os critérios de confirmação propostos. Isso nos leva à segunda questão que encaminhei no início da seção. O que significa, exatamente, *confirmar* uma hipótese? Qual é a natureza dessa confirmação? Qual é o estatuto desse conhecimento

próxima das altas temperaturas no interior da Terra são as emissões radiativas de certos materiais presentes no interior da Terra, e assim por diante. Algumas ciências mais essenciais se ocupam em determinar as causas dos fenômenos, de maneira geral; outras ciências aplicam essas causas e efeitos catalogados para determinar a causa de eventos em particular no mundo, formando as cadeias causais que lhe interessam. A caracterização completa dessa análise da causalidade reservei para o segundo um estudo em separado, portanto não será apresentado.

que professamos ter quando expressamos “o fogo causa calor”? Ele deve ser entendido como uma “hipótese”, como “verdadeiro”, “aproximado”, ou o que?

Esse é o ponto crucial da presente discussão, que espero que sirva para estabelecer essa compreensão de modo suficientemente claro. É certo que não consideramos a proposição “o fogo causa calor” como uma *hipótese* no mesmo sentido que a proposição *os vórtices causam o movimento planetário*, ou *a causa das altas temperaturas no interior da Terra é a desintegração de isótopos radiativos*. Acerca disso, diríamos que a proposição “o fogo causa calor” nós *sabemos*. Temos certeza. A causa das altas temperaturas no interior da Terra, *não sabemos*; ou *não temos certeza*. São proposições de níveis epistêmicos diferentes. O fogo gerar calor é considerado por nós como um *fato*. Os vórtices serem a causa do movimento planetário não é entendido por nós como um *fato*; é apenas especulação. Em outros termos, alguém poderia dizer que no caso do fogo e calor temos *acesso empírico direto*, enquanto que nas outras duas situações não temos. Por essa razão seriam apenas hipóteses.

Mas se aceitarmos que a diferença entre os dois tipos de proposições acima é que no caso do fogo temos *acesso empírico direto*, seremos forçados a admitir que *todos* os conhecimentos obtidos pelo *acesso empírico direto* são, na verdade, resultados da indução. O que vimos ao longo dessa seção é que a proposição “o fogo causa calor” é estabelecida por indução. No entanto, isso não seria verdadeiro apenas para as proposições que indicam a causa de um fenômeno. Todas as proposições empíricas particulares seriam estabelecidas da mesma forma, por meio de generalizações indutivas. Não é possível afirmar a proposição empírica particular “há um cisne branco” se, antes, por indução, não for estabelecido que “*todos* os animais com tais características são *aves*”, e, depois, que “*todas* as aves com tais características são *cisnes*”, e, depois, que “*todas* as impressões visuais com tais características são *branco*”, e, depois, que “*todos* os cisnes com tais características são *cisnes brancos*”, e, por fim, que “há uma ave particular com as mesmas propriedades dos cisnes brancos”, e, portanto, por indução, “há um cisne branco”. Admitir que a diferença epistêmica entre as proposições do parágrafo anterior é o *acesso empírico direto* implica em admitir que todo conhecimento empírico é constituído, no final das contas, por indução.

Acolher a premissa do parágrafo anterior leva a consequências cujo alcance não pode ser suficientemente desenvolvido nesse trabalho. Mas basta enunciar uma das principais consequências, que pode ser sintetizada em uma única sentença: *a indução é condição para o conhecimento*. Caso as percepções empíricas não sejam, antes, submetidas à indução, sequer podem ser admitidas como *conhecimento*. Sequer poderiam ser *reconhecidas*. Reconhecer um objeto da percepção é necessariamente enquadrá-lo sob certas categorias universais e gerais

pré-estabelecidas por indução. Se tivermos acesso empírico a algo que não se enquadre em qualquer categoria geral previamente estabelecida, tal objeto simplesmente não poderá ser identificado com qualquer coisa; não será reconhecido, até que outras generalizações tornem possível eventualmente criar uma nova categoria na qual ele se enquadre. A indução não é um *procedimento*, não é um *método*, não é uma *inferência lógica*; a indução é a própria *condição para a possibilidade do conhecimento*. Todo conhecimento é estabelecido por indução. Como o próprio Newton afirmou na Regra 3, esse é o “princípio de toda filosofia”, ou o princípio de todo o conhecimento.⁸⁷¹

Por essa razão, uma proposição como “os vórtices causam o movimento dos planetas” não tem o mesmo nível epistêmico que “o fogo causa calor”. A primeira é um conhecimento meramente *possível*. É uma *hipótese*. A segunda é um conhecimento *estabelecido*. Pode-se dizer: *confirmado*. O primeiro é um conhecimento *possível* porque, pela indução, já foi estabelecida uma categoria de movimentos orbitais gerado por movimentos vorticiais de líquidos. No entanto, não houve a observação de um número significativo de propriedades e efeitos diversos dessa categoria no caso concreto para que, por indução, a hipótese pudesse ser estabelecida. Em outras palavras, a hipótese não foi *confirmada*. Foi satisfeita a *condição de possibilidade do conhecimento*, mas não a *condição de estabelecimento do conhecimento*. Para que isso ocorresse, a experiência deveria mostrar que boa parte das propriedades dos vórtices obtidas por generalização indutiva também está presente nos movimentos planetários (não apenas o movimento orbital), e então, novamente por indução, a hipótese seria confirmada.⁸⁷²

O que foi desenvolvido até o momento já é suficiente – acredito – para ilustrar o que se está entendendo por “confirmação” aqui. “Confirmar” é satisfazer a condição do conhecimento. “O Sol nasce todos os dias” é considerado um *fato* porque satisfaz a condição do conhecimento: a indução. Se alguém levanta uma hipótese que “o eco só ocorre em grandes cavernas”, esse enunciado permanecerá como uma hipótese até que, pela repetição da experiência, perceba-se o eco somente nas cavernas grandes. Nesse momento a hipótese estará confirmada. Por que? Porque satisfaz a condição do conhecimento, que é a indução. Como já sabemos, isso não significa que a hipótese é absolutamente verdadeira; significa que é, pelo menos, aproximadamente verdadeira. Ela pode ser ajustada e se tornar mais exata; mas jamais eliminada como falsa. Ela sempre estará captando uma regularidade local da natureza.

⁸⁷¹ Naturalmente, há muito mais a ser dito e explorado sobre o conteúdo desse parágrafo. Contudo, não será feito no presente trabalho.

⁸⁷² Utilizo um conceito de indução bem flexível nesse trabalho. Não pretendo assumir um conceito específico, e menos ainda tentar defini-lo aqui. Mantenho propositadamente esse conceito em aberto.

O grau de generalidade dessa regularidade pode variar, mas a regularidade em si é verdadeira. A indução é condição do conhecimento.

Acredito que essas observações são suficientes para esclarecer as questões propostas inicialmente. O que é a *confirmação* que Newton tem em mente, e porque os critérios propostos são suficientes para uma confirmação *qualitativa*. Outras questões, no entanto, surgem a partir do que foi discutido. Uma delas é até que ponto esse entendimento de confirmação poderia funcionar para lidar com hipóteses de eventos irrepetíveis, como “um raio atingiu a torre da igreja na noite passada”. Nesse caso não poderíamos repetir a experiência inúmeras vezes (como no caso do fogo e do calor) até que, por indução, pudéssemos confirmar a hipótese. Se a indução é o fundamento da confirmação, como lidar com hipóteses desse tipo? A segunda questão é sobre o papel da matemática nesse procedimento. Se a ciência para Newton não passa, no final das contas, de conhecimentos estabelecidos de modo natural, por indução, que papel teria a matemática? Não seria ela notadamente supérflua? Como veremos a seguir, a resposta a essa última questão é negativa. Analisemos essas duas questões na próxima seção.

18.4 CONFIRMAÇÃO, CONVERGÊNCIA E MATEMÁTICA

Na seção anterior foi defendido que o fundamento mais essencial do confirmacionismo de Newton é a indução. A indução é condição para o conhecimento. Quando alguém propõe uma hipótese de que o eco ocorre somente em cavernas grandes, essa hipótese é confirmada observando a repetição do eco somente em tais cavernas, o que produz uma generalização indutiva que satisfaz a condição do conhecimento. Esse entendimento, no entanto, levanta uma questão sobre como a confirmação funcionaria para eventos que não se repetem. No fim da seção passada foi citado um exemplo de uma hipótese desse tipo. Diante de um evento desconhecido que ocorreu numa igreja levanta-se a hipótese: “um raio atingiu a torre da igreja”. Como se confirma uma hipótese desse tipo, uma vez que se trata de um evento que não pode ser repetido o quanto se queira?

Naturalmente, poderíamos imaginar uma cena em que se investiga a hipótese da igreja ter sido atingida por um raio. Os investigadores iriam procurar evidências dos efeitos de uma descarga elétrica muito grande. Depois de acumular um conjunto de evidências que são compatíveis com a descarga elétrica, eles chegariam à conclusão de que a torre foi atingida por um raio. Da mesma forma, poderíamos imaginar a cena de uma pessoa sendo baleada na altura do coração. Uma testemunha presencia o evento e confere se há ainda batimento

cardíaco. Na ausência desse, e diante do que viu, imediatamente formula a hipótese de que a vítima morreu. Uma vez que se trata de um evento que não pode ser repetido o quanto se queira, como confirmamos essa hipótese? Haveria indução nesses dois tipos de confirmação? Se há, como exatamente ela poderia ser evidenciada?

Adianto de imediato que a confirmação nesses dois casos está relacionada a aquilo que aqui podemos chamar de “convergência”. Ao considerar a hipótese do raio na torre da igreja, os investigadores verificam que a instalação elétrica da igreja foi toda danificada por uma alta descarga, o estrago ocorrido é compatível com um raio, há pássaros que morreram por eletrocussão, há testemunhas que ouviram um estrondo compatível com o som de um raio, e assim por diante. Cada uma dessas evidências converge para a hipótese do raio. A convergência pode, legitimamente, ser admitida como um critério de *confirmação*.

Antes de discutir a razão para a afirmação acima, vale lembrar que a importância da convergência na ciência foi observada pelo professor Michel Ghins. Ele já havia chamado a atenção para a convergência como um fundamento para o realismo científico.⁸⁷³ Se há uma abelha voando numa sala, questiona ele, qual é o fundamento da nossa crença de que há, realmente, uma abelha voando na sala? Ele esclarece: primeiro, nós podemos constatar a sua presença por diferentes sentidos: visão, audição, tato. É a *intersensorialidade*. Em segundo lugar, podemos constatar a sua presença pelo testemunho de outras pessoas que também percebem a abelha. É a *intersubjetividade*. Por fim, podemos constatar a presença da abelha por outros efeitos indiretos, como *vestígios-de-abelha* (sejam eles quais forem). Perceba que mesmo as experiências sensoriais diretas, por si mesmas, não são capazes de fundamentar a nossa certeza da simples presença de uma abelha na sala. Podemos duvidar do que vimos ou ouvimos. Em contrapartida, é a *convergência* de todos esses elementos que fundamentam a nossa crença, para além de qualquer dúvida razoável. Dizendo agora nos termos que nos interessa: é a convergência desses resultados (visual, auditivo, intersubjetivo, etc) que nos fornece a *confirmação* de que há uma abelha na sala. Não temos dúvida que uma proposição construída por convergência está em um nível epistêmico bem distinto daquelas proposições nas quais não há convergência.

Mas a pergunta chave seria *por quê?* Por que uma proposição construída por convergência tem um nível epistêmico distinto das demais? Por que a convergência seria, também, um critério adequado para confirmação? A resposta é simples. Porque, no fundo, ela não passa de uma espécie de *indução*. Voltemos ao exemplo da pessoa sendo baleada. Depois

⁸⁷³ Ghins, 2013.

de ver a pessoa sendo baleada no peito, à queima roupa, e tendo checado a ausência de batimentos, imediatamente a testemunha formula a hipótese de que a vítima morreu. Em seguida, presencia a chegada de uma ambulância que leva a vítima. Pergunto: as evidências que ela teve – o contato empírico com a vítima – são suficientes para confirmar a sua hipótese que a pessoa morreu? Penso que não. Mesmo tendo visto a cena, pode duvidar do que viu. O ângulo poderia não ser o ideal. Mesmo tendo checado o batimento, não é um especialista, pode ter se enganado. Mesmo que tenha checado de maneira correta, a vítima pode ter sido ressuscitada na ambulância. O contato empírico que teve não é suficiente para confirmar que a pessoa morreu. Experiências isoladas não são capazes de estabelecer um *fato*. Mas suponha que depois a testemunha confirme o que viu com outras testemunhas; no hospital, veja o monitor cardíaco sem batimento; acompanhe os médicos cobrindo o corpo; os familiares chorando; o corpo sendo levado pelo legista; no outro dia, o velório, o corpo no caixão, o enterro, e assim por diante. A morte da pessoa seria ainda uma hipótese para ela? Uma experiência isolada não é capaz de estabelecer um fato, mas um conjunto de experiências convergentes, sim.

O que são essas “experiências convergentes”? Nada mais que indução. Por indução construímos um quadro das “propriedades” da morte. Todas as causas e efeitos da morte. Toda pessoa que morre para de reagir a estímulos; toda pessoa que morre para de respirar, toda pessoa que morre não volta a acordar; a temperatura corpórea diminui, o coração para de bater, não é mais vista nos lugares que frequentava, e a extensa lista continua até onde se queira. Trata-se de uma combinação bem específica de propriedades, e que é única para cada evento ou fenômeno considerado. Toda vez que se percebe um certo conjunto específico de propriedades cuja combinação já possa ser inequívoca, por indução, se admite que todas as outras propriedades também estão presentes e, portanto, temos exatamente *aquele* fenômeno particular, e não outro. A pessoa morreu.

Outra maneira de perceber a indução nessa situação é atentar para a repetição que ocorre a cada elemento convergente. No exemplo do homicídio acima, a morte é condição suficiente para cada um dos eventos que se observa após o ocorrido. Cada evento ou efeito observado é condição necessária para morte, e a repetição desses eventos que são condições necessárias leva inevitavelmente a uma generalização por indução. Não é difícil mostrar que o mesmo acontece no caso da hipótese que “um raio caiu na torre da igreja”, ou que “há uma abelha voando na sala”, ou “há um cisne branco”, ou “esse objeto é um metal”, ou até na hipótese que os planetas são conduzidos por vórtices. A convergência não passa de um

desdobramento da indução. E a indução é a condição do conhecimento. Todo o conhecimento é estabelecido por indução.

O leitor poderá questionar se esse critério não contraria o que foi estabelecido antes, que haveriam três condições para *confirmar* uma hipótese. A minha resposta seria *não*. São duas formas diferentes de enxergar a mesma coisa. Se analisarmos com cuidado os exemplos da convergência apresentados acima, perceberemos que cada um dos elementos convergentes citados são propriedades obtidas por indução, que são consideradas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras. Cada novo elemento convergente que se constata na investigação de um fenômeno elimina um certo número de hipóteses até, por fim, restar uma única. A instalação elétrica danificada por uma corrente elevada na igreja é um efeito que elimina um número grande de hipóteses, mas não descarta outra causa possível além do raio. Pode ter ocorrido um curto circuito. Assim, buscam-se outros efeitos que possam eliminar essa hipótese. E assim por diante. Em outras palavras, tais elementos convergentes podem ser considerados “condições iniciais” verdadeiras, ou aproximadamente verdadeiras, com as quais é possível eliminar as hipóteses alternativas. E, conversamente, o conjunto de condições iniciais verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras podem ser entendidas como as propriedades específicas de um fenômeno, que, caso estejam combinadas, convergem para a sua determinação inequívoca. Os três critérios de confirmação mencionados anteriormente não contradizem o critério aqui estabelecido; são *um* e o mesmo critério. O objetivo de Newton nos *Principia* é simplesmente elevar as hipóteses do movimento planetário à categoria de *conhecimento estabelecido*. Ou melhor, criar um programa de investigação da natureza que possa construir conhecimento *estabelecido*, e não somente *possível*.

Sobre a primeira questão que foi levantada no início da seção, portanto, não há qualquer problema. Mesmo as hipóteses de eventos irrepetíveis são confirmadas da mesma forma que as outras. Convergência e indução são duas faces da mesma moeda. Resta agora a segunda questão. O papel da matemática nesse procedimento de confirmação. Se Newton está simplesmente seguindo o modo natural pelo qual construímos os conhecimentos da experiência, qual seria o papel da matemática? Ela teria algum papel realmente relevante?

Algumas páginas atrás, havia informado sobre uma diferença fundamental entre as “condições iniciais” (ou “propriedades”) que Newton estava usando nos *Principia* e as “condições iniciais” que frequentemente usamos na construção do conhecimento cotidiano. Em ambos os casos se tratam de *proposições gerais* usadas para eliminar hipóteses possíveis. Em ambos os casos a função delas era confirmar uma hipótese particular pela eliminação de outras. Mas a diferença é que nos *Principia* as “condições iniciais” são proposições gerais

matemáticas. Por exemplo, a proposição *todo movimento orbital que obedece a lei das áreas e os períodos está sujeito a uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância* parece ser uma proposição geral que não foi obtida por indução. Isso poderia até sugerir a alguns que seria possível promover uma espécie de *verificação* de hipóteses com o auxílio da matemática. E, de fato, acredito que o nível de evidência que Newton conseguiu com o uso da matemática foi tão grande que deu a alguns, realmente, a ilusão de que fosse possível construir uma ciência totalmente fundada em “verificações”. Mas como vimos, em última análise, essas proposições matemáticas também estão fundadas em princípios formulados por indução. A proposição acima foi retirada da geometria mecânica de Newton que, por sua vez, foi estabelecida usando princípios análogos às leis do movimento, que são igualmente obtidos por indução.

Embora o uso da matemática no processo natural de construção dos conhecimentos do mundo não tenha chegado ao ponto de produzir genuínas *verificações*, não é possível deixar de notar que o tipo de proposição geral ilustrada no parágrafo anterior – uma proposição geral *matemática* – pode impulsionar a eliminação de hipóteses, e consequentemente o estabelecimento de uma hipótese como *conhecimento* – em situações aparentemente inacessíveis aos meios convencionais. Por exemplo: quando Newton conseguiria chegar a proposições gerais que permitiriam eliminar a hipótese dos vórtices e chegar à confirmação da força gravitacional somente pela pura observação? Mesmo que ele pudesse encontrar outras propriedades empiricamente detectáveis nos planetas e satélites, quando tempo isso levaria? Quanto tempo Newton ou qualquer dos seus sucessores levaria para coletar informações sobre planetas e órbitas, precessão de órbitas até que pudessem generalizar essas informações e, consequentemente, usá-las para eliminar as hipóteses alternativas? Décadas? Séculos? Com o auxílio das proposições gerais *matemáticas*, associadas aos fenômenos particulares também *matemáticos*, Newton foi capaz de acelerar esse processo e chegar a uma solução.

Por exemplo, até podemos tentar imaginar a possibilidade de eliminar a hipótese dos vórtices usando propriedades gerais que não sejam *matemáticas*. Da observação dos vórtices vai se criando um quadro de todas as propriedades de efeitos e causas obtidas empiricamente e generalizadas pela indução. Nos vórtices há um movimento orbital; há certa turbulência em certos pontos da trajetória; o movimento aparenta ser mais rápido perto centro; a maior parte dos vórtices apresenta um movimento espiral (talvez haja algum que produza uma órbita estável), e assim por diante. Depois de estabelecer esse quadro de propriedades, passa-se a observação dos movimentos dos planetas e satélites em variados sistemas e galáxias também generalizamos os efeitos e propriedades que eles apresentam. De posse dessas propriedades

podemos verificar se há convergência dessas propriedades com aquelas já estabelecidas para os vórtices em geral. Se houver convergência, está confirmada a hipótese; se não houver, a hipótese está eliminada. O tempo necessário para concluir esses procedimentos já seria difícil de estimar. Mas o maior problema é que como as dimensões dos movimentos planetários são muito grandes quando comparadas com os vórtices da nossa experiência, a eliminação definitiva da hipótese dependeria da observação do comportamento de vórtices gigantes, e ainda com fluidos que podemos sequer conhecer ainda. Ou seja, não haveria qualquer previsão de tempo para a ocorrência dessas experiências. Pode levar um ou mil anos.

Mas suponha, agora, que pela simples observação de uma única das propriedades dos fenômenos astronômicos, facilmente detectável da Terra – o seu *movimento* – nós possamos abreviar o árduo percurso sugerido no parágrafo anterior. Porque o *movimento* pode ser analisado puramente a partir das suas propriedades *matemáticas*, e assim podemos dizer que os fenômenos astronômicos têm, legitimamente, propriedades *matemáticas* que podemos detectar. Diante dessas propriedades matemáticas podemos com muito mais facilidade eliminar hipóteses que não são compatíveis com os fenômenos. Admita, portanto, que dadas as leis do movimento (que também são propriedades matemáticas dos movimentos *em geral*) todo movimento orbital impelido por vórtices (gigantes ou pequenos, sob as mais variadas condições de densidades, velocidades, etc) têm necessariamente as propriedades matemáticas que podem ser resumidas por α , e todo do movimento orbital impelido por uma força centrípeta num espaço sem resistência (sob as mais variadas leis de força) tem as propriedades matemáticas da família β . E admita, também, que pela simples observação dos movimentos dos astros podemos detectar que eles tem as propriedades matemáticas da família β . Disso resulta que os movimentos planetários não podem ser resultado da ação de vórtices. Em outros termos, por meio das propriedades *matemáticas* dos fenômenos temos condições de contornar situações nas quais o estabelecimento de um conhecimento levaria muito tempo para ocorrer e, talvez, dependendo da situação, jamais ocorresse.

Além disso, as proposições matemáticas têm um alto grau de especificidade e, portanto, tem um alto poder de eliminação. Quando usamos como parâmetro para a eliminação de uma hipótese um determinado efeito como o “calor”, certamente uma infinidade de possibilidades são eliminadas, mas restará ainda outra infinidade de possibilidades. Por exemplo, cada um dos mais dos sete bilhões de seres humanos pode ser um objeto que gera calor. A propriedade do “calor”, por conseguinte, não é conveniente para determinar um indivíduo humano específico. Não é uma propriedade específica o suficiente. No entanto, sabemos que há outras propriedades que têm um nível de especificidade muito

maior para essa finalidade, como sexo, altura, cor dos olhos, naturalidade, etc. Há propriedades que possuem um pequeno grau de especificidade e outras que possuem um alto grau de especificidade. As propriedades matemáticas são desse último tipo. Uma vez estabelecidas essas propriedades, o seu poder de eliminação é bastante elevado. Não restarão muitas hipóteses possíveis a serem consideradas. Mas ainda assim o que mais interessa para a eliminação das hipóteses é a *combinação específica* das propriedades, e não uma propriedade isolada. A cada nova propriedade combinada o número de hipóteses possíveis reduz drasticamente. De todo modo, a peculiaridade das propriedades matemáticas faz com que elas sejam proposições com um estatuto privilegiado para serem usadas na confirmação ou eliminação de hipóteses sobre o mundo natural. Elas em nada mudam o modo natural pelo qual o conhecimento é construído. Elas apenas aceleram o processo. São um *atalho*.

Talvez o papel das proposições matemáticas na elaboração do conhecimento pudesse ser comparado ao papel dos *experimentos* (no sentido de hoje). Sabemos que dois elementos tiveram um papel fundamental na revolução científica dos séculos XVI e XVII: o uso de *experimentos* e da *matemática*. A mesma pergunta que foi levantada para o papel da matemática aqui poderia ser levantada para o papel dos experimentos na elaboração do conhecimento. Se a ciência se fundamenta no processo natural pelo qual os conhecimentos cotidianos do mundo são formulados, qual seria o papel dos *experimentos*? A resposta seria a mesma que a da matemática: acelerar a elaboração do conhecimento. Quando se levanta uma hipótese que o eco ocorre somente em grandes cavernas, essa hipótese permanecerá com esse estatuto até que alguém resolva repetir por várias vezes a experiência para chegar numa confirmação. Rigorosamente falando, isso é um *experimento*. É a criação de um ambiente artificial no qual podemos manipular a nossa exposição a determinada experiência, repetindo-a de várias maneiras e o quanto se queira. No caso da hipótese do eco, é claro que num primeiro momento o experimento é rudimentar, não passando de uma mera observação controlada. Mas se depois dessa experiência, alguns contraexemplos levarem alguém a supor que esse eco só ocorre em cavernas grandes e vazias, a experiência avança para um novo estágio. Em seguida, alguém pode levantar a hipótese que o eco só ocorre em cavernas com mais de 17 metros, o que já demandará a utilização de uma estrutura mais sofisticada se expor à experiência, por exemplo, utilizando já equipamentos de medida. Não é difícil perceber que esse processo avança até que tenhamos equipamentos muito específicos para hipóteses muito específicas. Com efeito, aquilo que hoje concebemos como *experimentos científicos*. Parece-me claro que os experimentos nada mais são que situações criadas artificialmente para produzir experiências controladas, para expor o observador a determinadas experiências que

muitas vezes não são tão simples de serem obtida por meios naturais, ou que de outra sorte levariam muito tempo para ocorrer naturalmente. O objetivo básico de um experimento, portanto, não seria obter um conhecimento de natureza diferente de qualquer outro; seria acelerar o processo natural pelo qual elaboramos o conhecimento, tendo em vista um interesse especial em se confirmar determinadas hipóteses que se julgue relevantes. A matemática, não tenho dúvidas, tem um papel semelhante. Construir *atalhos* para confirmar hipóteses relacionadas com conhecimentos que não são tão simples de serem estabelecidos à primeira vista.

Acredito que as considerações realizadas até aqui esclarecem suficientemente os fundamentos do confirmacionismo de Newton. Os critérios de confirmação do método H-D de Newton, a se basear pelos passos dos *Principia*, podem ser compreendidos como *três*, porém, após uma análise ulterior, mostrou-se que não passam dos critérios que utilizamos para acatar qualquer conhecimento que consideramos como um *fato*, por mais simples que seja. A confirmação deve satisfazer o critério indutivo. O método H-D de Newton é construído de modo a satisfazer esse critério indiretamente, por meio da convergência. Além disso, vimos como Newton usa eficientemente as propriedades *matemáticas* dos fenômenos para satisfazer esse critério no caso de uma investigação sobre *causas* em que o nosso acesso empírico é bastante limitado. Esclarecidas essas questões, valerá a pena, agora, abrir uma última seção nesse capítulo para retomar a discussão sobre as implicações dessas descobertas para a filosofia da ciência.

18.5 IMPLICAÇÕES PARA A FILOSOFIA DA CIÊNCIA

18.5.1 Ponderações sobre o problema da indução

Nas seções anteriores se chegou à conclusão que Newton está, de fato, trabalhando com confirmações *qualitativas* nos *Principia*. Sem dúvida o método usado por Newton para estabelecer as causas e as leis é *hipotético-dedutivo*, porém a finalidade desse método é satisfazer o critério indutivo, que pode ser entendido como o critério para estabelecer todo e qualquer conhecimento empírico. Argumentei que caso não se aceite esse critério, também não se poderá aceitar qualquer outro conhecimento empírico, por mais simples e imediato que seja. Na verdade, caso não se aceite esse critério sequer poderíamos falar em *conhecimento*. Talvez o leitor permaneça ainda confuso diante desse ponto, em virtude do já referido *problema da indução*. Se a indução não está justificada em si mesma, como podemos aceitar

que justifique o confirmacionismo de Newton? Como podemos aceitar que justifique o conhecimento em geral, a ciência? Parece que a tese aqui apresentada, além de nada possuir de novidade, retorna a uma questão já superada historicamente pela filosofia da ciência. Mas sobre isso cabem algumas ponderações.

Em primeiro lugar, é necessário que fique bem claro que uma coisa é se perguntar sobre o que fundamenta o confirmacionismo de Newton (e, em tese, a própria ciência em geral); outra coisa é se perguntar sobre o que fundamenta a própria indução. Esses dois domínios devem ser mantidos nitidamente separados. Podemos seguramente concluir que todo o conhecimento empírico tem como fundamento essencial a indução, embora não saibamos o que justifica a própria indução. Ao argumentar que o confirmacionismo de Newton está baseado na indução, estou constatando somente que a indução é o fundamento da base empírica da ciência, restando aberta a questão da sua justificação. E é possível investigar a coerência dessa tese inclusive pelas suas consequências, ou seja, pela resposta que oferece para problemas persistentes da filosofia da ciência. Considere, por exemplo, dois conhecidos problemas da filosofia da ciência: o problema do *impregnacionismo teórico* e o problema dos *experimentos cruciais*. Quando Popper se queixa, na *Lógica*, que um simples enunciado da experiência como “aqui está um copo d’água” já possui uma certa carga teórica⁸⁷⁴, pois “copo” e “água” são termos universais, o problema não é que há uma teoria prévia embutida nesse enunciado, mas que os conceitos de base da experiência (como “copo” e “água”) já são construídos por indução. Naturalmente, não se trata aqui necessariamente de uma *indução por enunciação*, mas daquilo que Aristóteles considerou como “indução intuitiva”, uma espécie de abstração que leva à construção das *formas gerais*. Portanto, o chamado “impregnacionismo teórico” não é mais que uma evidencia que todo conhecimento é estabelecido por indução. Não é impregnação de *teoria*; é impregnação de *indução*. De outra forma, esses universais obtidos por indução não são “teoria”, muito pelo contrário, são a própria base empírica do conhecimento. São o ponto de partida. O conhecimento não inicia com *particulares*, inicia com *universais*.⁸⁷⁵

No caso do problema dos *experimentos cruciais*, também temos uma resposta esclarecedora com a aceitação da base empírica indutiva da ciência. Como se sabe, o uso de experimentos cruciais na ciência foi sugerido por vários filósofos, e a própria prática científica de diferentes épocas parece indicar que eles são procurados pelos cientistas e efetivamente utilizados. Isso é percebido desde antes de Francis Bacon, com Grosseteste e John Buridan,

⁸⁷⁴ Popper, 1974.

⁸⁷⁵ Veja mais sobre isso no cap. 12, volume I.

por exemplo. No séc. XIII, Grosseteste argumentou que se um efeito pode ser deduzido de mais de um conjunto de premissas (hipóteses), a melhor abordagem é eliminar todas as hipóteses até restar uma única. Segundo ele, é preciso mostrar que todas as demais hipóteses implicam em outras consequências que se sabe que são falsas.⁸⁷⁶ No século XIV, Buridan usou um método de falsificação semelhante em sua análise do movimento dos projéteis.⁸⁷⁷ O problema com essa proposta, no entanto, é a tese de Duhem (seguida por uma boa parcela dos filósofos da ciência), que afirma que não é possível o falseamento de uma hipótese isolada e, conseqüentemente, também não são possíveis experimentos cruciais. Mas compreendendo e aceitando que a base empírica da ciência são os conhecimentos estabelecidos por indução, e que esses conhecimentos tem um nível epistêmico diferente de qualquer hipótese (sendo considerados pelo menos aproximadamente verdadeiros), evidencia-se que a eliminação de hipóteses é realmente possível e, por conseguinte, também os experimentos cruciais. A base indutiva da ciência também oferece uma resposta para o problema dos experimentos cruciais. Portanto, retornando ao ponto, a tese que o fundamento da ciência é mesmo a indução pode ser perfeitamente avaliada pelas suas consequências, sem que se tenha necessariamente que entrar, pelo menos de imediato, no problema da justificação da própria indução.

Uma segunda ponderação pertinente de se fazer aqui é sobre a análise de Popper acerca do problema da indução. À luz do parágrafo anterior, essa análise tem um defeito. De fato, a indução não pode ser justificada pela experiência, como bem percebeu o filósofo vienense. Essa tentativa leva sempre a um argumento circular ou um regresso infinito. Mas agora fica claro o porquê: sendo a indução a própria condição de possibilidade do conhecimento, qualquer tentativa de justificá-la pela experiência será sempre frustrada. Isso seria o mesmo que procurar justificar na experiência a razão pela qual enxergamos tudo azul quando usamos um óculos com uma lente dessa cor. Todavia além disso, como argumentei nos parágrafos anteriores, uma coisa é a questão sobre o fundamento do conhecimento ser, ou não, a indução; outra coisa distinta é a questão da justificação da própria indução. Ao não ser capaz de justificar a própria indução, Popper considerou que o fundamento do conhecimento também não poderia ser a indução, incorrendo numa inferência indevida. Naturalmente, Popper considerou a opção da indução ser aceita *a priori*, conferindo a essa alternativa a pecha de “dogmatismo”. No entanto, está evidente que não se trata disso. Dogmatismo seria defender que a indução *não precisa* de justificação, e, portanto, podemos aceitá-la como um ato de fé; outra coisa é reconhecer que a indução é o fundamento do conhecimento empírico,

⁸⁷⁶ Crombie, 1955, p. 118. Veja também Losee, op. cit., p.32-33.

⁸⁷⁷ *Questions on the Eight Books of the Physics of Aristotle, Book VIII, Question 12*. Buridan, 1959, p.533.

mas que *não sabemos como justificá-la*, e nem se algum dia conseguiremos. Admitir que um problema permanece sem solução, ou até que não tenha solução, não é o mesmo que defender que ele *não precisa de solução*. É possível perceber que esse mesmo erro de Popper não foi cometido por Hume. Como foi mencionado na seção 15.2, apesar de perceber o problema com a justificação da indução, Hume não concluiu que a ciência não era fundamentada por ela, e nem que ela devesse ser abandonada. Da mesma forma, os filósofos e cientistas do séc. XIX não deixaram de confiar na indução após a análise de Hume.

O problema evidenciado acima não passou despercebido dos contemporâneos e antecessores do próprio Popper. Mais de duas décadas antes da publicação da *Lógica*⁸⁷⁸, a questão da indução já preocupava os integrantes da escola de Cambridge, que também tinham em vista a fundamentação da ciência empírica. Em *The problems of Philosophy* (1912), Bertrand Russel dedicou um capítulo inteiro ao tema da indução, onde discorreu sobre dois importantes conceitos: a “uniformidade da natureza” e o “princípio da indução”.⁸⁷⁹ Embora o filósofo reconheceu que as inferências indutivas muitas vezes levavam a erros, ele tinha expectativa numa justificativa do princípio da uniformidade da natureza, e mencionou a necessidade de se adotar algum tipo de “princípio de indução” para fundamentar a ciência. Após o início da primeira guerra mundial, Russel acabou abandonando essas especulações e não retornou mais a elas. Mas vários positivistas lógicos caminhavam na mesma linha de raciocínio. Mais tarde, o Popper citaria na *Lógica* duas publicações de Hans Reichenbach sobre a indução, retiradas do periódico do Círculo de Viena. Diz Reichenbach sobre o “princípio da indução”:

Esse princípio [da indução] determina a verdade das teorias científicas. Eliminá-lo da ciência significaria nada mais que privar a ciência de todo poder de decidir a verdade e a falsidade das suas teorias. Sem ele, claramente, a ciência não teria mais o direito de distinguir as suas teorias das criações arbitrárias e fantasiosas da mente de um poeta (...) O princípio da indução é aceito sem reservas por todo o conjunto da ciência e (...) ninguém pode seriamente duvidar desse princípio na vida cotidiana.⁸⁸⁰

Não é possível deixar de perceber a alusão à Hume no final da citação, quando ele afirma que “ninguém pode duvidar seriamente desse princípio na vida cotidiana”. O principal, no entanto,

⁸⁷⁸ *Lógica da pesquisa científica*. Popper, 1974.

⁸⁷⁹ Russel, 1997.

⁸⁸⁰ Popper, 1974, cap.1.

é notar o tom geral da citação, que vai na mesma linha da Regra 3 de Newton, e também de Russel: sem indução não há ciência e nem qualquer tipo de conhecimento.

Diante do exposto acima, percebe-se que o erro de Popper não foi ter defendido que a indução não tinha justificação. Hume, Russel e até Newton já haviam percebido isso. Talvez até Okham, Scotus e Aristóteles também já haviam percebido. O seu erro foi ter tentado descartar a indução das suas especulações sobre a ciência, apesar das suas corretas conclusões. O seu erro foi ter concluído que, uma vez que não se conseguiu justificar a indução até o momento, e ser possível que jamais se consiga, então a indução não pode ser o fundamento do conhecimento. Se esse argumento estivesse correto, então também estaria correto dizer: uma vez que eu não consigo explicar como a linguagem é construída, então não existe lógica na linguagem; ou, uma vez que não consigo explicar a harmonia entre diferentes sons e ritmos porque eu sou surdo, então música não pode ser fundada em harmonias de sons e ritmos; ou, uma vez que eu não sei explicar o princípio ativo de uma erva medicinal, então ela não pode ser responsável pelos efeitos curativos observados. É evidente que uma coisa não se segue da outra. O fato de não sermos capazes de justificar a indução não implica que o conhecimento não seja nela fundado. Ou ainda, não é porque a indução é condição para o estabelecimento do nosso conhecimento, e, portanto, não podemos justificar a indução pela experiência sem recorrer a indução, que não seja válido que todo conhecimento é construído por indução. Há de se recorrer a meios indiretos para avaliar essa possibilidade. O argumento de Popper é defeituoso.

Uma terceira ponderação importante acerca do que aqui se defende sobre a indução é que há, pelo menos, *um* precedente histórico que sustenta algo muito semelhante. John Stuart Mill (1806-1873). No séc. XIX, um problema largamente discutido entre cientistas e filósofos era se a ciência inicia com indução ou com hipóteses. Alguns defendiam que a ciência iniciava com o esquema indutivo baconiano, enquanto outros defendiam que iniciava com as hipóteses. Para aqueles que defendiam o papel importante das hipóteses na ciência, outra questão era como o procedimento H-D poderia ser usado para justificar as hipóteses. No meio dessas polêmicas, as posições do polímata inglês William Whewell (1794-1866) e do seu contemporâneo e compatriota John Stuart Mill geralmente são contrastadas. Mill frequentemente é apresentado como identificando o processo de descoberta científica com a aplicação do esquema indutivo e Whewell com o uso livre de hipóteses.⁸⁸¹ Mas Losee esclarece que essa visão é superficial, pois Whewell também enfatizou a importância da

⁸⁸¹ Whewell, 1840. Mill, 1865.

indução na descoberta e Mill claramente também reconheceu o papel das hipóteses na formação da ciência.⁸⁸² De acordo com o autor, a diferença entre os dois é que Whewell era um “indutivista fraco”, ou seja, defendia a indução apenas no contexto de descoberta; enquanto que Mill era um “indutivista forte” – defendia a indução tanto no contexto de descoberta quanto no contexto de justificação, argumentando, inclusive, que as hipóteses científicas são justificadas pelo esquema indutivo, ainda que de maneira indireta. Precisamente a conclusão a que chegamos aqui, pelas análises dos *Principia*. Mill, no entanto, não aprofundou ou desenvolveu essa tese o suficiente para que ela recebesse a visibilidade devida. De toda sorte, há pelo menos *um* precedente histórico da tese que aqui se defende sobre a indução.

A quarta e última ponderação a se fazer aqui sobre a indução é ela não foi descartada completamente das especulações sobre os fundamentos da ciência e do conhecimento, apesar de uma parcela significativa dos filósofos após Popper terem o seguido em sua crítica. O próprio bayesianismo pode ser visto como um projeto na mesma linha de Carnap, de encontrar bases probabilistas para a indução, que se estabeleceu como o caminho seguido pela escola de Cambridge após as reflexões iniciais de Russel sobre a indução no início do séc. XX. Além disso, várias pesquisas recentes têm revelado um ressurgimento do indutivismo associado à sua utilidade no ramo da inteligência artificial e máquinas de aprender. Donald Gillies menciona o relativo sucesso de alguns projetos de implementar uma programação computacional com base na indução. Ele relembra do programa BACON.1, produzido há algumas décadas atrás por Langley, Simon, Bradshaw e Zytkow, destinado a “fazer descobertas científicas por indução a partir em bancos de dados”.⁸⁸³ A tentativa revelou vários limites do projeto, mas se mostrou como um promissor campo de pesquisa. Portanto, o indutivismo nunca morreu realmente com os positivistas.

Acredito que as quatro ponderações realizadas acima são suficientes para revelar que a tese da indução ser o fundamento não apenas do confirmacionismo de Newton, mas também de todo conhecimento empírico em geral, não deve ser considerada uma proposta já superada. Pelo contrário, ela conduz à reformulação de vários problemas persistentes da filosofia da ciência, chama a atenção para o defeito do argumento de Popper, e vai na mesma linha do ressurgimento recente do indutivismo, inclusive no campo das ciências cognitivas. Por essa razão penso que é possível defender, sim, que o método H-D de Newton é capaz de produzir confirmações qualitativas fundadas na indução, ainda que eu não discuta aqui a justificação da

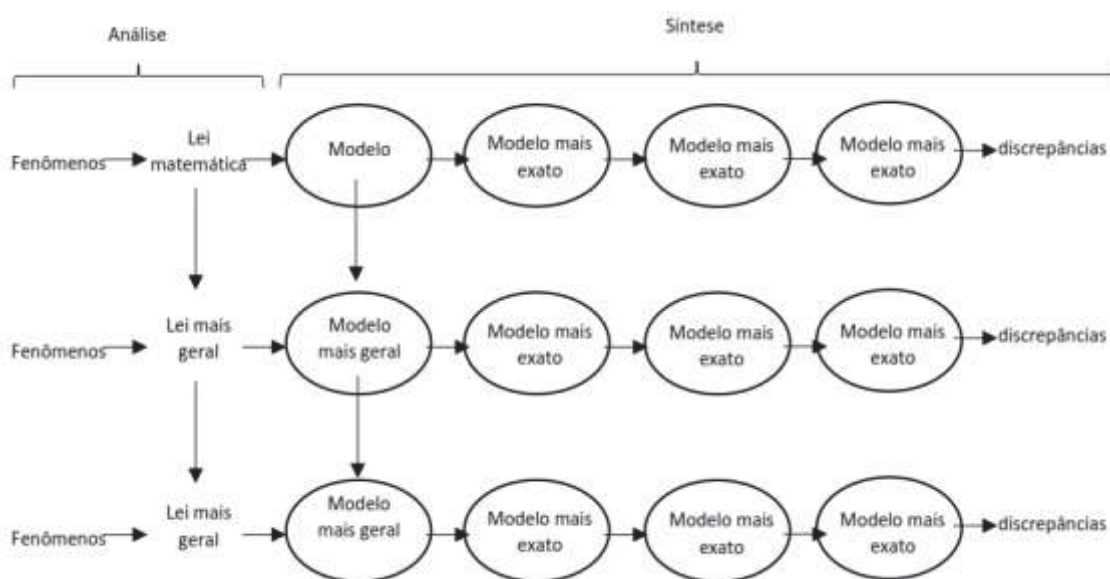
⁸⁸² Losee, 2001, p. 138.

⁸⁸³ Gillies, 1993, p.69.

própria indução. Esses esclarecimentos nos possibilitam a retornar ao problema do estatuto epistemológico das teorias científicas, e do fundamento do *realismo convergente*, discutidos na seção 17.3, e também oferecer uma resposta preliminar para eles, que podem ser considerados, igualmente, uma outra consequência da tese aqui sustentada.

18.5.2 O realismo convergente

Como foi mencionado na seção 17.3, o problema do estatuto epistemológico das teorias científicas é o problema de se esclarecer se as teorias científicas devem ser consideradas “aproximadamente verdadeiras” ou apenas “empiricamente adequadas”, sem entrar no domínio epistemológico da “verdade”. O realismo convergente defende que as teorias científicas convergem gradualmente em direção à verdade, ou em direção às condições da realidade. Mas Laudan refutou a justificativa para o realismo convergente afirmando que o sucesso das teorias alegados pelos realistas não poderia servir de base para tal defesa. Seria necessário uma “teoria coerente de confirmação” ou um melhor esclarecimento do que é um conhecimento “aproximadamente verdadeiro”. Da nossa análise estrutural do método de Newton nos *Principia* já havíamos esclarecido que Newton constrói modelos isonomológicos que vão se tornando mais exatos e amplos, *horizontalmente* e *verticalmente*, conforme o diagrama já apresentado na figura 104, que aqui relembro:



Os modelos construídos são coordenados pelas leis de força, associadas às causas, que se ampliam gradativamente segundo o roteiro da hierarquia das causas. Como vimos, esse esquema esclarece como seria possível que os modelos avancem gradativamente em direção às condições da natureza. No entanto, para esse esquema ficar de pé seria necessário esclarecer se as leis de força poderiam ser realmente justificadas pela experiência. Ao longo desse capítulo penso ter ficado claro que as leis de força podem ser consideradas efetivamente justificadas pela experiência. Newton segue um procedimento H-D modificado, distinto do método H-D convencional, que em última análise visa satisfazer o critério elementar para estabelecer qualquer conhecimento empírico: a indução. Por essa razão, pode-se defender que as hipóteses de leis de forças analisadas por Newton são confirmadas de forma qualitativa. Diante disso, é possível argumentar que os modelos propostos por Newton convergem, de fato, para a realidade. E por extensão, que é possível que as teorias científicas converjam realmente para a verdade. Em suma, o problema do *realismo convergente*, e por consequência, do estatuto das epistemológico das teorias científicas, também recebem um encaminhamento satisfatório quando se admite a tese aqui apresentada (que a indução é o fundamento do conhecimento e da ciência).

As conclusões alvissareiras no parágrafo e nas páginas anteriores nos impulsionam, agora, a refletir sobre até que ponto o programa dos *Principia* pode ser uma chave para compreender a estrutura e a racionalidade da própria ciência em geral. Naturalmente, isso passa por avaliar de que forma os *Principia* foi assimilado e incorporado pela ciência posterior. Para realizar essa avaliação no próximo capítulo será útil terminar o presente lembrando e sintetizando o programa metodológico dos *Principia* a partir dos conteúdos discutidos nesse capítulo. O esquema lembrado na figura acima, contruído na seção 17.3, já nos servirá de ponto de referência para esse intento.

18.5.3 O programa da ciência teórica dos *Principia*

Como o programa dos *Principia* pode ser resumido a partir de tudo foi discutido nos dois últimos capítulos? Inicialmente, cabe enfatizar que o esquema acima, que ilustra o procedimento de Newton nos *Principia*, não representa um simples *método*, mas um ambicioso *programa metodológico* de longa duração. A etapa da *análise* é um programa em si mesmo. Explorar as consequências matemáticas de vários *mundos possíveis* – ou melhor, de vários modelos associados a leis empírico-matemáticas possíveis – é um programa que pode

se estender seguramente por várias décadas ou gerações de pesquisa. Da mesma forma a etapa da *síntese*, que consiste em desenvolver um modelo de mundo a partir de uma lei já confirmada, através de acréscimos de acidentes, deduções de consequências, resolução de problemas matemáticos gerados por discrepâncias possíveis ou acidentes complexos, e assim por diante. Semelhantemente, esse programa pode durar facilmente uma geração de pesquisa. Tudo isso associado ao programa subsidiário que alimenta esse mais amplo: a descrição matemática das regularidades observadas nos fenômenos, que também não é uma tarefa das mais simples.

Em segundo lugar, cabe enfatizar que estamos falando de um programa cujo objetivo mais geral seria *determinar gradualmente as causas dos fenômenos naturais por meio da matemática*. Ou mais exatamente, determinar gradualmente as causas dos fenômenos naturais por meio do estabelecimento de *leis empírico-matemáticas*. E aqui importa destacar dois pontos. O primeiro ponto é que o objetivo busca determinar “gradualmente” as causas, isto é, pelo roteiro da hierarquia das causas. Como já vimos anteriormente, um dos movimentos que Newton faz para viabilizar esse programa é fragmentar o processo de investigação das causas. Ele elimina as introduções indevidas de causas remotas, ou finais, nos modelos da filosofia natural, como era o caso da ciência cartesiana. No lugar disso, introduz uma investigação gradual, sempre avançando para a causa próxima do fenômeno, que, após descoberta, avança para a posterior. O segundo ponto que cabe enfatizar é que esse objetivo visa determinar gradualmente as causas “por meio do estabelecimento de leis empírico-matemáticas”. Como já foi evidenciado, sem o estabelecimento das leis empírico-matemáticas associadas às causas, simplesmente não é possível fazer essa ascensão gradual em direção às causas mais gerais. Isso significa que, em última análise, o papel das leis é o que há de mais fundamental nesse programa.

Mas dito isso, importa enfatizar, em terceiro lugar, que também a forma de estabelecer as leis é significativa na caracterização do programa dos *Principia*. O estabelecimento das leis, que ocorre durante a etapa da *análise*, envolve uma espécie de múltiplas “teorizações matemáticas”. As leis são determinadas precisamente em função da formulação de vários modelos teóricos possíveis, dos quais apenas um sobrevive no final. Isso sugere que o objetivo do programa de Newton que fornecemos mais acima ainda precisa de uma última atualização: determinar gradualmente as causas dos fenômenos naturais, por meio do estabelecimento de leis empírico-matemáticas, *numa abordagem teórica*. É importante reforçar esse último ponto, porque a pura determinação de leis empírico-matemáticas já era feita pela tradição da matematização da natureza dos séc. XVI e XVII; contudo tais leis eram

descritivas, ou seja, determinadas pela observação *direta* dos fenômenos. A determinação das leis empírico-matemáticas proposta pela ciência dos *Principia* não ocorre de maneira direta, mas *indireta*, precisamente por se tratar de fenômenos ou causas que em geral estão ocultas aos sentidos.⁸⁸⁴ Por isso essa abordagem é fundamentalmente “teórica”. *Teórica*, mas não *especulativa*, uma vez que deve satisfazer os critérios da ciência empírica, ainda de forma indireta. Em suma, Newton criou um modo empírico indireto de determinar as leis empírico-matemáticas por meio da “teorização matemática”. Ele criou uma espécie de programa de “ciência teórica”, ou melhor, “ciência empírica teórica”, apesar do aparente paradoxo dos termos da expressão. Seria precisamente o procedimento dessa teorização matemática, capaz de conduzir ao estabelecimento “empírico” de leis matemáticas gradualmente mais gerais pela indução, associadas às causas dos fenômenos naturais, que caracterizaria fundamentalmente o programa dessa ciência inédita proposta por Newton.

Além disso, e por fim, a estrutura descrita no diagrama em discussão seria não um *método*, mas um *programa metodológico* porque no seu bojo conteria os elementos básicos de um *programa*: (1) Um objetivo; (2) Etapas [método]; (3) Meios [ferramentas]; (4) Uma agenda de ações (de curto, médio e longo prazo). Como vimos, o *objetivo* está presente nos *Principia*: determinar gradualmente as causas dos fenômenos por meio de leis matemáticas; As *etapas* para atingir os objetivos são estabelecidas pela *análise* e *síntese*, e o roteiro da hierarquia das causas. Os *meios* são as ferramentas matemáticas contidas nos *Principia* e uma vasta extensão de problemas resolvidos, ilustrando a aplicação das ferramentas e métodos aos objetivos. Por fim, a *agenda de ações* está contemplada numa extensa lista de problemas não resolvidos, alguns iniciados, outros apenas indicados, de variados níveis de dificuldade. Uma agenda de problemas propostos em aberto, ou uma *agenda de pesquisa*. Portanto, Newton deixou um programa metodológico completo no seu tratado mais famoso.⁸⁸⁵

Estando plenamente caracterizado o programa metodológico de Newton, bem como o que o justifica, prosseguiremos para algumas questões que avançam para além do tratado e do

⁸⁸⁴ As tentativas de determinação das leis de maneira *indireta* também ocorriam na tradição da matematização da natureza dos modernos, mas nesse caso esbarravam nas limitações do método H-D convencional adotado pela maioria.

⁸⁸⁵ Acerca do *objetivo*, especificamente, agora torna-se mais claro a que Newton se referia no prefácio à primeira edição quando disse que a “dificuldade”, ou, poderíamos dizer, o “objetivo” da filosofia natural é “a partir dos fenômenos investigar as forças da natureza”. Já está claro que “força”, para Newton, não é sinônimo de *causa*; força é uma propriedade matemática associada à causa; precisamente o que temos chamado aqui de *leis empírico-matemáticas* (Newton costuma chamar “leis de força”). Ele afirma que os mundos teóricos possíveis dos livros I e II foram desenvolvidos especialmente para determinar essas leis: “é para esse fim que as proposições gerais no primeiro e segundo livros são direcionadas”. Portanto, nada há no objetivo aqui descortinado que já não estivesse, ao menos embrionariamente, nos objetivos traçados pelo próprio Newton no seu prefácio.

tempo de Newton, entrando no domínio da ciência do séc. XVIII até os dias atuais. Entramos em outro desenvolvimento desse trabalho, embora com evidentes relações com o que foi explorado previamente. As questões que precisamos enfrentar, agora, são: o programa metodológico de Newton – esclarecido nos dois últimos capítulos e esboçado pouco mais acima – foi seguido pelos seus sucessores? O que aconteceu com esse programa nos anos que se seguiram? Ele foi incorporado na ciência após Newton? Ele foi modificado? Ele foi abandonado? Em que medida foi incorporado ou modificado? Tais perguntas nos ajudam a refletir sobre como as descobertas sobre o programa dos *Principia*, feitas até aqui, ajudam-nos a compreender a estrutura e os fundamentos do programa científico *em geral*. Embora tal objetivo seja ambicioso demais para as poucas páginas que nos restam, insisto que será muito proveitoso enfrentá-lo ainda nesse trabalho, mesmo que de uma maneira meramente preliminar.

19 A CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA APÓS OS *PRINCIPIA*

A ciência empírico-matemática após os *Principia* de Newton tem uma história bastante tortuosa. Boa parte dos historiadores da ciência concorda que Newton deixou uma “herança problemática”.⁸⁸⁶ Muitos defendem que da publicação dos *Principia* em 1687 até o início do séc. XX ocorreram pelo menos duas revoluções, revoluções tão significativas que por vezes são chamadas de segunda e terceira revoluções científicas.⁸⁸⁷ Diante desse panorama, torna-se natural o questionamento: o programa dos *Principia* foi realmente seguido em algum momento pelos seus sucessores, e se foi, até quando? Até a segunda revolução? Até a terceira? Em que medida esse programa foi incorporado e compreendido pelas gerações seguintes de cientistas?

Há praticamente um consenso entre os historiadores da ciência de que o programa dos *Principia* teve significativa influência na ciência posterior, e que em alguma medida foi incorporado. Mas raramente alguém se arrisca em esclarecer no que, precisamente, ele foi incorporado ou modificado. E a razão para isso é evidente: para proceder tal análise é preciso ter clareza sobre o que caracteriza mais fundamentalmente o programa dos *Principia*, além de ter clareza sobre o que caracteriza fundamentalmente a ciência empírico-matemática posterior. Não há consenso sobre qualquer das duas coisas. Contudo, agora que concluímos a caracterização do programa de Newton no capítulo anterior, podemos nos perguntar sobre essa questão, ainda que preliminarmente, uma vez que uma resposta mais conclusiva só seria possível com um estudo exaustivo da ciência posterior aos *Principia*. De todo modo, podemos reavaliar, agora, a “herança de Newton”, a partir das conclusões que foram obtidas anteriormente.

Em face do exposto acima, reforçamos a questão: o programa dos *Principia* foi seguido pelos sucessores de Newton? Em que medida? Até que ponto? Até quando? Para analisar essa questão apresentarei um breve panorama histórico da ciência empírico-matemática desde de 1687 até o séc. XX, intercalando com comentários e observações sobre as questões que aqui estamos considerando. Dividirei essa história em três partes, compreendendo respectivamente os séculos XVIII, XIX e XX. Começemos, inicialmente, com a recepção e assimilação dos *Principia* no séc. XVIII.

⁸⁸⁶ Veja Caparrini, 2013, p.359.

⁸⁸⁷ Brush, 1976, vol.1, 35-51; Bellone, 1980; Veja também Fox, 2013.

19.1 A CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA NO SÉC. XVIII

A recepção dos *Principia* após 1687 de modo algum pode ser considerada uma assimilação acrítica e passiva. Ao mesmo tempo que o tratado de Newton foi louvado por muitos, também foi intensamente questionado e criticado, em múltiplos aspectos. Seus pormenores foram exaustivamente escrutinados e, porque não dizer, devassados. Desse trabalho surgiram modificações importantes, que aqui merecem ser esclarecidas. Para facilitar o nosso percurso nesse século vamos considerar o processo de assimilação dos *Principia* pelos seus sucessores em três momentos principais. Num primeiro momento, houve um período de tradução crítica dos *Principia* para a linguagem da matemática analítica dominante no séc. XVIII, especialmente o cálculo leibniziano; num segundo momento houve o desenvolvimento e sistematização dos resultados dessa tradução, com a ampliação do alcance de muitos resultados; e num terceiro momento houve a consolidação do campo que hoje conhecemos como “mecânica clássica”, recebendo o seu acabamento final já no séc. XIX.

Sobre o primeiro momento de assimilação dos *Principia* no séc. XVIII – a *tradução crítica* – importa reforçar que ainda no tempo de vida de Newton, o seu tratado começou a ser sistematicamente estudado por vários dos principais matemáticos da época, em especial pela escola matemática do seu arquinimigo, Gottfried Wilhem Leibniz (1646-1716).⁸⁸⁸ Leibniz havia transmitido os seus métodos matemáticos para estudiosos na europa continental, especialmente uma talentosa família de matemáticos suíços, os Bernoulli's. Os irmãos Jakob Bernoulli (1654-1705) e Johann Bernoulli (1667-1748) já haviam assumido o lado de Leibniz na disputa pela prioridade do cálculo, e mergulharam no estudo dos *Principia* – talvez muito mais interessados em levantar evidências do plágio de Newton. Mas os métodos matemáticos de Newton e Leibniz eram distintos demais para que essa empreitada fosse bem-sucedida. Ainda mais porque outros matemáticos, não diretamente envolvidos na polêmica, também estudavam os feitos de Newton nos *Principia*. Dentre esses, destacavam-se matemáticos da escola francesa, como Pierre Varignon (1654-1722), que mantinha relações amistosas tanto com Newton quanto com Leibniz. No ápice desse período polêmico de escrutinação dos *Principia*, Newton publicou a segunda edição do seu tratado, em 1713, e a terceira edição, em 1726. À época da terceira edição, vários dos protagonistas desses debates iniciais já haviam falecido, e o próprio Newton também falecera no mesmo ano da publicação da sua última edição.

⁸⁸⁸ Veja Guicciardini (1999), para mais detalhes.

Após a morte de boa parte dos matemáticos da mesma geração de Newton, a tarefa de tradução crítica dos *Principia* para a linguagem analítica prosseguiu com uma geração mais jovem, na qual se destacavam Jakob Hermann (1678-1733) e Nicolau Bernoulli (1687-1759), ambos orientados por Jakob Bernoulli; e Daniel Bernoulli (1700-1782) e Leonhard Euler (1707-1783), orientados por Johann Bernoulli. Na escola francesa também se destacava Alexis Claude de Clairaut (1713-1765). Toda essa geração mais jovem de matemáticos prosseguiu no projeto de traduzir os *Principia* para linguagem analítica, embora com paixões menos exaltadas do que seus orientadores. Nos meados da década de 1730, aproximadamente 50 anos após a publicação da primeira edição dos *Principia*, as principais partes matemáticas desse tratado já haviam sido traduzidas para a linguagem analítica; além disso, os seus resultados matemáticos já haviam sido compreendidos, explorados, criticados e verificados. Todo esse processo culminou com a publicação da *Mechanica* de Euler⁸⁸⁹, em 1736, o principal nome dessa geração, encerrando esse primeiro momento de assimilação dos *Principia*.

O segundo momento de assimilação dos *Principia* foi o que chamei acima de *sistematização dos resultados*. Durante e após o processo de estudo e tradução dos *Principia* na linguagem analítica, três principais resultados foram obtidos. Em primeiro lugar, houve um fortalecimento na confiança nos métodos analíticos em geral, e especialmente no cálculo diferencial e integral de Leibniz.⁸⁹⁰ Os métodos analíticos não se mostraram apenas como práticos procedimentos de descoberta, mas efetivamente com maior alcance que os métodos semi-geométricos dos *Principia*. Como se sabe, o próprio Newton tinha suas ferramentas analíticas, e as utilizou ocultamente no seu tratado, pois não encontrou meios de formulá-las na linguagem geométrica. Mas por fim, as ferramentas analíticas de Newton (em especial o cálculo das fluxões), também foram preteridas por aquelas de Leibniz, que se revelavam mais didáticas e facilmente assimiláveis. O segundo resultado obtido pela tradução dos *Principia* na linguagem analítica foi o fortalecimento da confiança no projeto de ciência empírico-matemática desse tratado. Se havia algum interesse inicial dos detratores de Newton em estudar o seu tratado para difamá-lo, ao final desses 50 anos de estudo o resultado foi oposto. A ciência dos *Principia* saiu fortalecida, pois os seus resultados, métodos, desenvolvimentos, foram escrutinados e, a maioria, corroborados por matemáticos que não eram exatamente seus simpatizantes, para dizer o mínimo. Além disso, a agenda de pesquisa dos *Principia* foi

⁸⁸⁹ *Mechanica sive motus scientia analytice* (Mecânica ou ciência do movimento analiticamente exposta). Euler, 1736.

⁸⁹⁰ Veja Guicciardini, 1999. Veja também Caparrini, 2013.

assumida quase unanimemente pelos matemáticos do período. E o terceiro resultado obtido pela tradução dos *Principia* na linguagem analítica foi a ampliação do alcance tanto da matemática leibniziana, quanto da ciência mecânica dos *Principia*. A legítima fusão que ocorreu entre a ciência e matemática newtoniana e a ciência e matemática leibniziana levou, por um lado, a um significativo avanço de resultados, técnicas, métodos e formalização da matemática analítica, que se tornou mais poderosa do que nunca. Euler foi o principal personagem responsável por essa síntese. Um exemplo foi a criação do conceito de “função matemática”, por Euler, que formalizou uma maneira de trabalhar com as diferentes dependências matemáticas separadas (abordagem já presente nos *Principia*) em equações que poderiam ser expressas em função de variáveis específicas.⁸⁹¹

Por outro lado, a fusão entre a ciência e matemática de Newton e Leibniz também resultou num avanço e refinamento dos resultados da própria mecânica newtoniana, que se tornaram mais amplos. Trabalhando com equações analíticas (que não eram aplicadas nos *Principia*), foi possível ampliar a abordagem de Newton, que se restringia principalmente a *corpos pontuais* e *rígidos* (não-deformáveis), para *corpos extensos* e *deformáveis*.⁸⁹² Por exemplo, Euler também foi o responsável pela formulação da segunda lei do movimento na linguagem como conhecemos hoje, na forma de uma equação ($F = ma$), e pela descoberta da sua contraparte para os corpos extensos ($\tau = I\alpha$), onde τ é o torque aplicado ao corpo e I é o seu momento de inércia.⁸⁹³ Foi graças a consideração da Lua como corpo extenso, numa abordagem tipicamente analítica, usando equações diferenciais, que importantes desenvolvimentos foram feitos para a resolução do problema dos três corpos, iniciada por Euler, e depois continuada por Clairaut, d’Alembert e Lagrange. Além disso, também vem de Euler a abordagem moderna de que a tarefa da mecânica é, basicamente, reduzir um problema físico a um conjunto de equações diferenciais parciais e integrá-las, uma vindicação de Leibniz, mas realizada efetivamente por Euler.⁸⁹⁴ Todos esses resultados ampliativos tanto da matemática quanto da ciência mecânica foram sistematizados e organizados principalmente por Euler, o maior sintetizador dessas duas tradições, e encerra esse segundo momento de assimilação dos *Principia*, que aqui chamamos de “sistematização de resultados”.

O terceiro momento do processo de assimilação dos *Principia* é o que aqui chamei de “consolidação da mecânica clássica.” Essa etapa foi levado a cabo já por uma nova geração de matemáticos, na qual se destacam o francês Pierre-Simon Laplace (1749-1827), e o italiano

⁸⁹¹ Stan, 2018.

⁸⁹² Caparrini, 2013; Stan, 2018.

⁸⁹³ Stan, op. cit.

⁸⁹⁴ Ibid.

Joseph Louis Lagrange (1736-1813). Esse período se encerra precisamente com a publicação de *Mécanique Analytique*, de Lagrange, em 1788.⁸⁹⁵ O tratado de Lagrange, no entanto, pode ser melhor compreendido como uma reformulação da mecânica a partir de princípios distintos daqueles usados por Newton nos *Principia*, tradicionalmente considerados como princípios de “força” e “conservação de momento”. Lagrange constrói todo o seu sistema de mecânica a partir do princípio do “trabalho virtual”, mais ligado à tradição leibniziana, tendo origens nos estudos da estática de Stevin e Galileu, mas usado com frequência por Johann Bernoulli, Euler e d’Alembert. Esse princípio também tinha uma relação próxima com a *vis viva*, de Leibniz, que pode ser associado contemporaneamente com o princípio de conservação de energia, em especial da energia cinética. O séc. XIX vai aprender a ciência da mecânica já diretamente do *Mécanique Analytique* de Lagrange, e do *Traité de mécanique céleste* (1798), de Laplace.⁸⁹⁶ Esses dois tratados finalizam as principais elaborações da assim chamada “mecânica clássica”, talvez restando apenas as contribuições do matemático irlandês, William Hamilton (1805-1865), que já avançam para o séc. XIX.

Deixemos as observações sobre Laplace para o séc. XIX e paremos aqui para algumas breves considerações sobre nossas questões iniciais. Com tantas transformações significativas já no século XVIII é possível sustentar que era o mesmo programa de Newton que ainda estava em andamento? Euler, que foi um dos maiores contruibuidores e sistematizadores dessa transição, por exemplo, não se considerava um newtoniano. Na verdade, ele era discípulo de Johann Bernoulli, um leibniziano convicto. E não se tratava apenas de uma filiação retórica. Embora usasse os princípios newtonianos, Euler de forma alguma se limitava só a eles. Na sua *Mechanica*, ele usa uma variedade de princípios mecânicos diferentes: o princípio da *vis viva*, de Leibniz; o princípio do *trabalho virtual* de Bernoulli; o princípio da *ação mínima*, ou do *menor esforço*, que mais tarde foi adotado para a construção da mecânica hamiltoniana. Métodos de energia. O uso de *forças* e *momentos* de Newton era apenas um entre muitos métodos e princípios usados por Euler.⁸⁹⁷ Um exemplo claro da sua versatilidade é a análise que faz da elasticidade, que é encaminhada de uma maneira totalmente não-newtoniana. Diante disso, voltamos à pergunta: apesar de inegavelmente o tratado de Newton ter exercido alguma influência nos seus sucessores, é possível sustentar que, mesmo no séc. XVIII, ainda estejamos falando da ciência dos *Principia*? É possível sustentar que o programa de Newton estava sendo seguido, ou havia sido de algum modo adotado pelos seus

⁸⁹⁵ Fox, 2013.

⁸⁹⁶ Ibid.

⁸⁹⁷ Stan, op.cit.

sucessores? Não teria havido já aí um rompimento com os *Principia*, ou pelo menos uma reformulação completa desse programa com Euler?

De imediato, insisto que não se pode falar em rompimento com o programa de Newton a essa altura. Em primeiro lugar, porque embora outras contribuições da ciência da mecânica estivessem sendo consideradas e usadas, a agenda de pesquisa seguida por eles era, predominantemente, a agenda dos *Principia*. Os *Principia*, e os problemas desse tratado foram, inegavelmente, o principal ponto de partida de todos eles. Com efeito, o programa metodológico de Newton antecipado em 1672, nas *Lectiones Opticae*, tornou-se a realidade no séc. XVIII. A natureza passou a ser investigada predominantemente por *matemáticos*, o que ainda não era a regra no séc. XVII. Sob a influência do projeto de Newton, no séc. XVIII emergiu uma escola organizada de matemáticos estudando a natureza. Os “filósofos geometras” e os “geometras filósofos”, nas palavras de Newton, que seria capazes de livrar a filosofia natural da proliferação infrutífera de hipóteses e probabilismos espalhados por todos os lados. O que justificaria tantas mentes brilhantes da matemática se envolverem na agenda de pesquisa deixada por Newton senão o fato deles terem acreditado que o futuro da filosofia da natureza estava mesmo vinculada a um projeto tal como Newton descrevera? Mas em segundo lugar, acredito que não podemos falar de rompimento a essa altura, porque as transformações que ocorreram nesse período se concentram, sobretudo, em elementos *secundários* do programa de Newton, e não *essenciais*.

Naturalmente, a principal objeção que alguém poderia fazer sobre a sugestão de que não houve ruptura em relação ao programa lançado por Newton no séc. XVIII é a referência às transformações profundas que ocorreram, e não apenas na linguagem matemática. Mas aqui o leitor precisa perceber que quando estamos nos referindo à “assimilação dos *Principia*”, estamos falando de pelo menos quatro heranças deixadas por esse tratado: (1) um programa metodológico; (2) um programa matemático; (3) um programa de mecânica geral; (4) um programa específico de mecânica celeste. Sendo mais preciso, o melhor seria dizer que os *Principia* apresentou um único programa metodológico de investigação da natureza, e várias subprogramas de pesquisa articulados, ou, agendas de pesquisas específicas articuladas a esse programa. Não é difícil perceber que as significativas mudanças mencionadas anteriormente ocorreram em (2), (3) e (4). A matemática foi completamente reformulada, novas ferramentas introduzidas; a mecânica geral e específica foi ampliada, inclusive com a incorporação de outros princípios e técnicas; o compêndio de problemas resolvidos foi ampliado e outros problemas acrescentados. Em suma, houve uma significativa reformulação linguagem e ferramentas. Mas quanto ao “programa metodológico”, ainda nada podemos

declarar. Precisamos entrar nos desdobramentos do século XIX para prosseguir com a nossa investigação.

19.2 A CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA DO SÉC. XIX

19.2.1 Panorama histórico

A ciência empírico-matemática do início do século XIX foi marcada pela influência de dois personagens principais, cada qual representando uma tradição diferente: o francês Pierre-Simon Laplace (1749-1827), orientado por Jean le Rond d'Alembert (1717-1783); e o italiano Joseph Louis Lagrange (1736-1813), discípulo de Leonhard Euler (1707-1783). Esse último, como já vimos, provinha da tradição leibniziana, e reformulou a mecânica em termos do princípio do “trabalho virtual” e métodos de energia, consolidando o que veio a ser chamado posteriormente de “mecânica lagrangiana”. Laplace, por outro lado, era um newtoniano fervoroso. Ele se enxergava como um legítimo continuador dos trabalhos inacabados de Newton. Assumiu a ideia de Newton de que todos os fenômenos naturais poderiam ser explicados por meio de forças atrativas e repulsivas, e assim propôs um programa de investigação de “forças de curto alcance”, que poderia esclarecer tanto o comportamento dos gases (por meio de forças repulsivas), quanto os fenômenos da capilaridade e elasticidade dos corpos (por meio de forças atrativas).⁸⁹⁸ Esses últimos fenômenos seriam explicados pela própria força de atração gravitacional, que, além de elucidar os fenômenos celestes, também traria luz a vários outros fenômenos em escala microscópica. Relacionado a esse programa, Laplace também propôs uma teoria do calor, envolvendo o famigerado conceito de “calórico”, um fluido invisível e inodoro que todos os corpos conteriam, e que causaria as alterações de temperatura observadas na natureza.⁸⁹⁹

As diferenças entre as tradições de Laplace e Lagrange se manifestaram sobretudo em seus estilos de investigar a natureza. Laplace fazia uso abundante de modelos mecânicos teóricos, enquanto Lagrange se utilizava fartamente de equações analíticas abstratas, aproximando-se de um formalismo matemático. O contraste entre esses estilos de investigação se acentuou ao longo do século XIX, gerando duas abordagens bem distintas que aqui, por simplicidade, denomino de abordagem *modelista* e *formalista*. Os modelos usados por Laplace e seus seguidores, no entanto, começaram a ser considerados extravagantes pela

⁸⁹⁸ Fox, 2013.

⁸⁹⁹ Ibid.

tradição *formalista*, que passou a denunciar as teorizações por vezes muito ambiciosas daquela tradição, gerando, ao final, reservas quanto à teorização.⁹⁰⁰ Por exemplo, os modelos usados por Laplace para explicar o comportamento dos gases faziam referências a forças puramente teóricas (“forças moleculares”), diferente da lei da gravitação que foi obtida a partir de efeitos macroscópicos visíveis, como o movimento dos planetas.⁹⁰¹ Nos seus modelos moleculares sobre o calor, Laplace também adotava a hipótese de entidades teóricas – como o calórico – e essas suposições avançavam igualmente nos ramos da eletricidade e do magnetismo, que também passaram a fazer referências a fluidos imponderáveis. Esse tipo de abordagem gerou uma reação por parte dos cientistas mais positivistas, que consideravam que ela fugia dos padrões e critérios de uma verdadeira ciência empírica. Tais cientistas gradualmente passaram a se identificar mais com as abordagens formalistas.

Por volta de 1850, a abordagem formalista já reunia um grande repertório de ferramentas e passou a ser dominante entre os matemáticos do período, gerando um movimento que hoje conhecemos como “virada positivista”.⁹⁰² No lugar de teorias e modelos mecânicos de calor, passou-se a utilizar equações analíticas relacionadas ao conceito formal de *energia*, o que se tornou o fundamento da *termodinâmica clássica*; no lugar de teorias que faziam referências a fluidos teóricos na eletricidade, passou-se a utilizar o conceito formal de *campo*, com as suas respectivas equações, o que gerou as teorias da eletrodinâmica e eletromagnetismo clássico; e em vez das abordagens tradicionais da *óptica geométrica*, que analisavam a luz a partir de referências e modelos mecânicos, como a reflexão e refração, a predominância passou a ser da teoria ondulatória da luz, a hoje chamada *óptica física*. Portanto, a tensão entre as duas referidas abordagens de investigação da natureza ao longo do século resultou no fortalecimento da abordagem formalista, e no declínio da modelista.

Mas a abordagem formalista não se fortaleceu por razões políticas ou externas à ciência. Laplace e seus seguidores gozavam de elevado prestígio social. O que ocorreu é que a abordagem formalista começou, efetivamente, a conduzir significativos avanços na ciência empírico-matemática. Por exemplo, em 1833, o matemático irlandês William Rowan Hamilton (1805-1865) efetuou uma reformulação da mecânica de Lagrange, estabelecendo o que mais tarde veio a ser conhecida como “mecânica hamiltoniana”. Hamilton usou um sistema de coordenadas *n*-dimensional, associado a um conjunto de equações diferenciais relacionadas às energias potenciais e cinéticas, e formulou uma mecânica com leis mais gerais

⁹⁰⁰ Ibid.

⁹⁰¹ O termo “molecular” para Laplace não tem o mesmo sentido corrente atual. Para mais detalhes veja Fox, 2013.

⁹⁰² Ibid, p.424.

que a mecânica newtoniana e lagrangiana, da qual seria possível deduzir as leis fundamentais desses dois sistemas. Hamilton promoveu uma espécie de “unificação” na mecânica. A formulação das mecânicas lagrangiana e hamiltoniana, por sua vez, tiveram papel importante na unificação das teorias do calor e da mecânica (através de conceitos como trabalho mecânico e energia) algo que a escola laplaciana almejava, mas jamais foi capaz de concretizar.⁹⁰³ Além disso, o conceito de *campo*, desenvolvido por Siméon Poisson, também teve papel fundamental para a unificação formal da eletricidade e do magnetismo, efetuada mais tarde por Maxwell. E a teoria ondulatória da luz abriu igualmente o caminho para uma possível unificação entre o eletromagnetismo e a óptica. A ascensão da tradição formalista, portanto, não foi sem razão. Ela realmente levou a um avanço bastante significativo na ciência empírico-matemática do séc. XIX. Por outro lado, o programa laplaciano não obteve êxito em muitos dos seus esforços. A explicação dos fenômenos da capilaridade e elasticidade por meio de forças atrativas não prosperou, e da mesma forma a explicação dos gases por meio de forças repulsivas.

Os avanços na ciência empírico-matemática conduzidos pela abordagem formalista foram tão expressivos que vários historiadores atribuem a esse período um estatuto de “revolução”. Uma revolução comparável às transformações da física moderna no século XX, que por vezes é chamada de “revolução analítica”.⁹⁰⁴ Não é difícil perceber o porquê. A ciência dos campos e da energia se tornou mais ampla que a mecânica, fazendo dessa última apenas um tipo particular de energia. A ciência da mecânica, que era praticamente sinônimo de ciência empírico-matemática até os meados do séc. XIX, tornou-se apenas um dos seus ramos, sendo os outros o eletromagnetismo, a termodinâmica e a óptica, não necessariamente redutíveis à mecânica. Nesse período se aproxima, portanto, o fim do período da “mecânica” como modelo de investigação da natureza.⁹⁰⁵ A redução dos fenômenos naturais a causas mecânicas deixa de ser um ideal dominante da prática da ciência empírico-matemática. O formalismo analítico subjuga, por assim dizer, a visão mecanicista do mundo. É estabelecida a “revolução analítica”.

As consequências da revolução analítica não foram de pequena monta. Vários historiadores consideram que ela deu origem a uma “segunda revolução científica”.⁹⁰⁶ Houve um avanço significativo na tecnologia e na instrumentação científica, impulsionados pelos campos da termodinâmica, eletromagnetismo, óptica, e pelos refinamentos da mecânica. Por

⁹⁰³ Ibid.

⁹⁰⁴ Caparrini, 2013.

⁹⁰⁵ Ibid.

⁹⁰⁶ Bellone (1980); Brush (1988). Veja também Caparrini (2013); Fox (2013);

exemplo, entre as décadas de 1800 e 1880, foram inventados a pilha voltaica, o eletroímã, o telégrafo, a locomotiva à vapor, o motor à combustão, o gerador elétrico, o motor elétrico, a lâmpada, o telefone, o rádio, apenas para citar as invenções mais emblemáticas. Das aplicações das teorias da ciência empírico-matemática, campos de atuação na área tecnológica foram formalizados e profissionalizados, como a engenharia civil (1830), a engenharia mecânica (1847), a engenharia elétrica (1885), entre outros. A própria ocupação de “cientista” foi profissionalizada nesse período. Surgiram novas disciplinas científicas, como Química, as ciências da vida (envolvendo a medicina e a biologia) e a geologia, emergindo o embrião do formato científico que temos atualmente. Por todas essas razões, o séc. XIX é considerado como o século da “segunda revolução científica”, dada a amplitude dos seus avanços e desenvolvimentos.

Mas o que importa aqui enfatizar é que a segunda revolução científica, associada com a revolução analítica, sugere o fim do programa newtoniano, que ainda subsistia por meio da escola de Laplace. Erico Bellone relaciona essa revolução com o declínio do uso de modelos mecânicos, tendo iniciado ainda no séc. XVII, com Descartes, persistindo com Newton, e entrando em declínio com a escola laplaciana na segunda metade do séc. XIX.⁹⁰⁷ Dessa perspectiva, Laplace e seus seguidores seriam os últimos dos newtonianos, e o declínio da sua escola marcaria também a derrocada definitiva do programa de ciência delineado pelos *Principia*.

19.2.2 A continuidade do programa metodológico dos *Principia* no séc. XIX

Diante do panorama histórico da ciência empírico-matemática do séc. XIX exposto na seção anterior, cabe, agora, alguns comentários e considerações sobre esse período, tendo em vistas as questões que iniciamos essa seção. Mais exatamente, da interpretação usual da ciência desse século apresentada acima, há qualquer possibilidade de ainda admitir que o programa de Newton foi seguido ou incorporado em alguma medida para além do universo restrito da escola laplaciana? É possível sustentar que alguma parte do programa newtoniano sobreviveu à segunda metade do séc. XIX, ou prosseguiu além disso? De imediato, antecipo que a resposta que aqui se defenderá é um sonoro *sim*. Em primeiro lugar, porque o declínio da programa de Laplace (forças de curto alcance) não pode ser entendido como o declínio do programa dos *Principia*. O programa de Laplace que entrou em declínio ao longo do séc. XIX

⁹⁰⁷ Bellone, 1980. Veja também Fox, 2013, p.426.

simplesmente não corresponde ao programa metodológico de Newton. Esclareçamos esse ponto.

Inicialmente, reforcemos de novo que não pode haver confusão entre o “programa metodológico” de Newton e as agendas de pesquisa específicas associadas ao seu programa. O “programa de Laplace” a que muitos se referem pode ser resumido como um programa de investigação das “forças de curto alcance”. Esse programa pode ser subdividido em duas partes. Em primeiro lugar, a investigação das forças de repulsão que explicam supostamente o comportamento dos gases. Trata-se de uma hipótese levantada por Newton sobretudo no Livro II dos *Principia*. Em outros termos, foi uma hipótese proposta para um problema em aberto sobre a explicação do comportamento dos gases e líquidos, que eventualmente poderia ser consolidado numa agenda de pesquisa específica. Laplace estruturou tal agenda, buscou uma resposta para o problema, e ao final o projeto se mostrou fracassado. Não se trata aqui, naturalmente, de um programa *metodológico*, ao menos não no sentido que delineamos anteriormente. Trata-se tão somente de uma hipótese de pesquisa específica aventada por Newton ao longo do desenvolvimento dos *Principia*.

A segunda parte do programa de Laplace é a explicação da capilaridade e elasticidade por meio da força de atração gravitacional. Sobre essa parte, em primeiro lugar, não está claro sequer que Newton tenha proposto tal hipótese. Talvez Laplace tenha entendido a passagem do prefácio dos *Principia* onde Newton afirma que está inclinado a “suspeitar que todos [os fenômenos] dependam de certas forças”, como se com “certas forças” ele estivesse se referindo especificamente à própria força de atração gravitacional. Se for esse o caso, Laplace estaria fazendo uma associação indevida aqui. No prefácio, Newton parece escrever de uma forma propositadamente genérica, referindo-se a “certas forças”, provenientes de “causas até o momento desconhecidas”, indicando que, no final das contas, ele não está se referindo necessariamente à força gravitacional, mas a qualquer outra força semelhante, mesmo que proveniente de causas desconhecidas. Então, essa possibilidade não parece provável. Por outro lado, é possível que Laplace tenha entendido essa investigação da capilaridade e elasticidade simplesmente como parte da *síntese*: a aplicação da lei da gravitação para os demais fenômenos, não apenas celestes, mas nesse caso também terrestres. Laplace teria simplesmente prosseguido o que ele já havia iniciado nos seus múltiplos tratados de mecânica celeste – aplicar exaustivamente a lei da gravitação a todos os fenômenos celestes – e teria tentado estender essa lei igualmente para a escala molecular. Mas também sob essa interpretação não estaríamos falando do programa *metodológico* de Newton, mas de uma das suas etapas. Além disso, uma etapa a partir de uma hipótese que não parece estar nem um

pouco claro que era a indicação de pesquisa imediata de Newton, pois ele a apresenta como uma “suspeita” distante, no máximo uma agenda de investigação de longo prazo. Portanto, também aqui não podemos associar o programa de investigação da capilaridade e elasticidade com o programa metodológico de Newton.

Mas e quanto a abordagem por meio do uso de “modelos mecânicos teóricos” da escola laplaciana, não se trataria, nesse caso, legitimamente, de um programa metodológico? Novamente, é preciso dizer, essa abordagem de modelos mecânicos, embora tenha realmente caráter metodológico, não se trata do programa metodológico específico dos *Principia* que estabelecemos no capítulo anterior. O programa metodológico dos *Principia* que estabelecemos, relembremos, consiste em “determinar gradualmente as causas dos fenômenos por meio de leis empírico-matemáticas, usando uma abordagem teórica”. Embora modelos estejam presentes nessa abordagem, como vimos, o elemento principal em questão são as *leis matemáticas*. E nesse sentido, a própria menção de Newton à investigação das forças semelhantes à gravidade no prefácio dos *Principia* pode ser entendida como se referindo a essa precisa abordagem por meio de leis matemáticas. Como já foi estabelecido antes, “forças”, para Newton, não é o mesmo que *causa*; é uma abstração matemática associada à causa, o que hoje talvez chamaríamos mais correntemente de “leis matemáticas”, ou “leis empírico-matemáticas”. Então, o programa metodológico de Newton está diretamente relacionado com avançar gradualmente em direção às causas por meio da determinação de tais leis, ou “forças”, na terminologia de Newton. A suposição de que há forças de curto alcance, atrativas e repulsivas, atuando nos gases, ou na elasticidade, capilaridade, calor, e outros fenômenos é uma suposição que deve ser levada adiante precisamente por meio da determinação gradual das leis empírico-matemáticas que operam na natureza, a essência do programa metodológico dos *Principia*. O uso dos *modelos* é igualmente subsidiário nesse processo de determinação das leis, como também já observamos. Portanto, a abordagem *modelista* da mesma forma não pode ser considerada como cerne do programa de Newton, apenas um dos seus elementos.

E quanto à abordagem *formalista*? Não seria ela uma abordagem alternativa, ou até oposta, ao programa dos *Principia*? A resposta é *de forma alguma*. Em última análise, o fundamento da abordagem formalista é precisamente o uso de leis matemáticas. Basta pensar em toda a amplitude de leis matemáticas propostas por essa abordagem: as leis de conservação e energia, as leis da termodinâmica, as múltiplas leis da eletricidade e do magnetismo que, ao serem associadas ao conceito de campo, foram reformuladas pelas equações Maxwell. A abordagem formalista é caracterizada fundamentalmente por trabalhar

com leis matemáticas formais. E os próprios proponentes dessa abordagem o reconheceram abertamente. Em 1822, por exemplo, em meio da polêmica sobre a abordagem formalista e modelista, o matemático francês Jean-Baptiste Fourier (1768-1830), ex-aluno de Lagrange, defendeu a posição formalista em termos bastante significativos. Afirma ele:

As primeiras causas são desconhecidas para nós; mas elas estão sujeitas a simples *leis invariáveis* que podem ser descobertas pela observação; e o estudo delas é o objetivo da filosofia natural.⁹⁰⁸

O que está implícito na afirmação de Fourier é : (1) o objetivo do conhecimento é descobrir as “primeiras causas”; (2) no entanto, as “primeiras causas” são inacessíveis à observação; (3) apesar disso, elas estão sujeitas a “leis invariáveis” (presume-se, aqui, “leis matemáticas”); (4) essas leis “podem ser descobertas pela observação”; (5) portanto, o objetivo da filosofia natural é o “estudo delas [dessas leis]”, ou – poderíamos dizer mais diretamente – o objetivo da filosofia natural é *determinar* essas leis. Naturalmente, Fourier não explica aqui *como* essas leis descobertas pela observação podem nos levar até as “primeiras causas”, mas como já vimos anteriormente, o programa de Newton contempla o esclarecimento dessa progressão. De todo modo, fica claro que a abordagem formalista não é uma abordagem alternativa de ciência, mas a própria continuidade do programa dos *Principia*.

Por outro lado, do exposto acima não se segue a abordagem laplaciana nada tenha a ver com o programa metodológico de Newton. Como foi mencionado anteriormente, antes de se chegar às leis matemáticas há o árduo processo da *análise*, que consiste em formular e explorar modelos teóricos hipotéticos, possíveis, a partir dos quais se chegará posteriormente numa conclusão. Em outras palavras, as “leis inváriáveis” não são obtidas tão facilmente e diretamente pela “observação”, como Fourier faz parecer. Para graus de generalidade mais elevados, uma abordagem indireta, teórica, faz-se necessária. É isso o que a escola laplaciana parece estar fazendo.

Portanto, o debate observado no séc. XIX sobre as duas abordagens de ciência, modelista e formalista, pode ser melhor entendido como um debate sobre a herança do próprio *Principia*, uma herança ambígua e problemática, ainda que não o seja de uma forma tão consciente. E principalmente porque as duas abordagens estão incluídas no programa proposto por Newton. Ao mesmo tempo que ele defende uma abordagem rigorosamente empírica, com a determinação das leis matemáticas, com ascensão gradual de generalidade ele também faz uso de teorizações matemáticas múltiplas, às vezes até aparentemente

⁹⁰⁸ Fourier, 1822, p.1. Grifo meu. Veja também Fox, 2013, p. 424.

desconectadas da realidade. Essa ambiguidade no programa de Newton deve ter gerado a tensão entre essas duas abordagens no séc. XIX. Ao que parece, Laplace intuitivamente captou importância da exploração teórica de modelos. Já Fourier e outros da escola lagrangiana enfatizaram mais as leis matemáticas.

Mas como foi evidenciado, ambas as abordagens estavam articuladas no programa dos *Principia*. Por isso, na falta de uma clara compreensão desse programa naquele contexto histórico, havia o risco de desvios e exageros. Na abordagem modelista havia o risco do exagero na dose das teorizações, rompendo com o roteiro da hierarquia das causas. A ascensão às causas mais gerais deveria ocorrer gradativamente por meio da causa próxima. Mas não parece ter sido o que ocorreu com algumas teorizações propostas por Laplace. Quando procura criar modelos envolvendo forças de atração e repulsão “moleculares”, ele parece saltar diretamente para causas muito gerais, as quais Newton havia vislumbrado apenas no final do processo gradual de generalização. Essas propostas de Laplace geraram uma compreensível reação nos cientistas da época porque pareciam retornar ao tipos de modelos propostos por Descartes, onde se propunha, diretamente, as causas mecânicas *finais* dos fenômenos, como nos seus conhecidos modelos do magnetismo, do movimento dos planetas, entre outros. O programa de Newton rompeu precisamente com esse tipo de abordagem, que parecia retornar subterraneamente com a escola laplaciana. A reação dos formalistas, portanto, parece ser muito mais no intuito de recolocar a ciência empírico-matemática novamente nos trilhos corretos, voltando à ascensão gradual por meio da determinação das leis matemáticas. Conforme fora ilustrado nos *Principia*. Por outro lado, a resposta formalista também poderia ser exagerada, levando a desvios no programa de Newton. A inibição do uso da teorização matemática, inclusive com o uso de modelos mecânicos, seria simplesmente o fim da ciência teórica nascida com os *Principia*, e o retorno à física predominantemente descritiva de Galileu, que pouco poderia informar a respeito das causas dos fenômenos naturais. Ambas as abordagens, portanto, corriam o risco de desvios. Precisamente, os desvios do retorno ao cartesianismo, por um lado, ou do retorno ao galileanismo, por outro. O programa dos *Principia* não se confunde com nenhum desses dois extremos.

Do exposto nos parágrafos anteriores é possível chegar a três principais conclusões. Em primeiro lugar, não há declínio do programa metodológico dos *Principia* com a prevalência da abordagem formalista a partir da segunda metade do séc. XIX. Pelo contrário. O que eles estavam fazendo não era um rompimento com o programa de Newton, mas o retorno a ele. É o retorno a esse projeto de determinação das leis matemáticas associadas as causas (em vez de supor diretamente as causas), depois de algumas extravagâncias da escola

laplaciana. Tanto que o uso de modelos mecânicos, e menções a causas, não desapareceram na ciência-empírico matemática. Continuaram a ser usados, ainda que com mais parcimônia, e continuam a ser utilizados ainda hoje. Além disso, o referido procedimento euleriano de que o papel do cientista é reduzir os fenômenos à um conjunto de equações diferenciais e depois integrá-las (que se tornou a prática da ciência empírico-matemática até hoje) também não é estranha ao programa dos *Principia*. Reduzir os fenômenos a equações diferenciais e integrá-las significa o mesmo que dizer que é preciso (1) determinar as leis matemáticas que regem os fenômenos e depois (2) deduzir as consequências matemáticas dessas leis. Em outras palavras, resume, basicamente o projeto da análise e síntese. O que não fica evidente nessa descrição é o quão tortuoso é, com frequência, determinar essas leis, e nem o caminho para fazê-lo; e também não fica evidente nessa descrição o quão complexo é, muitas vezes, resolver tais problemas de integração. Mas trata-se de um resumo da análise e síntese, ou algumas das suas variações. Por exemplo, havendo uma lei já determinada que não está na forma de equações diferenciais (como era o caso dos *Principia*), o papel do matemático seria reduzir essas leis a equações diferenciais e integrá-las (explorar as suas consequências para várias situações específicas de interesse). Esse processo se aplicaria, assim, na etapa da *síntese*. Por outro lado, se a lei ainda não foi determinada mas há modelos teóricos que precisam ser explorados, da mesma forma a abordagem do matemático seria reduzir esse modelo à equações diferenciais e integrá-las. Nesse caso está trabalhando dentro da *análise*. Essa sugestão de Leibniz e Euler, portanto, pouco informa sobre a articulação do processo de análise e síntese, mas de todo modo é perfeitamente compatível com o programa mais amplo dos *Principia*. Não há declínio do programa metodológico dos *Principia* com a prevalência da abordagem formalista a partir da segunda metade do séc. XIX.

A segunda conclusão que podemos chegar do exposto nos parágrafos anteriores é que a chamada “revolução analítica”, muito distante de ser um rompimento com o programa dos *Principia* parece ser o efeito da sua assimilação. Parece ser o resultado da incorporação do modelo de investigação lançado pelos *Principia*: avançar gradativamente para as causas mais gerais por meio matemática, ou mais exatamente, por meio de leis matemáticas. Foi necessário mais de um século para que os *Principia* fosse assimilado e reformulado numa linguagem matemática mais apropriada; e no séc. XIX esse programa começou a entregar os seus frutos. Toda a polêmica sobre as leis do movimento, os princípios do trabalho virtual, lei do menor esforço não estava relacionada a determinar qual era o princípio ou a abordagem correta, mas em saber qual era o princípio *mais essencial*; qual derivava de qual, ou seja, sobre qual era a lei mais geral. Ao final, tais leis se consolidaram no princípio da conservação

de energia, que foi considerado mais geral que as leis do movimento de Newton, e se sistematizou na mecânica lagrangiana e hamiltoniana. Essa obtenção de leis mais gerais gerou inicialmente a unificação da mecânica e das teorias do calor, e depois a unificação da eletricidade e do magnetismo. Observamos, aqui, o legítimo trajeto da análise, do avanço gradual em direção às causas mais gerais dos fenômenos por meio de leis matemáticas. Por outro lado, a etapa da *síntese* também ocorreu: nas aplicações da lei da gravitação na mecânica celeste, que se desenvolveu pelo séc. XVIII e XIX, e também nas aplicações das leis da termodinâmica, do eletromagnetismo e da óptica numa variedade de fins tecnológicos e práticos que entrou no séc. XX. A chamada revolução analítica parece ser mais o efeito do avanço do novo programa de investigação da natureza que foi iniciado nos *Principia*, que, por ter adesão de um grande número de matemáticos, passou a ser coletivamente e profissionalmente desenvolvido.

A terceira conclusão que podemos chegar do exposto nos parágrafos anteriores é que o programa dos *Principia* não termina na assim chamada “segunda revolução científica”. Como foi mencionado antes, a suposta segunda revolução científica está intimamente associada com a revolução analítica citada acima. Mas se a revolução analítica foi principalmente o efeito da incorporação do programa dos *Principia*, também a segunda revolução científica como um todo é um desdobramento desse programa. É claro que alguém pode objetar argumentando que a Química e as ciências da vida não avaçaram necessariamente por meio de “leis matemáticas”. É verdade. Mas essas ciências surgiram a partir da constatação de que esse novo modelo de investigação da natureza – o modelo da *ciência empírica* – deu certo. Esse modelo da ciência empírica, de todo modo, até chegar nas leis mais gerais e abstratas (que são as leis matemáticas), iniciava com o projeto indutivista baconiano das histórias naturais. É esse projeto, aparentemente, que unifica todo o programa da ciência empírica (matemática ou não), como bem percebeu Whewell na sua obra monumental *The history and philosophy of inductive sciences*. As ciências do séc. XIX estão fundadas a partir do sucesso do esquema indutivo, e nesse sentido são herdeiras tanto de Aristóteles quanto de Francis Bacon. Mas foi Newton quem mostrou que era possível avançar o programa empírico inclusive para causas ocultas (antes acessíveis somente à especulação filosófica) por meio da teorização matemática controlada, e sujeita a confirmação indutiva indireta. E isso justifica a implementação do projeto baconiano para outras ciências, embora se possa questionar o grau de sucesso que essas novas ciências obtiveram, e os seus limites quanto à teorização sem o uso da matemática.

De todo modo, aqui admito que a chamada “segunda revolução científica” se desenvolveu principalmente devido os resultados da assimilação e consolidação do programa dos *Principia*, colhendo os frutos dessa determinação gradual das causas por meio de leis empírico-matemáticas, numa legítima ciência teórica empírico-matemática. Não é sem razão que o declínio do uso da terminologia “filosofia natural” ocorreu na segunda metade desse século, com a substituição pela denominação mais corrente hoje “ciência natural”, além da atribuição do termo “física”, ou “física-matemática”, para designar a ciência empírico-matemática surgida a partir dos *Principia*. Não é sem razão, também, que é desse período o surgimento da denominação “física teórica”, em oposição ao que depois veio a se chamar “física experimental”, o trabalho de formulação de leis matemáticas pela observação *direta* dos fenômenos, de maneira mais descritiva, como nos trabalhos de Kepler e Galileu. O programa lançado por Newton nos *Principia* pode ser legitimamente caracterizado como o programa da própria *física teórica*, o programa capaz de determinar gradualmente a causas dos fenômenos naturais, por meio de leis matemáticas, numa abordagem *teórica* indireta. Não surpreende, portanto, que é precisamente na segunda metade do séc. XIX que surja a demanda para a cadeira de um “segundo físico” nas universidades alemãs, precisamente o pesquisador que faria as vezes do físico teórico, espaço antes ocupado pelos matemáticos.

Ao defender a necessidade da segunda cadeira de Física na Alemanha, muitos físicos precisaram distinguir os trabalhos desse pesquisador daqueles que lidavam com a matemática pura. Ademais, ao traçarem a origem da disciplina da física teórica, e a sua distinção com a matemática pura, a maioria deles a localiza iniciando nos *Principia* de Newton.⁹⁰⁹ O físico alemão Paul Volkmann inicia o seu *Introdução ao estudo da Física Teórica* com a mecânica de Newton a partir do séc. XVII. Helmholtz também inicia a sua pesquisa sobre a física teórica com a mecânica de Newton.⁹¹⁰ Boltzman localiza “o ponto de partida da física teórica” em Newton, fazendo referências também a Galileu.⁹¹¹ Wien argumentou que a realização mais significativa da física teórica foi a mecânica teórica de Newton e a sua lei da gravitação.⁹¹² Até Einstein afirmou, mais tarde, que a primeira tentativa de uma “fundação teórica uniforme” foi a de Newton.⁹¹³ E da mesma forma vários outros. Boa parte dos físicos teóricos do séc. XIX, especialmente da segunda metade desse século, entendiam que a origem da abordagem que praticavam, e que tantos frutos já havia fornecido para a caminhada

⁹⁰⁹ Jungnickel, 2017, p.38.

⁹¹⁰ Helmholtz, 1873.

⁹¹¹ Boltzman, 1899.

⁹¹² Jungnickel, op.cit., p.39.

⁹¹³ Einstein, 1940.

humana, iniciara com os *Principia* de Newton. Em outras palavras, não foram apenas os sucessores imediatos de Newton no séc. XVIII que viram nos *Principia* uma revolução no estudo da natureza, conforme Cohen nos mostrou; os continuadores dessa tradição no séc. XIX também concordaram com essa posição, e foram além, nomeando essa abordagem de “física teórica”. A “revolução newtoniana” referida por Cohen foi, portanto, a revolução que deu origem à *física teórica*.

O programa dos *Principia*, portanto, não termina na assim chamada “segunda revolução científica”. Estritamente falando, não há “segunda revolução científica”, embora a expressão seja válida como recurso para enfatizar a dramaticidade das mudanças e transformações do período. O que há é a consolidação do programa dos *Principia*, o que produziu relevantes resultados que impulsionaram as transformações desse período. O que há é uma segunda etapa da revolução newtoniana, uma etapa em que os frutos da comunidade já estabelecida de filósofos-geômetras (ou, mais precisamente nesse período, de *físico-matemáticos*) começaram a se multiplicar e se alastrar em todas as direções. E desse alastramento de resultados não surgiram apenas novas disciplinas e profissões, científicas ou tecnológicas; surgiu a própria delineação da ciência natural como conhecemos hoje, da Física, e especialmente da Física Teórica. Consolidou-se, enfim, a substituição do antigo modelo de investigação aristotélico por um modelo baconiano-newtoniano de investigação, ainda que parte da estrutura do método escolástico tenha permanecido nele incorporado. Vejamos, agora, se esse programa sobreviveu às transformações ocorridas no séc. XX, ou se, pelo contrário, tais transformações é que também foram impulsionadas pelo êxito desse programa.

19.3 A CIÊNCIA EMPÍRICO MATEMÁTICA NO SÉC. XX

19.3.1 Panorama histórico

A ciência empírico-matemática do séc. XX foi marcada pelo surgimento tanto da teoria da relatividade geral e especial, proposta pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955), quanto pela teoria quântica, impulsionada principalmente pelo trabalho do também alemão Max Planck (1858-1947). O impacto dessas novas teorias foi tão significativo que muitos historiadores as consideraram como dando origem a uma “terceira revolução científica”.⁹¹⁴ Da parte dos físicos, não foi diferente. Embora no final do séc. XIX eles não

⁹¹⁴ Kuhn, 1998; Goldberg, 1984; Staley, 2008.

tivessem enxergado a ocorrência de uma revolução, no séc. XX o caso foi diferente: eles efetivamente enxergaram uma revolução.

A percepção dos cientistas de que houve uma revolução na Física no início do séc. XX ocorreu, em primeiro lugar, porque a teoria da relatividade rompeu com os conceitos mais elementares da mecânica clássica: o espaço e o tempo absolutos, e a distinção entre massa e energia. Com a teoria da relatividade, os conceitos independentes e absolutos de espaço e tempo da mecânica clássica deram lugar a ideia de espaço-tempo como uma entidade unificada composta de quatro dimensões (três espaciais e uma temporal), dependente da velocidade e da energia. Nessa teoria, a maior velocidade possível é a velocidade da luz, e quanto mais próximo dessa velocidade, maior a distorção ocorrida no espaço-tempo. Da mesma forma, em regiões em que existe uma suficiente concentração de massa-energia, também ocorre essa distorção. Naturalmente, isso levava a uma alteração profunda em toda mecânica clássica. Além disso, as alterações da teoria da relatividade atingiam a própria teoria da gravitação universal (tal como concebida no séc. XIX), que considerava a atração gravitacional como mais uma espécie de campo – o campo gravitacional – que atuava instantaneamente e a grandes distâncias. Esse ponto também era fundamentalmente incompatível com a teoria da relatividade, que não permitia que qualquer interação viajasse mais rápido que a velocidade da luz, como ocorreria no caso da interação entre os planetas segundo a teoria da gravitação. Assim, estabeleceu-se entre os físicos uma noção de *ruptura* entre a mecânica clássica e a teoria relativística. Como já foi mencionado na seção 15.5, historiadores da ciência como Kuhn reforçaram essa percepção de ruptura, defendendo, inclusive, que há uma incomensurabilidade entre a gravitação e a relatividade geral.

No que se refere à mecânica quântica, a situação é semelhante. A percepção de revolução na Física que os cientistas do período tiveram ocorreu porque eles também perceberam uma ruptura em conceitos fundamentais. Como se sabe, a mecânica quântica é uma teoria que descreve o comportamento dos fenômenos do nível dos átomos, ou na escala subatômica. Os grandes avanços tecnológicos ocorridos na segunda metade do séc. XIX geraram um significativo impulso nas investigações teóricas que culminaram nesse campo. Ainda no séc. XIX, John Dalton e Amedeo Avogadro desenvolveram a teoria atômica da matéria com seus estudos. A partir dessa teoria, Maxwell, Boltzmann e outros estabeleceram a teoria cinética dos gases. Em 1859, Gustav Kirchhoff descobriu o problema da radiação de corpo negro, investigado também por Stefan e Boltzmann. A partir desse ponto uma sequência de descobertas realizadas por muitos dos cientistas mais brilhantes do séc. XX, boa parte vencedores do prêmio Nobel recém-criado, deram origem a teoria quântica. Em 1897,

J.J. Thomson realizou a experiência dos raios catódicos, que se mostrou consistente com a existência de partículas subatômicas, as quais chamou de “elétrons”, o que lhe rendeu o prêmio Nobel de 1906. Em 1900, Max Planck propôs a hipótese de que a energia é absorvida ou irradiada por “pacotes” de energia discretos, chamados “quanta”, o que explicava com bastante precisão o problema do corpo negro, e o que lhe rendeu o prêmio Nobel em 1918. Em 1905, Einstein usou a hipótese de Planck para explicar o *efeito fotoelétrico*, o que lhe rendeu o prêmio Nobel em 1921. Niels Bohr aplicou as ideias de Planck no modelo do átomo de hidrogênio, explicando as suas linhas espectrais, o que lhe rendeu o prêmio Nobel em 1922. Em 1923, Louis de Broglie apresentou uma teoria em que defendia que a matéria tinha características tanto de partículas quanto de ondas, o que lhe rendeu o prêmio Nobel em 1929. Em 1925, Max Born, Heisenberg e Schrodinger – todos ganhadores do prêmio Nobel – desenvolveram a mecânica ondulatória. Born apresentou uma interpretação probabilística da função de onda de Schrodinger em 1926, chegando na ampla aceitação da teoria quântica em 1927.

Dois rompimentos ficam claros nesse breve histórico da teoria quântica: o comportamento discreto da energia, não contínuo, como era pressuposto nas teorias físicas clássicas; e o comportamento dual da própria matéria, como onda e partícula, o que fugia completamente de qualquer parâmetro física clássica. Em outras palavras, tanto a teoria da relatividade quanto a teoria quântica rompiam com os parâmetros mais elementares de toda física anterior, que se baseava em conceitos básicos como espaço, tempo, onda, matéria e energia, os quais foram todos alterados. Essa reformulação da física anterior gerou um novo impulso na ciência empírico-matemática, com um volume de novas descobertas, novas agendas de pesquisas, novas tecnologias, novos problemas, o que conduziu ao estado da arte da física atual, com a conhecida divisão entre “física clássica” e “física moderna”, para se referir respectivamente à física antes e depois da emergência da teoria da relatividade e da teoria quântica.

Feito esse breve esboço da ciência empírico-matemática do séc. XX, podemos retornar novamente à nossa questão principal desse capítulo. Há qualquer possibilidade de continuidade do programa de Newton nos *Principia* através dessa “terceira revolução”? Não é possível duvidar, nesse ponto, que houve uma completa reformulação dos conteúdos da Física. Nesse sentido, não há como negar que houve uma revolução, pelo menos em algum sentido. Mas a nossa questão inicial é investigar, relembremos, se as mudanças aqui apresentadas estão localizadas no *programa metodológico* dos *Principia* – o programa da física teórica – ou em conteúdos específicos da Física. Já conhecemos a posição de Thomas

Kuhn, que na transição da mecânica clássica para a relativística houve uma “revolução científica”, que no seu entendimento implica numa mudança inclusive de métodos, padrões de aceitabilidade, visão de mundo, etc. Já entramos em contato também com os trabalhos de Harper e Smith, que desconfiaram que não houve uma transição revolucionária entre a gravitação universal e a relatividade geral, pelo menos na questão metodológica. A nossa questão aqui é, por um lado, questionar se essa visão de Kuhn se sustenta à luz da caracterização que foi feita do programa da física teórica lançado pelos *Principia* anteriormente, e que já percebemos que foi seguido pelo menos até o fim do séc. XIX; e por outro lado, caso Harper e Smith tenham razão, esclarecer como essa transição entre a gravitação universal e a relatividade geral pode ser mais precisamente esclarecida. Para simplificar a nossa tarefa nessa etapa vou delimitar a nossa análise principalmente à transição da gravitação universal para a relatividade geral, o que está mais proximamente vinculado aos temas desenvolvidos nesse trabalho, deixando a análise da transição para a teoria quântica para trabalhos futuros.

19.3.2 Transição da gravitação universal para a relatividade geral

Haveria uma ruptura na transição entre a gravitação universal e a relatividade geral? Para avaliar essa questão precisamos retornar aos desenvolvimentos no capítulo 17. Na ocasião vimos que o programa de Newton pode ser dividido em duas etapas, a *análise* e *síntese*. A etapa da análise obedece a hierarquia das causas, e busca sempre a causa próxima do fenômeno, com o auxílio das leis empírico-matemáticas. Após encontrada uma causa mais geral ocorre uma etapa de síntese, na qual um modelo de mundo é construído, deduz-se as consequências matemáticas, determinando-se novos fenômenos e explicando discrepâncias. A etapa da síntese prossegue por um tempo considerável até o esgotamento do modelo, quando se acumulam problemas não resolvidos (discrepâncias). Estando o modelo bem refinado, as discrepâncias começam a se tornar informativas, e se juntam a outros fenômenos na busca por uma causa mais geral. Em algum momento, uma nova causa mais geral é proposta, e se confirmada, dá origem a uma nova etapa de síntese. E assim o processo continua. Temos, portanto, uma transição *vertical* e *horizontal* de modelos, como evidenciado no diagrama da figura 104, na seção 17.3, e na transição vertical há uma mudança na lei matemática, com acréscimo de novas dependências. Nesse processo de transição vertical, seguindo a hierarquia das causas, a causa mais geral, associada a uma lei empírico-matemática, é sempre compatível

com a lei associada à causa anterior, o que se torna uma das restrições necessárias para a sua aceitação.

Quando falamos da transição entre a gravitação universal para a relatividade geral estaríamos falando de uma mudança na lei empírico-matemática. Portanto, uma transição *vertical*. Estamos falando da etapa da *análise*. Assim, a pergunta importante, aqui, seria: é possível compreender a transição da gravitação universal para a relatividade geral como a continuidade do programa da *análise* na investigação das causas da mecânica celeste? Ou seria essa transição de natureza totalmente diversa, sugerindo mesmo uma ruptura com o programa de Newton? Eis a questão central dessa seção.

Já ficou claro anteriormente que o programa da *síntese* na mecânica celeste teve o seu desenvolvimento tal como proposto pelo modelo dos *Principia*. Após a confirmação da lei da gravitação, ainda no séc. XVIII os sucessores de Newton passaram a desenvolver o modelo de mundo a partir dessa lei, acrescentando acidentes, resolvendo problemas, encontrando novos fenômenos (como o planeta Urano). É verdade que em algum momento, diante da dificuldade de resolução do problema dos três corpos se cogitou alguma modificação na lei da gravitação, mas esse problema não se tornou efetivamente uma *discrepância*, adquirindo uma resolução posterior.⁹¹⁵ O programa da *síntese* prosseguiu por décadas de refinamento até encontrar uma discrepância de fato, um problema que não encontrou solução, que foi o já referido problema da precessão da órbita de Mercúrio. Mas e o programa da *análise* na mecânica celeste? Houve alguém que perseguiu a causa mais geral da atração universal entre todas as partículas de matéria? O programa de Laplace de forças de curto alcance estava mais ligado à etapa da *síntese* do que com a *análise*. A questão da *análise* não é se perguntar se a força de atração gravitacional pode explicar fenômenos variados no mundo terrestre, como no caso da capilaridade e elasticidade. Em vez disso, seria se perguntar sobre qual é a *causa* dessa atração. Essa *causa* foi perseguida nos séc. XVIII e XIX?

Não tenho dúvida que o impulso que as pesquisas sobre a eletricidade tiveram durante o século XVIII está diretamente relacionado com os objetivos da etapa da *análise*. No Escólio Geral, Newton havia sugerido que causa da atração mútua entre as partículas poderia ser explicada pelos fenômenos elétricos. Mas à época não haviam dados empíricos suficientes para que os testes fossem efetuados. Penso que por essa razão os estudos elétricos iniciais seguiram em grande medida o formato newtoniano de investigar a natureza (leis de força). Não apenas porque estavam incorporando as técnicas e métodos de Newton nesses estudos,

⁹¹⁵ Caparrini, 2013, p. 394.

mas porque estavam levando adiante a busca da causa da atração mútua das partículas. Isso se torna ainda mais evidente quando Newton, então presidente da *Royal Society*, já no séc. XVIII, convida Francis Hawksbee (1660-1713) para ser seu assistente em pesquisas sobre a eletricidade. Hawksbee chegou a inventar a máquina que leva o seu nome, que hoje é considerado o primeiro gerador eletrostático.

Os estudos de Hawksbee, no entanto, não revelaram muito sobre a questão que provavelmente o levou a ser recrutado por Newton. Havia ainda pouco conhecimento sobre os fenômenos elétricos, e deveria haver uma extensa coleção de experimentos sobre esses fenômenos antes de começar a formulações de leis, no melhor estilo baconiano. Os frutos nesse sentido só chegaram mais de 50 anos após a morte de Newton, em 1784, quando o engenheiro militar Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), com o auxílio da invenção da sua balança de torção, estabeleceu que os corpos carregados eletricamente sofrem uma atração proporcional ao inverso do quadrado da distância.⁹¹⁶ Assim, a primeira parte do programa de análise que foi iniciada por Newton alguns anos após a publicação dos *Principia*, que se desenvolveu por quase um século, teve como primeiro clímax a conclusão que a atração elétrica é, de fato, compatível matematicamente com a gravitação. No entanto, esse resultado se referia apenas à dependência da *distância*. No que se referia às demais dependências os resultados não foram conclusivos, pois a lei de Coulomb havia mostrado que a atração elétrica era proporcional ao produto das *quantidades de cargas*, não das *quantidades de matéria*. Até que se pudesse mostrar qual era a relação entre *carga* e *massa* – se é que havia alguma – não se poderia afirmar que os fenômenos elétricos eram compatíveis matematicamente com a atração gravitacional. De todo modo, o resultado de Coulomb serviu para mostrar que a hipótese da origem elétrica da causa da atração gravitacional era matematicamente possível e, por conseguinte, não poderia ser afastada. A continuidade das investigações era necessária para uma conclusão definitiva.

É claro que nesse ponto o leitor pode argumentar que o objetivo dos cientistas que estudavam a eletricidade no séc. XVIII e XIX não era necessariamente explicar a atração gravitacional. Concorro. Não era “necessariamente”. Mas sem dúvida para muitos deles era exatamente esse o objetivo. Por exemplo, uma breve análise histórica das obras de Henry Cavendish (1731-1810) já é suficiente para revelar que ele estava interessado em testar a lei do inverso quadrado para a força elétrica seguindo a hipótese de Joseph Priestley (1733-1804) que acreditava que havia uma analogia entre a força elétrica e gravitacional.⁹¹⁷ Cavendish

⁹¹⁶ Veja Falconer, 2004. Veja também Heering, 1992.

⁹¹⁷ Veja Dorling (1974), Falconer (2014), Heilbron (1979).

chegou a usar como modelo de sua análise a proposição 70 do Livro I dos *Principia*.⁹¹⁸ Da mesma maneira, alguns anos depois Andre-Marie Ampere (1775-1836) – que pertencia a escola laplaciana – buscou determinar a leis de força magnética seguindo o modelo newtoniano, partindo da hipótese que ela também era proporcional ao inverso do quadrado da distância, e assumindo que essa força estava relacionada com as forças elétrica e gravitacional.⁹¹⁹ William Thomson (1775-1833) também fez associação semelhante, relembrando o trabalho de Coulomb e Poisson. Ele afirma:

Nos trabalhos de Poisson sobre a eletricidade encontramos a solução analítica de problemas que se combinam com as partes mais importantes das pesquisas experimentais de Coulomb; a correspondência desses resultados é bastante satisfatória, e a força e a beleza das análises está colocando a teoria da eletricidade próxima da teoria da gravitação, pelo primeiro lugar da correspondência matemática na ciência natural.⁹²⁰

É claro que nessa passagem Thomson está louvando as teorias da eletricidade, que estavam chegando num grau de evidência e matematização semelhante à teoria da gravitação. Mas a passagem também tem o mérito de revelar que o horizonte desses cientistas sempre foi os *Principia* de Newton, não sendo razoável supor que o programa dessa obra tivesse esmaecido completamente.

Mas, de fato, à medida que o tempo foi passando, as pesquisas sobre a eletricidade e o magnetismo foram ganhando vida própria e as novas gerações perderam gradativamente o contato com aqueles objetivos iniciais do programa de Newton. Depois que a investigação avança, adquire novos objetivos, novas aplicações, desdobra-se em outras consequências, abrem-se novas portas, e ao cabo de certo período já nem se recorda mais o que a deu origem, o impulso inicial da investigação. A bem da verdade, dependendo dos resultados que se alcançou, essa origem já nem importa mais. Ainda assim, insisto que isso não significa que a relação entre as coisas deixou de existir, e nem que não haviam cientistas que estavam atentos a essa relação. É isso que observamos mais claramente no séc. XIX, com o avanço das pesquisas na área do eletromagnetismo.

Na segunda metade do século XIX as pesquisas sobre a eletricidade atingiram um novo clímax. Constatou-se que os fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos estavam, de alguma forma, relacionados. Entre 1820 e 1830, Oersted, Faraday e Ampere mostraram essa relação. Desenhava-se o campo do *eletromagnetismo*. Por volta de 1860 o físico britânico

⁹¹⁸ Veja Falconer (2017).

⁹¹⁹ Veja Darrigol, 2000, p.21.

⁹²⁰ Heering, 1992. Veja também Falconer, 2004.

James Clerk Maxwell (1831-1879) determinou as leis que unificaram definitivamente a eletricidade e do magnetismo. Os fenômenos elétricos e magnéticos poderiam ser considerados como manifestações de um único *campo eletromagnético*. E precisamente nesse período se intensificam as buscas de relações entre a gravitação e o eletromagnetismo, conforme já era previsto pelo programa dos *Principia*. Michael Faraday (1791-1867) tentou fazer experimentos para avaliar se a gravidade produzia algum efeito análogo à indução eletromagnética por ele recém descoberta. Tentativas de conexões também foram realizadas pelo próprio Maxwell, além de Holzmüller, Tisserand, Poincaré, Lorentz, Minkowsky, Hilbert, entre outros.⁹²¹ Com o avanço das pesquisas na área do eletromagnetismo, passou-se a buscar uma causa mais geral para gravidade, a partir de uma possível origem eletromagnética. Um exemplo particularmente interessante é do físico holandês Hendrik Lorentz (1853-1928). Depois que as leis do eletromagnetismo já estavam bem estabelecidas, por volta de 1900, Lorentz escreveu um artigo intitulado *Considerações sobre a Gravitação*, no qual procurou explicar e avaliar a compatibilidade entre a atração gravitacional e as leis do eletromagnetismo. Afirma ele nas primeiras linhas do seu artigo:

Depois de tudo o que aprendemos nos últimos vinte ou trinta anos sobre o mecanismo dos fenômenos elétricos e magnéticos é natural examinar até que ponto é possível explicar a força da gravitação pela atribuição de um certo estado do éter. Uma teoria da atração universal fundada em tal suposição assumiria uma forma mais simples se novas hipóteses sobre o éter pudessem ser evitadas, i.e., se os dois estados nos quais existem um campo elétrico e magnético, e cuja conexão mútua é expressa pelas bem conhecidas equações eletromagnéticas, forem suficientes para esse propósito.⁹²²

Lorentz enfatiza que “depois de tudo o que aprendemos nos últimos vinte ou trinta anos sobre o mecanismo dos fenômenos elétricos e magnéticos é natural examinar até que ponto é possível explicar a força da gravitação (...)”. A ênfase no fator “naturalidade” de se buscar a explicação de um princípio de um ramo por meio de outro reforça o entendimento de que uma possível relação entre os dois campos sempre permaneceu no horizonte dos físicos.

Mas um resultado mais concreto para uma causa mais geral para a gravidade iria levar ainda alguns anos. O que prosperou mais rapidamente foi uma outra relação também procurada, nesse caso entre o eletromagnetismo e a óptica. Em 1857, o físico alemão Gustav Kirchhoff (1824-1887) constatou que a velocidade de um sinal elétrico era a mesma velocidade da luz, o que sugeria aos físicos uma relação entre os fenômenos elétricos e

⁹²¹ Vieira, 2018.

⁹²² Lorentz, 1900.

luminosos. Surgia a hipótese de que a luz e os efeitos elétricos e magnéticos eram manifestações de um mesmo fenômeno eletromagnético. Entre 1862 e 1864, Maxwell formula as suas famosas equações do eletromagnetismo que unifica a eletricidade e o magnetismo, e calcula a velocidade do campo eletromagnético, obtendo um valor muito próximo da velocidade da luz, corroborando o resultado de Kichhoff. Com base nos seus resultados, Maxwell se convence da conexão entre a óptica e o eletromagnetismo, e adota a hipótese de que a luz é um fenômeno eletromagnético, e, por outro lado, que o campo eletromagnético é um fenômeno ondulatório, assim como já se sabia que era o caso da luz. Maxwell e outros se convencem que tanto a óptica quanto o campo eletromagnético são efeitos da propagação de um fenômeno ondulatório eletromagnético: *as ondas eletromagnéticas*. Juntamente com a lei de força de Lorentz, a teoria eletromagnética de Maxwell se tornou amplamente aceita, e ainda hoje é considerada a teoria de base do *eletromagnetismo clássico*.

Embora a teoria eletromagnética de Maxwell-Lorentz tenha sido amplamente aceita, ela tinha um problema grave. Um dos seus resultados mostrava que a velocidade da luz era uma constante universal, que dependia apenas da permissividade dielétrica e permeabilidade magnética no espaço vazio, segundo a fórmula abaixo:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Esse resultado representava um problema inquietante, porque entrava em conflito com a mecânica clássica, especialmente um dos seus princípios mais fundamentais, que era o princípio da relatividade da mecânica clássica, ou, a chamada *lei da invariância* de Galileu. Esse princípio afirma que as leis da física são válidas para todos os referenciais inerciais, em movimento retilíneo uniforme, por uma simples transformação que leva em conta a velocidade do referencial em movimento. O problema era que a teoria eletromagnética de Maxwell e Lorentz fornecia um resultado que a velocidade da luz era absoluta, não dependendo, inclusive, do movimento da fonte emissora, contrariando frontalmente o princípio extensivamente confirmado da mecânica clássica. A solução proposta pela maioria dos físicos foi buscar propriedades específicas de um suposto *meio* pelo qual as ondas eletromagnéticas se propagavam – o “éter luminífero” – que pudesse explicar a discrepância entre a teoria eletromagnética e a mecânica clássica. Vários modelos mecânicos para o éter foram propostos buscando explicar a propagação das ondas de luz ou das ondas eletromagnéticas nesse período. As propriedades desse suposto éter em cada modelo

variavam. Mas para que os modelos mecânicos permanecessem ajustados aos fenômenos e experimentos que iam sendo realizados, as propriedades que precisavam ser atribuídas para o suposto éter foram se tornando cada vez mais exóticas, para não dizer “mágicas”. O éter precisava ser fluido, mas milhares de vezes mais rígido que o aço (para suportar as altas frequências de ondas da luz); deveria ser praticamente sem massa e sem viscosidade (para não afetar o movimento dos planetas); além disso deveria ser transparente a ponto de ser invisível, não dispersivo, incompressível e contínuo numa escala muito pequena. Que tipo de substância física poderia ter propriedades tão exóticas, e algumas até mesmo mutuamente excludentes? Além disso, e para agravar a situação, a grande maioria dos vários experimentos projetados no intuito de detectar esse éter falharam dramaticamente. E os poucos que forneceram resultados positivos, pouco tempo depois revelaram algum erro. O mais famoso desses experimentos foi o realizado por Albert A. Michelson e Edward W. Morley, realizado em 1881 e repetido em 1887, que buscava detectar o movimento relativo da Terra em relação a um éter estacionário – um dos experimentos fracassados mais famosos da física.

Diante de todos esses experimentos negativos para detectar o éter, a teoria eletromagnética de Maxwell-Lorentz permaneceu com grave problema de incompatibilidade. Não havia dúvidas entre a grande maioria dos físicos de que a luz era uma onda eletromagnética, mas nem Maxwell nem qualquer de seus interlocutores foi capaz de conciliar os quadros teóricos do eletromagnetismo e da mecânica clássica. Isso ocorreu somente em 1905, no celebrado artigo de Einstein, *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*, no qual se estabeleceram as bases da sua nova teoria da relatividade.⁹²³

19.3.2.1 A Relatividade Especial

Talvez uma das maiores dificuldades em resolver o problema com a teoria eletromagnética de Maxwell-Lorentz era que muitas observações e experimentos empíricos pareciam confirmar os seus resultados. Pela análise espectral das cores da luz, os astrônomos já haviam obtido resultados independentes que sugeriam que a velocidade da luz era sempre constante.⁹²⁴ Além disso, e estranhamente, a velocidade da luz também parecia não depender do movimento da fonte. O astrônomo holandês Willem de Sitter (1872-1934), por exemplo, observando as estrelas duplas, argumentou convincentemente que a velocidade de propagação

⁹²³ Einstein, 1989.

⁹²⁴ Einstein, 2000, p.22.

da luz não podia depender do movimento da fonte.⁹²⁵ A teoria eletromagnética, portanto, não parecia estar errada. Einstein, então, considerou a hipótese oposta, que poucos estavam dispostos a desenvolver. Em vez de assumir que havia um problema com a teoria eletromagnética, ele assumiu que havia um problema com o princípio da relatividade clássica de Galileu. Foi assim que surgiu a hoje chamada teoria da relatividade de Einstein.

Como Einstein procedeu para formular a sua teoria? Basicamente, reduzindo toda a problemática a dois simples postulados, e desenvolvendo, e aceitando, todas as consequências deles decorrentes. O primeiro postulado era o “princípio da relatividade”, que afirmava que as leis da natureza se mantêm invariáveis para todos os referenciais em movimento retilíneo uniforme – ou, como diríamos hoje, para todos os “referenciais inerciais”.⁹²⁶ O segundo postulado afirmava que “a luz sempre se propaga no espaço vazio com uma velocidade definida c que é independente do estado de movimento do corpo emissor”.⁹²⁷

Na verdade, nenhum desses postulados apresentados por Einstein era novo. A novidade era supor que eles poderiam ser conciliados. O primeiro postulado, como já foi mencionado, não passava do “princípio da invariância” ou “princípio da relatividade” de Galileu.⁹²⁸ A partir dele se segue o *teorema das velocidades*, que afirma que uma pessoa que se move sobre o vagão de um trem em movimento, no mesmo sentido do trem, tem a sua velocidade, em relação a estação no leito da estrada de ferro, dada pela soma da sua própria velocidade e a velocidade do trem. Um princípio elementar da mecânica, mas que se tornou de fundamental importância para a ciência que emergiu após Galileu e Newton. A partir desse princípio é possível fazer o que se chamamos “transformações de Galileu”: para qualquer referencial inercial é possível fazer uma simples operação matemática de transformações de coordenadas onde as leis da natureza, expressas matematicamente em um sistema de referência, mantêm-se invariáveis em outro. Até aqui, portanto, Einstein nada estava apresentando de novo, muito pelo contrário, reafirmou o conhecido princípio da mecânica clássica (que muitos estavam negando, para salvar a teoria eletromagnética).

O segundo postulado também não era original. Como já foi mencionado acima, haviam evidências empíricas da invariância da velocidade da luz no vácuo em relação ao movimento do corpo emissor. Alguns cientistas já consideravam essa invariância como um fato estabelecido. Talvez Lorentz tenha sido um dos primeiros a fazer isso. Ele procurou mostrar que os estudos sobre os fenômenos ópticos e eletromagnéticos de corpos em

⁹²⁵ Ibid.

⁹²⁶ Einstein, 2000, p.18.

⁹²⁷ Id, 1905.

⁹²⁸ Id, 1999, p.18-19.

movimento levavam a inevitável consequência da constância da velocidade da luz no vácuo, independente do movimento do corpo emissor.⁹²⁹ Isso seria uma consequência da teoria eletrodinâmica de Maxwell aplicada para corpos em movimento. Mas como essa admissão parecia contradizer justamente o “princípio da relatividade” de Galileu, Lorentz adaptou as transformações de Galileu para a nova situação, chegando às famosas transformações que hoje levam o seu nome. Em particular, nas “transformações de Lorentz”, o espaço e tempo sofrem uma variação que dependem da velocidade do referencial.

Mas Lorentz tentou explicar a estranha consequência da variação do tempo e do espaço apelando para alguma propriedade do éter luminífero. Ele postulou um éter totalmente imóvel, que em nada interferiria no movimento dos corpos materiais. E na ausência de uma substância material com essas propriedades, Lorentz propôs um *éter eletrostático*, invertendo as propriedades essenciais da matéria: em vez das propriedades eletromagnéticas serem reduzidas às mecânicas, talvez as propriedades mecânicas é que deveriam ser reduzidas às eletromagnéticas.⁹³⁰ Os fenômenos eletromagnéticos seriam mais essenciais que os mecânicos. O físico holandês, contudo, não avançou muito além disso. Ele não foi capaz de explicar em definitivo as variações do espaço e tempo deduzidas das suas transformações. Alguns interpretaram esses resultados como uma evidência que o princípio da relatividade de Galileu deveria ser abandonado; outros procuravam uma explicação *local* para tais distorções, uma vez que negar séculos de sustentação empírica da mecânica clássica também não parecia um bom caminho. Seria trocar um problema por outro maior. Por isso a grande originalidade do artigo de Einstein não estava no conteúdo dos postulados que propôs, mas em assumi-los, ambos, como postulados numa mesma teoria.

O que está implícito na recepção dos dois postulados de Einstein é que a invariância da velocidade da luz no vácuo é assumida como uma *lei física*.⁹³¹ Sendo a constância da velocidade da luz no vácuo uma lei física, e dado que as leis físicas não se alteram na mudança entre referenciais inerciais, ambos os postulados poderiam ser recepcionados. A partir daí ele desenvolveu uma série de consequências de grande repercussão. A primeira consequência é a *relatividade da simultaneidade*, o que implica na relatividade do espaço e do tempo, o que podia ser expresso matematicamente pelas transformações já enunciadas por Lorentz. Mas contrariamente ao físico holandês, Einstein não se privou de interpretar e acatar claramente o significado dessa consequência: caso admitamos os dois postulados

⁹²⁹ Einstein, 2000, p.22-24.

⁹³⁰ Id, 1920.

⁹³¹ Op.cit, p.22-24.

supracitados, o que se segue é que o espaço e o tempo não podem ser considerados absolutos, como até então houvera sido na mecânica. Com efeito, a velocidade da luz é que seria absoluta, enquanto que o espaço e o tempo passariam a depender da velocidade do referencial. Daí surgem as famosas equações da “dilatação temporal” e “contração do espaço” de Einstein:

$$\Delta t_0 = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\Delta S_0 = \Delta S \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Onde v é a velocidade do referencial e c é a velocidade da luz.

A segunda consequência que se segue dos dois postulados de Einstein é a não-necessidade de um éter para explicar os fenômenos. Caso se admita a relatividade do espaço e tempo, não há mais problema a ser enfrentado pela teoria eletromagnética que exija a admissão de um meio material para a propagação. E aqui vale fazer um esclarecimento. O que Einstein fez de fundamental no seu artigo não foi apenas postular os dois axiomas aparentemente contraditórios. Foi também de *não* postular um princípio que frequentemente era aceito no ponto de partida da maior parte das teorias: o éter. Ao que tudo indica, Einstein procurou partir o mais rigorosamente possível do que os dados empíricos que dispunha à época pareciam informar. Havia uma massa imensa de dados empíricos a favor do princípio da relatividade de Galileu. Havia evidências empíricas contundentes de que a velocidade da luz no vácuo era constante e independente do movimento da fonte. E não havia qualquer evidência empírica direta do éter. Na verdade, até as mais sofisticadas experiências para detectar o seu movimento falharam. Einstein partiu, então, das premissas do princípio da relatividade de Galileu, da invariância da velocidade da luz, e simplesmente ignorou o éter. A surpreendente conclusão atingida foi que, ao se admitir a relatividade do tempo e espaço, e ao se ignorar a existência de qualquer éter, os problemas comuns da teoria eletromagnética eram resolvidos. O éter se tornou completamente supérfluo na resolução desses problemas.

Assim chegamos à terceira consequência. Aceitando a relatividade do tempo e do espaço – sem a tentativa de explicar esse fato apelando para a existência de um éter – Einstein alcançou uma conclusão que levava à unificação do eletromagnetismo e da óptica (o que estava sendo buscado desde Kirchhoff), e sem romper com o importante princípio da

relatividade de Galileu, do qual dependia toda a mecânica clássica. É o que o próprio Einstein declara já na introdução do seu famoso artigo, quando esclarece que os seus resultados mostram que “as mesmas leis da eletrodinâmica e da óptica serão válidas para todos os referenciais, para os quais as equações da mecânica [também] se mantêm válidas”.⁹³² Em outras palavras, Einstein jamais procurou “destruir” a mecânica clássica. Muito ao contrário, o que ele fez foi procurar salvá-la. E assim o fez. Com a sua relativização do tempo e do espaço, o princípio da relatividade de Galileu continuou válido, as leis do eletromagnetismo de Maxwell e Lorentz continuaram válidas, a invariância da velocidade da luz continuou válida, as transformações de Lorentz continuaram válidas, a mecânica clássica continuou válida (como boa aproximação, no caso limite de baixas velocidades), as leis de conservação de energia e massa continuaram válidas e, além disso, foram explicados os experimentos fracassados para detectar o movimento do éter; pois, com efeito, não havia éter algum; ou, se havia, poderia simplesmente ser ignorado. Tudo isso partindo-se de dois simples postulados dos quais se segue que o espaço e o tempo não são absolutos. Esses postulados unificaram o eletromagnetismo e a óptica, e, além disso, manteve as leis desses domínios compatíveis com toda física anterior (para baixas velocidades, que era o caso dados empíricos usuais). Pode-se dizer, portanto, que Einstein levou a teoria eletromagnética ao seu terceiro e maior clímax, que culminou na unificação do eletromagnetismo e óptica, sem criar um problema com as leis da mecânica.

Naturalmente, o leitor pode se perguntar onde a gravitação entra em tudo isso. Como foi mencionado há alguns parágrafos acima, as várias tentativas de explicação da lei da gravitação ocorreram a partir da teoria eletromagnética. Mas não estando plenamente esclarecida a teoria eletromagnética, restava deficiente o projeto de uma explicação da gravitação. Uma coisa dependia da outra. Todavia a solução de Einstein trouxe uma outra perspectiva e necessidade para o problema da explicação da gravitação, pois a teoria da relatividade especial reforçava a inconsistência de uma ação à distância imediata da gravitação, que entrava em conflito com a própria teoria da relatividade e a nova teoria eletromagnética. Diante das repercussões da relatividade especial para a teoria eletromagnética, tornava-se necessário, e até inevitável, uma revisão na teoria da gravitação.

⁹³² Einstein, 1905.

19.3.2.2 A Relatividade Geral

Havendo uma inconsistência entre a teoria da gravitação, a relatividade e a teoria eletromagnética, tornava-se necessário retornar ao problema da gravitação. Por outro lado, havendo os princípios da mecânica clássica sido modificados pela relatividade especial, o caminho natural era avaliar o impacto dessas modificações também na teoria da gravitação. Assim, mesmo antes do próprio Einstein, os físicos Hermann Minkowski e Henri Poincaré tentaram desenvolver uma *teoria covariante da gravidade*, a partir da reformulação proposta por Einstein na relatividade clássica de Galileu.⁹³³ No entanto, Einstein desconfiou que isso não seria possível sem uma generalização do princípio da relatividade por ele proposto também para referenciais *não-inerciais*. A teoria de Einstein estava relacionada especificamente com os referenciais *inerciais*, e nada dizia acerca dos referenciais *acelerados*. Como se sabe, o princípio da relatividade de Galileu afirmava que as leis da natureza não se alteram na mudança de um referencial *inercial* para outro. Como vimos, a teoria eletromagnética não respeitava esse princípio, mas com o ajuste realizado pela teoria da relatividade de Einstein, ela passou a respeitá-lo. Todavia, no caso de um referencial *acelerado* essa invariância simplesmente não se mantinha, nem para a mecânica e nem para o eletromagnetismo. Einstein estava interessado em investigar se, com as alterações que havia proposto na mecânica clássica, não seria possível generalizar o princípio da relatividade para *qualquer* referencial, independentemente de ser ou não inercial. Ele desconfiou que uma adequada resposta para “o problema da gravidade” dependia, ainda, de uma generalização do princípio da relatividade. Assim, ele passou a explorar os efeitos da relatividade do espaço e do tempo para referenciais acelerados, e dedicou-se a esse projeto nos dez anos seguintes.

Inicialmente, Einstein constatou que em um referencial acelerado a própria geometria do espaço se altera. Por exemplo, num disco muito grande em movimento de rotação, o comprimento de um seguimento no sentido da rotação do disco sofreria uma *contração*, enquanto que um seguimento no sentido do raio do disco não sofreria qualquer alteração. Mas isso implica que o quociente entre o comprimento da circunferência desse disco pelo seu diâmetro (o famoso número π), não seria o mesmo quando ele está em repouso e em rotação. Ou seja, Einstein chegou à conclusão que em referenciais acelerados o espaço deixa de ser euclidiano. Diante dessa conclusão, caberia a questão: será mesmo que as leis da natureza se alteram de um referencial inercial para um acelerado (o que por si só não parece razoável), ou

⁹³³ Uma teoria covariante da gravidade seria uma teoria geral da gravidade, que pudesse ser invariável em qualquer referencial. Veja Sauer, 2004.

será que essa alteração é apenas aparente, uma vez que, na verdade as mudanças seriam no próprio espaço?

Einstein já havia notado algumas evidências de que essa suposta alteração nas leis físicas⁹³⁴ nos referenciais acelerados poderiam ser apenas aparentes. Em 1907, ele havia constatado a equivalência entre a massa inercial e a massa gravitacional de um corpo. Trata-se do “princípio da equivalência”, que afirma que um referencial acelerado (por exemplo um elevador em movimento acelerado) pode ser considerado como exatamente equivalente a um campo gravitacional que produz a mesma aceleração do elevador. Da mesma forma, ele já havia notado que um disco em rotação pode ser considerado como equivalente a um campo de força radial gerando uma aceleração centrífuga constante que, em última instância, é resultado da inércia do movimento, mas que do ponto de referência do disco é semelhante a um campo de forças semelhante ao gravitacional. Do princípio da equivalência ele retirou duas importantes consequências: (1) a luz percorreria uma trajetória curva próxima de campos gravitacionais; (2) a conclusão que a constância da velocidade da luz no vácuo da relatividade especial não seria absoluta.⁹³⁵

Diante das suspeitas que o princípio da relatividade também tinha validade para referenciais acelerados, Einstein se lançou na tarefa de buscar uma generalização. Minkowski, pouco tempo antes, havia formulado a tese da necessidade da utilização de um sistema de referência quadridimensional para localizar os eventos do universo a partir da teoria da relatividade, uma vez que nesse caso o espaço e tempo haviam deixado de ser independentes. Ele criou, portanto, a ideia de “espaço-tempo” (em vez de somente “espaço”). Einstein usou a ideia do espaço-tempo quadridimensional de Minkowski aplicado a um sistema de coordenadas gaussiano – uma generalização do sistema de coordenadas cartesianas para qualquer tipo de espaço, inclusive curvos – para dar conta de tratar matematicamente um espaço não-euclidiano que se manifestava nos referenciais acelerados, a partir da relatividade do tempo e do espaço. E assim fazendo, ele conseguiu de fato chegar na almejada generalização do princípio da relatividade. Nas palavras de Einstein, “todos os sistemas de referências gaussianos são essencialmente equivalentes para a formulação das leis gerais da natureza”.⁹³⁶ Considerando-se adequadamente a distorção do espaço que surge nos referenciais acelerados e nos campos gravitacionais, as leis físicas, com efeito, não se alteram também nesses referenciais. E disso se segue que um campo gravitacional pode ser tratado como equivalente

⁹³⁴ Assim como Einstein, não faço distinção aqui entre *leis físicas* e *leis da natureza*. Veja Einstein, 2000.

⁹³⁵ Sauer, 2004.

⁹³⁶ Einstein, 2000, p.81.

a um referencial acelerado, usando as mesmas equações e instrumental matemático desses casos, bem como as mesmas consequências e correções decorrentes da teoria da relatividade. De modo semelhante, um campo gravitacional produzido por um corpo massivo gera uma alteração no espaço-tempo semelhante a um corpo num referencial acelerado, e essa alteração no espaço depende da quantidade de matéria e energia que esse corpo possui. Einstein generaliza o princípio da relatividade especial e chega, então, à relatividade geral.

Após resolver o problema da generalização da relatividade especial, Einstein se voltou para o *problema da gravitação*, ou seja, para o problema de formular uma teoria covariante da gravidade, uma lei mais geral da gravitação válida para qualquer referencial, inclusive acelerados (ou sujeitos a intensos campos gravitacionais). Segundo Einstein, o princípio da relatividade generalizado fornecia a chave para entender a lei mais geral que o campo gravitacional obedece. Para alcançar essa lei, Einstein partiu de quatro exigências: (1) a lei geral da gravidade deve satisfazer o postulado da relatividade geral; (2) num lugar onde existe matéria, o campo gravitacional decorrente da lei geral da gravitação deve depender da massa inercial dessa matéria; (3) o campo gravitacional e a matéria devem satisfazer a lei de conservação de energia e momento⁹³⁷; e (4) a lei geral da gravidade deve ser reduzida à lei da gravitação de Newton em locais onde não haja uma quantidade de massa-energia muito elevada; (5) como resultado deve resolver a conhecida discrepância da teoria da gravitação sobre a órbita de Mercúrio.⁹³⁸ Baseado nessas exigências, Einstein deriva um conjunto de equações de campo que resumem lei geral da gravitação e em seguida deduz consequências tendo em vista a conhecida discrepância da teoria de Newton sobre a precessão da órbita de Mercúrio.

Os resultados, no entanto, não foram satisfatórios. Os cálculos da precessão da órbita de Mercúrio não forneceram resultados corretos.⁹³⁹ O matemático italiano Levi-Civita procedeu, então, um cuidadoso estudo dos artigos de Einstein e encontrou um erro em suas derivações. Isso levou Einstein a voltar a refletir sobre o problema, e na dificuldade de chegar às soluções matemáticas necessárias, passou a considerar inclusive outras hipóteses para a causa da gravidade, como, por exemplo, a hipótese da origem eletromagnética da gravitação, defendida por Lorentz, Hilbert, Wien e outros. Levando em consideração essa hipótese, Einstein realmente conseguiu resolver o problema matemático, embora mais adiante argumentou que a suposição da origem eletromagnética da matéria não seria necessária para

⁹³⁷ Ibid, p.84.

⁹³⁸ Sauer, 2004

⁹³⁹ Sauer, 2004, seção 7.

alcançar os resultados, optando por uma versão mais neutra na formulação final. A partir da resolução do problema matemático, Einstein voltou a calcular a precessão da órbita de Mercúrio, encontrando precisamente o resultado observado, e resolvendo a discrepância dos 43'' por século da teoria de Newton. Dessa maneira, Einstein chegou nas suas famosas *equações de campo*, o conjunto de dez equações que descrevem campo gravitacional em locais em que há uma alteração do espaço-tempo gerada pela massa e energia. As equações de campo de Einstein podem ser resumidas na forma tensorial abaixo:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Onde $R_{\mu\nu}$ é o tensor de curvatura de Ricci, R é a curvatura escalar, $g_{\mu\nu}$ é o tensor métrico, Λ é a constante cosmológica, G é constante gravitacional de Newton, c é a velocidade da luz no vácuo e $T_{\mu\nu}$ é o tensor de energia-momento.

Naturalmente, não é o caso de entrar aqui no detalhamento matemático da teoria de Einstein. O que interessa é perceber como esse longo programa de pesquisas sobre a eletricidade, ao seu final, chegou novamente na gravitação, ou melhor, numa lei mais geral para o campo gravitacional. Como se sabe, no limite de baixas energias – numa velocidade muito menor que a velocidade da luz, ou com uma massa que não seja suficientemente grande – a equação de Einstein converge para os resultados da gravitação universal de Newton. Portanto, a teoria da relatividade geral promove mais uma unificação. Além disso, sugere que a atração gravitacional é resultado de uma distorção do espaço-tempo – o que quer que isso signifique exatamente – que ocorre nas vizinhanças de um corpo com massa, que tem como efeito principal uma aceleração de um corpo em direção ao outro. Em outras palavras, a teoria da relatividade fornece uma causa mais geral para a atração observada para toda a matéria.

Talvez as considerações históricas precedentes sobre a transição da gravitação para a relatividade não sejam suficientes para convencer o leitor que de fato não houve uma ruptura entre essas duas teorias. Alguém poderia insistir que as consequências da teoria da relatividade na determinação para uma causa da mais geral para a gravitação foram uma mera coincidência, e que é difícil conceber essa transição como da mesma natureza das transições entre as leis e modelos dos *Principia*, uma vez que na verdade um grande número de leis foi alterado. Além disso, o que dizer das mudanças conceituais do espaço e tempo absoluto? O que dizer da complexidade muito maior das equações de campo de Einstein quando comparadas à gravitação de Newton? São muitas objeções possíveis de serem levantadas. Por

isso vale a pena fazer algumas observações adicionais sobre esse período de transição, procurando, agora, discutir alguns detalhes que possam iluminar as nossas questões sobre uma continuidade ou não entre o programa metodológico dos *Principia* e a formulação da teoria geral da gravitação a partir da relatividade geral de Einstein.

19.3.3 Observações sobre a transição da gravitação para a relatividade geral

Qual é a natureza da transição entre a gravitação universal e a relatividade geral que esboçamos nas seções anteriores? Ocorre também uma mudança metodológica? Se não, é possível conciliar a transição que aqui ocorre com as transições entre modelo nos *Principia*? Como caracterizar essas transformações? Elas ainda se enquadram no modelo de *análise e síntese*? No modelo de hierarquia das causas?

Em primeiro lugar, como já foi evidenciado, o contexto em que surgiu a teoria da relatividade especial foi o contexto da hierarquia das causas da análise. A eletrostática foi incorporada pelas leis mais gerais da eletrodinâmica, e a eletrodinâmica foi incorporada pelas leis mais gerais do eletromagnetismo, que incorporava também o magnetismo. E precisamente no contexto de busca das causas mais gerais tanto para os fenômenos luminosos quanto eletromagnéticos é que surgiu a teoria da relatividade. É claro que a teoria da relatividade não surgiu como uma causa mais geral para os fenômenos eletromagnéticos e ópticos, mas ela resolveu o problema que impedia que isso ocorresse. O próprio Einstein chama a atenção que a teoria que era candidata para essa explicação mais geral para os fenômenos ópticos e eletromagnéticos era a teoria eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz, mas essa teoria padecia da incompatibilidade com o princípio da relatividade clássico, o qual ele reformou.⁹⁴⁰ Assim, a teoria de Maxwell-Lorentz pôde fornecer as leis mais gerais que unificavam os fenômenos ópticos e eletromagnéticos. Então, creio que não haja muitas dúvidas que o programa da análise estava ocorrendo no período da relatividade especial, embora o grau de ciência sobre esse programa entre os físicos pudesse variar.

Mas e quanto a forma de ascender para as causas ou leis mais gerais pela eliminação de mundos possíveis? Esse procedimento também estaria ocorrendo na transição para a relatividade especial e geral? Se esse processo de ascensão às causas mais gerais ocorreu de outra maneira nesse caso, sem que se esclareça essa “outra maneira”, torna-se difícil sustentar que se trata do mesmo programa de física teórica ilustrado nos *Principia*. Mas enfatizo aqui

⁹⁴⁰ Einstein, 2000, p.45.

que o processo de eliminação de hipóteses alternativas para se chegar numa conclusão estava, sim, ocorrendo. Esse é o nosso segundo ponto para reforçar que o programa da física teórica de Newton estava sendo desenvolvido. Veja o que Einstein afirma sobre a teoria de Maxwell-Lorentz:

Os argumentos experimentais a favor da teoria de Maxwell-Lorentz, que são ao mesmo tempo em favor da Teoria da Relatividade, são por demais numerosos para serem apresentados aqui. Efetivamente eles limitaram de tal forma as possibilidades teóricas que nenhuma outra teoria pôde manter-se de pé diante da experiência, a não ser a teoria de Maxwell-Lorentz.⁹⁴¹

À primeira vista, a impressão que dá pela citação acima é que Einstein leu a nossa tese sobre o programa dos *Principia* de Newton; ou que essa tese foi construída sobre as percepções de Einstein, e não do método de Newton. Mas o fato é que Einstein descreve a razão para a sua confiança na teoria de Maxwell-Lorentz precisamente em razão de todas as teorias rivais terem sido eliminadas pelas *limitações experimentais*, que, no contexto, percebe-se que são os fenômenos e leis matemáticas (descritivas) da eletrostática, da eletrodinâmica e da óptica, que eram consideradas pelos físicos da época como conhecimentos estabelecidos. Ora, não é difícil perceber que bem poderíamos descrever essas “limitações experimentais” a que Einstein se refere como restrições impostas por certas condições iniciais que são consideradas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras, para usar a nossa terminologia. Essas condições “limitaram de tal forma as possibilidades teóricas que nenhuma outra teoria pôde se manter de pé. (...)”. Todas as hipóteses alternativas foram derrubadas exceto *uma*. A eliminação dos mundos possíveis, portanto, também estava ocorrendo.

Mas, em terceiro lugar, também o programa da *síntese* estava em operação nessa transição. Após a teoria eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz ter sido a única a sobreviver a todas as restrições experimentais, consequências começaram a ser deduzidas dessa teoria. E problemas começaram a surgir. Einstein menciona esses problemas deduzidos da teoria de Maxwell-Lorentz em seu artigo de 1905, e os descreve como “assimetrias” relacionadas à “eletrodinâmica dos corpos em movimento”. Ele cita um exemplo da assimetria eletrodinâmica que surge da ação recíproca entre um ímã e um condutor em movimento relativo, quando se assume um ponto de referencia ou outro. Esse é um típico problema relacionado à *síntese* da teoria eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz. Um problema difícil, no entanto, porque leva à inconsistência com lei da Física, também considerada verdadeira ou aproximadamente verdadeira: o princípio da relatividade da mecânica clássica. Assim,

⁹⁴¹ Ibid.

embora a referida teoria eletrodinâmica tivesse eliminado todas as teorias rivais, os seus resultados (ou a sua *síntese*) levava a uma contradição com uma lei de outro ramo da Física, razão para todo o impasse. Como já sabemos, haviam dois caminhos. Ou a teoria eletrodinâmica estava errada, ou o princípio da relatividade clássica estava errado, e já sabemos a solução de Einstein para o problema. O que interessa aqui enfatizar é que o programa da *síntese* estava em operação na teoria de Maxwell-Lorentz, tanto que foram os problemas dessa etapa que levaram à solução proposta por Einstein.

Em quarto lugar, o programa da análise e síntese parece estar em operação durante essa transição porque após o surgimento da teoria eletromagnética de Maxwell-Lorentz-Einstein (a teoria de Maxwell-Lorentz com o ajuste na relatividade clássica feito por Einstein) a etapa da síntese teve prosseguimento. No fim do artigo de 1905, por exemplo, Einstein apresenta alguns “resultados” do novo princípio da relatividade para a teoria eletromagnética, dentre os quais podem ser apresentados “explicação de discrepâncias”, como a aparente invariância da velocidade da luz com o movimento da fonte, as “assimetrias” na eletrodinâmica dos corpos em movimento, e dos experimentos para a detecção do éter; e predição de “novos fenômenos”, como a possibilidade matemática de calcular a velocidade do movimento de um elétron. Após o ajuste de Einstein na relatividade clássica, a síntese da teoria eletromagnética volta a ocorrer, resolvendo discrepâncias e predizendo novos fenômenos. Porém dentro das predições da síntese estava, também, a limitação da velocidade de transmissão das interações à distância a , no máximo, a velocidade da luz, o que gerou outro problema, ou outra discrepância, agora, com a lei da gravitação universal. De todo modo, o que fica claro é que o programa da síntese continuou ocorrendo normalmente após a formulação da relatividade especial.

Em quinto lugar, o programa da análise e síntese parece continuar em operação mesmo na transição da relatividade especial e da gravitação universal para a relatividade geral. Não é difícil perceber que a relatividade especial é uma generalização da relatividade clássica de Galileu. É uma lei de relatividade mais geral que aquela da mecânica clássica, e que é compatível com ela no limite dos casos em que ela já operava com exatidão. Da mesma forma, não é difícil perceber que a relatividade geral é uma generalização da relatividade especial, e é compatível com ela no limite dos casos em que ela já operava com exatidão. Observamos o processo de *análise* ocorrendo, mas não mais no caso da teoria eletromagnética, mas no caso da lei da relatividade. E no caso da transição da gravitação universal para uma lei mais geral da gravidade, o que vemos é o mesmo processo de *análise*, inclusive com a eliminação de hipóteses que se espera nesse processo. Basta lembrar que,

após generalizar a relatividade especial, Einstein impõem “exigências”, nas palavras dele, para uma correta teoria geral da gravidade. Como vimos na seção anterior, essas exigências eram a compatibilidade com certas condições que ele assume como verdadeiras (ou pelo menos aproximadamente verdadeiras), como o próprio princípio da relatividade geral (assumido como “postulado” agora), as leis da conservação de energia e momento (que devem ser “satisfeitas”, em suas palavras), e a lei da gravitação universal de Newton, que deve continuar sendo válida para os casos em que já valia com precisão.

Assim, estritamente, o princípio a relatividade geral não é uma lei geral da gravitação; é uma lei geral da relatividade. Porém, a partir dessa lei Einstein buscou uma lei geral para a gravitação, como está documentado.⁹⁴² Ele parte das restrições matemáticas já estabelecidas para chegar numa conclusão válida para uma lei geral da gravitação: a própria lei da gravitação de Newton (usando uma formulação lagrangiana), a lei da relatividade geral, e as leis de conservação de energia e momento. Com todas essas restrições, nenhuma outra hipótese sobrevive a não ser a teoria geral da gravitação de Einstein. A teoria, portanto, pode ser considerada *confirmada*. Mas como sabemos, após esse processo de formulação e confirmação dessa teoria, há a etapa da *síntese*, ou dos “resultados”. Nessa etapa, Einstein explica a discrepância do periélio de Mercúrio, e também prediz “novos fenômenos”, como o desvio espectral da luz das estrelas e a curvatura da luz em campos gravitacionais muito intensos. Além disso, ele propõe um novo modelo de universo.⁹⁴³

Da exposição dos parágrafos anteriores fica claro, portanto, que esse programa da análise e síntese, da hierarquia das causas, o desenvolvimento e eliminação hipóteses teóricas por condições iniciais que são consideradas em um nível epistemológico diferente, ocorreu antes, durante, e depois da formulação da teoria da relatividade especial e geral. Na verdade, foi esse preciso programa da física teórica iniciada nos *Principia* que levou à transição da relatividade clássica para a relatividade especial e depois geral; e também da lei da gravitação universal para uma lei generalizada do campo gravitacional.

Mas talvez restem ainda outras dúvidas ao leitor sobre a aplicação desse programa metodológico por Einstein. Uma primeira dúvida seria: o físico alemão não teria precisamente quebrado as regras metodológicas de Newton ao alterar uma lei empírica considerada verdadeira ou aproximadamente (a relatividade clássica), que servia precisamente de condição inicial para o processo de confirmação de teorias? Como explicar esse procedimento dentro do programa de Newton? Uma segunda dúvida: a mudança matemática da lei da gravitação

⁹⁴² Sauer, 2004; Einstein, 2000.

⁹⁴³ Ibid.

para as equações de campo da relatividade geral parece muito distante das transições *verticais* observadas na análise nos *Principia*, onde apenas há um acréscimo de uma simples dependência matemática. A lei matemática expressas nas equações de campo de Einstein é muitas vezes mais complexa do que a lei da gravitação de Newton. Como conciliar essas duas situações? Uma terceira dúvida: se não há uma ruptura na transição da gravitação para a relatividade geral, por que essa transição foi percebida como revolucionária pelos físicos? Em que sentido teria ocorrido uma revolução? Uma quarta dúvida: a ação à distância instantânea da gravitação clássica não sugere também uma ruptura? Reflitamos sobre essas questões na próxima seção.

19.3.3.1 Questões complementares sobre a transição da gravitação para a relatividade

Começemos refletindo sobre a natureza da transição entre a lei da gravitação de Newton e a lei da gravitação generalizada de Einstein, que parece muito mais complexa e abrangente que aquelas efetuadas no corpo dos *Principia*. É verdade que a transição para a gravitação generalizada de Einstein é bem diferente de se acrescentar mais uma *dependência*, ou uma “letra”, numa fórmula. É também verdade que a lei da gravitação de Einstein resgata os resultados da gravitação de Newton, mas de uma maneira longe de ser trivial, por meio de uma passagem ao limite. É também verdade que os próprios conceitos básicos da mecânica, como espaço, tempo, massa, etc, são alterados nessa transição. É mesmo difícil imaginar como a transição da gravitação para a relatividade poderia ser considerada da mesma natureza das transições de modelos ilustradas por Newton nos *Principia*. Mas ainda assim insisto que é o mesmo tipo de transição. Precisamente porque podemos considerar a transição de $F_C \propto 1/D^2$ para $F_C \propto \frac{m_1 m_2}{D^2}$, nos *Principia*, também como uma passagem ao limite. Também podemos perceber mudanças conceituais significativas nessa transição. O próprio conceito de “força centrípeta”, na transição acima, sofreu uma mutação essencial. Rigorosamente falando, no primeiro caso temos uma “força centrípeta” realmente; no segundo caso, não. Temos uma força de atração entre dois polos. Não é mais da mesma força que estamos falando. Além disso, pode-se mostrar que quando $m_1 \gg m_2$, a relação $F_C \propto \frac{m_1 m_2}{D^2}$ tende para $F_C \propto 1/D^2$. Ou seja, no limite, quando $m_1 \gg m_2$, o centro de massa dos corpos m_1 e m_2 tende a coincidir com o centro de m_1 , e a força de atração tende a coincidir com uma força centrípeta. Temos duas leis com conceitos incompatíveis, mas que, no limite, são compatíveis. Não há diferença essencial na transição entre essas duas leis de força, e da mesma forma na transição entre a

gravitação universal e a gravitação generalizada. Os mesmos critérios que permitem a Newton a transição da força centrípeta para a força atrativa, permitem entre aquelas duas leis.

Mas o que dizer do aumento expressivo de complexidade matemática na transição da gravitação clássica para a gravitação generalizada? Afinal, não é apenas uma dependência que é acrescentada, mas um conjunto completo de equações. Aqui cabe dizer que o aumento de complexidade depende da causa mais geral encontrada, e de como ela foi encontrada. No caso em tela, a causa mais geral da gravitação envolvia, primeiro, uma lei mais geral para relatividade clássica, que gerava uma reformulação nos conceitos de espaço e tempo; além disso, envolvia uma lei mais geral para a relatividade especial, que envolvia uma matemática que lidasse com um espaço não euclidiano. Não há dúvida que somente essas duas alterações prévias já eram suficientes para gerar um grande impacto em todo o edifício do conhecimento físico, e tiveram de ser incorporadas na lei mais geral da gravitação. Vemos isso claramente nas equações da “dilatação temporal” e da “contração do espaço”, expressas mais acima. Os próprios conceitos de espaço e tempo tornam-se dependentes da velocidade do corpo e da velocidade da luz. É evidente que se o acréscimo das dependências estiver em conceitos básicos como o de espaço e tempo haverá um impacto em toda a mecânica e não apenas na gravitação. Portanto, repito, tudo depende da causa geral encontrada, e como ela foi encontrada. Uma causa mais geral vai sugerir novas dependências ao que está previamente estabelecido. Dependendo da causa mais geral proposta, e das dependências a ela associadas, o aumento da complexidade pode ser exponencial, e não há nada de inusual nisso.

Esse ponto já antecipa outra de nossas questões. Se não houve ruptura entre a teoria da gravitação de Newton e de Einstein, ou entre a relatividade clássica e a relatividade especial, porque os físicos consideraram que ocorreu uma revolução? Como pode não haver ruptura nessa transição se, na teoria de Newton, o espaço e o tempo são absolutos? Os próprios fundamentos da mecânica são demolidos pela relatividade especial.

Sobre a questão acima, em primeiro lugar é preciso enfatizar energicamente que Newton não defendeu os famigerados espaço e tempo absolutos nos *Principia*. Aparentemente, essa ideia foi propagada por uma leitura imprecisa, ou ao menos exagerada, que o físico austríaco Ernst Mach (1838-1916) fez do escólio das definições dos *Principia*. Mach criticou Newton argumentando que o seu espaço e tempo absolutos eram concepções metafísicas.⁹⁴⁴ No entanto, a sua crítica tira as observações de Newton nos *Principia* do seu contexto. É verdade que Newton faz especulações sobre a natureza última do espaço nos seus

⁹⁴⁴ “Idle metaphysical conception”. Mach, 1919, p.224.

manuscritos não publicados e em algumas cartas privadas, mas no seu texto oficial – os *Principia* – Newton jamais *defendeu* o espaço e tempo absolutos. Menos ainda no sentido que Einstein atribuiu para esses conceitos, como grandezas que não se alteram independentes do movimento do referencial. O propósito do Escólio das Definições, como o próprio Newton declarou nas primeiras linhas desse texto, era definir os conceitos básicos de espaço, tempo, posição, movimento para além do senso comum, para evitar confusões desnecessárias na obra. E, bem ao contrário do que Mach parece sugerir, o matemático inglês visava esclarecer justamente a *relatividade* do movimento e repouso. Newton tinha o objetivo de distinguir o “movimento verdadeiro” do “movimento aparente” no caso do sistema solar, um assunto que já era bastante discutido desde muito antes de Copérnico. O que ele se prestou a afirmar no escólio foi que, *idealmente*, a maneira de determinar o “movimento verdadeiro” de um corpo seria conhecendo a mudança de uma posição para outra em relação ao “espaço absoluto” (ou seja, em relação a um ponto de referência absolutamente imóvel), num intervalo de tempo que também haveria de ser absoluto (perfeitamente constante). Por essa razão ele precisou definir espaço e tempo absolutos. Mas isso nada tem a ver com o conceito de espaço e tempo absolutos que Einstein está revisando. Além do mais, o objetivo de Newton era precisamente de mostrar que, uma vez que esse suposto espaço absoluto não é sensível – e não é possível detectar esse ponto absolutamente imóvel no universo – torna-se necessário outro caminho para decifrar o movimento verdadeiro dos astros no sistema solar. De modo semelhante, Newton define o que seria o tempo absoluto para em seguida afirmar que vai usar como referência para o tempo o movimento em relação às estrelas fixas. Newton de modo algum está defendendo nos *Principia* a existência de um espaço e tempo absolutos no sentido geralmente atribuído pela teoria da relatividade. Ele está simplesmente argumentando que *mesmo que* haja um ponto absolutamente fixo no universo, e um movimento absolutamente constante para determinação do tempo, ainda assim é preciso buscar outro caminho para determinar o movimento verdadeiro.⁹⁴⁵ Mach, e muitos depois dele, sistematicamente desviaram as observações desse escólio do seu propósito original.

Todavia nem é esse o ponto que mais importa. O que importa é que, na prática, a *mecânica newtoniana* (isto é, a “mecânica clássica”) de fato se alicerçou sobre um fundamento de que o espaço e tempo são absolutos (agora no sentido atribuído por Einstein), quer Newton tenha defendido isso ou não. O que está pressuposto no princípio da relatividade clássica é que o espaço e tempo são independentes e absolutos, não se alterando em qualquer

⁹⁴⁵ Veja a seção 11.1 do volume I. Veja também o APÊNDICE E.

mudança de referencial. Na verdade, o que está na base da mecânica é a noção de que o espaço e o tempo são absolutos à despeito de qualquer referencial, inercial ou não inercial. Esse é o fato. Proposto ou não por Newton, era o que estava estabelecido na assim chamada mecânica clássica. Mas ainda que a crítica do espaço e tempo absolutos não se aplique a Newton, aplique-se na verdade à *mecânica newtoniana*, ainda assim ela está equivocada. Explico: o espaço e tempo serem independentes do movimento do corpo ou do referencial é, com efeito, uma “concepção metafísica”? Tem por fundamento preconceitos dogmáticos? Para mim não há qualquer sombra de dúvidas que estamos a discorrer sobre um princípio que surge diretamente da *experiência*. Desde a antiguidade até o séc. XVIII não havia, e nem poderia haver, uma única experiência cotidiana que colocasse em dúvida esse princípio. Basta pensar em todas as experiências que se poderia fazer com composição de velocidades em um trem ou qualquer outro corpo em movimento. A razão para o espaço e tempo serem considerados independentes do movimento é a pura e simples *experiência*. Não percebemos, em nossas experiências cotidianas, assim como numa grande gama de experiências controladas, qualquer situação que indique o contrário. E, portanto, nada mais natural de que o próprio Newton e seus sucessores aceitem esse fato. Newton não estava defendendo um espaço e tempo que independem do movimento no escólio das definições. Já vimos que não era esse o objetivo. Mas, na verdade, ele não estava defendendo isso porque sequer isso precisava ser feito. Tratava-se de um princípio empírico que não havia qualquer razão para ser questionado ou mesmo discutido.

É importante que se diga, no entanto, que se tratava de um princípio empírico *generalizado*. Isso é importante. Evidentemente que afirmar que o espaço e o tempo são independentes do movimento é diferente de afirmar que *em qualquer situação* o espaço e o tempo independem do movimento. Tanto Newton quanto os seus sucessores aceitaram o princípio empírico que se observa em um sem número de casos concretos e *generalizaram* o resultado. Isso faz o princípio tornar-se “metafísico”? Está manifesto que não. Mas está igualmente manifesto que a possível modificação no conceito de espaço e tempo estava *expressamente* prevista pelos preceitos epistemológicos do próprio Newton.

Na Regra 4, Newton afirmou categoricamente que uma proposição empírica generalizada por indução deveria ser considerada verdadeira, ou aproximadamente verdadeira, *até que outros fenômenos a tornassem mais exata ou sujeita a exceções*.⁹⁴⁶ O que significa

⁹⁴⁶ Exatamente, a Regra 4 afirma: “Na filosofia experimental, as proposições formuladas por indução a partir dos fenômenos coletados devem ser consideradas como exatamente verdadeiras, ou aproximadamente verdadeiras,

essa mudança realizada por Einstein nos conceitos de espaço e tempo senão a aplicação da Regra 4? A experiência revela que em todos os casos no alcance dos experimentos o espaço e o tempo não dependem do movimento do referencial. Generalizou-se o resultado, tornando o princípio geral. Mas quando se ampliou o campo da experiência, por exemplo, considerando-se corpos em altas velocidades ou, especificamente, os fenômenos ópticos e eletromagnéticos, encontrou-se “outros fenômenos” que ficaram inicialmente registrados como “exceções”, até que eventualmente foram acomodados, tornando o princípio generalizado mais exato. Em outras palavras, o princípio do espaço e tempo independentes do referencial era *aproximadamente* verdadeiro, e no momento oportuno se tornou mais exato. Em suma, a crítica ao espaço e tempo absoluto atribuída a Mach está errada, de um jeito ou de outro.⁹⁴⁷ E retorno, aqui, a minha questão inicial. Não há ruptura na mudança desses conceitos de espaço e tempo na transição gravitação para a relatividade. Essas mudanças ocorrem rigorosamente pelos princípios de generalização que o próprio Newton estabeleceu nos *Principia*.

Os parágrafos anteriores ressaltam outra questão dentre aquelas que direcionamos a essa seção. Newton não teria mudado as regras metodológicas quando reformulou uma condição inicial verdadeira ou aproximadamente verdadeira (a relatividade clássica) para obter a confirmação da teoria eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz? À luz do parágrafo anterior, está evidente que *não*. Qualquer condição inicial é considerada verdadeira *ou aproximadamente verdadeira*, precisamente porque ela pode se tornar eventualmente mais exata com o aumento do campo da experiência. Em outras palavras, a base empírica da ciência é sempre *reformulável*, seguindo a Regra 4 dos *Principia*, porém não *falseável*. Ela é sempre tornada mais exata, e assim, toda vez que é reformulada leva a uma reformulação em toda a ciência que depende dela, tornando-a igualmente mais exata. Isso significa que toda lei que é efetivamente confirmada, torna-se parte da base empírica da ciência; mas eventualmente ela própria também pode se submeter ao processo de *análise*, e se tornar mais exata. Quando essa base empírica sustenta uma estrutura muito grande do edifício, tal mudança tem amplas repercussões, e a percepção é de uma grande revolução conceitual de profundas implicações. Mas ainda assim, não há qualquer mudança metodológica aqui. É uma consequência não exatamente do programa metodológico dos *Principia*, mas da epistemologia desse programa.

não obstante qualquer hipótese contrária, até que outros fenômenos tornem essas proposições ou mais exatas ou sujeitas a exceções”. Veja o capítulo 12 e, em especial, a seção 12.2.

⁹⁴⁷ Digo crítica “atribuída” a Mach porque há uma certa dúvida se os comentadores realmente compreenderam a crítica de Mach corretamente. Ao meu ver, Mach não criticou o espaço absoluto de Newton por entender que se tratava necessariamente de um espaço que independente do movimento do referencial; ele simplesmente criticou Newton pelo uso de um conceito que não tem qualquer referência empírica. Mas a crítica de Mach é geralmente entendida no primeiro sentido.

A próxima questão que levantamos no fim da seção anterior sobre a transição da gravitação de Newton e Einstein está relacionada à ação à distância instantânea. Uma crítica que tanto Einstein quanto outros proponentes da teoria eletromagnética fizeram à gravitação de Newton era que não poderia haver “ação à distância” *instantânea*. Uma das consequências da teoria da relatividade era que a maior velocidade possível era a velocidade da luz e, no entanto, a teoria da gravitação clássica estabelecia que dois corpos separados por enormes distâncias poderiam agir um sobre o outro *de modo imediato*, contrariando as leis da teoria eletromagnética. Mas segundo foi apresentado no primeiro volume desse trabalho, Newton jamais endossou a tese da “ação à distância”, e passou até os últimos dias da sua vida investigando como a gravidade poderia ser operada por meio de um suposto éter.⁹⁴⁸ Não obstante, o próprio Einstein ajudou a propagar essa ideia imprecisa sobre a teoria da gravitação de Newton, contribuindo para uma compreensão equivocada de ruptura. Afirmou Einstein:

Foi a teoria da gravitação de Newton que atribuiu a causa da gravidade interpretando-a como uma ação à distância, procedendo das massas. A teoria de Newton é provavelmente o maior passo já realizado nos esforços em direção aos nexos causais dos fenômenos naturais. E ainda assim essa teoria evocou um vívido senso de desconforto entre os contemporâneos de Newton porque parecia estar em conflito com o princípio que surgia do restante da experiência, que só pode haver ação recíproca por meio do contato, e não por meio de uma imediata ação à distância.⁹⁴⁹

A citação de Einstein sugere que a teoria de Newton está comprometida com um conceito de ação à distância imediata. Não apenas isso. Deixa implícito que a relatividade implica numa ruptura com essa concepção equivocada de Newton, que causou um compreensível desconforto mesmo nos seus contemporâneos. Einstein erra o ponto. Com efeito, o que estava em questão no debate entre Newton e seus contemporâneos não era que ele estava defendendo uma ação à distância que seus interlocutores tinham dificuldade de aceitar, mas que ele não *especificou* o modo pelo qual operava a gravitação, precisamente um dos trunfos da abordagem *formalista*. Seus críticos entendiam que qualquer teoria que se propusesse a apresentar o que Newton pretendia deveria, obrigatoriamente, esclarecer o *mecanismo* pelo qual a força atuava. Newton, por outro lado, defendeu que a teoria poderia ser aceita independente de ainda não estar claro que mecanismo seria esse.⁹⁵⁰ No fundo, trata-se do próprio diferencial do programa de Newton, de fragmentar o estudo das causas, e

⁹⁴⁸ Veja a seção 12.2, volume I.

⁹⁴⁹ Einstein, 1920.

⁹⁵⁰ Veja o parágrafo metodológico do Escólio Geral, discutido no cap. 13, volume I.

avançar gradativamente por meio de leis matemáticas associadas à causa próxima considerada em abstrato. Ironicamente, o próprio Einstein se utilizou desse mesmo expediente na relatividade geral. O que é essa “distorção do espaço-tempo”? Que grau de inteligibilidade tem isso? Na verdade, Einstein seguiu um raciocínio altamente abstrato, com auxílio de leis matemáticas e da experiência, e chegou num resultado que ele mal sabia interpretar, mas que afirmava estar correto. A prevalecer a crítica dos contemporâneos de Newton, Einstein teria incorrido no mesmo erro do matemático inglês. Ele deduziu certas propriedades por meio das leis matemática, mas se não sabia esclarecer exatamente o que é, como funciona, qual é o mecanismo, então não é uma legítima teoria. Em suma, retornando ao ponto, não há que se falar aqui em descontinuidade entre a gravitação e a relatividade em razão da ideia de ação à distância imediata equivocada. A teoria da gravitação de Newton era neutra no que se refere a isso, embora a ideia de ação a distância imediata tenha de fato sido adotada vários dos seus sucessores.

As questões complementares dessa seção nos levam a conclusão que de fato os critérios gerais para substituição da lei da gravitação de Newton para aquela de Einstein obedecem aos mesmos critérios. Mais acima lembrei que a etapa da *análise* leva a determinação de uma *lei matemática*. Essa lei matemática é utilizada para construir um modelo de mundo e se inicia a *síntese*. Esse modelo é aperfeiçoado ao máximo possível. Discrepâncias recalcitrantes permanecem. Pergunta-se sobre a causa mais geral. Para ser aceita, a hipótese da causa mais geral deve ser necessariamente compatível matematicamente com a causa anterior, e não deve haver nenhuma outra hipótese alternativa restante, que tenha a mesma compatibilidade. Além disso, caso essa hipótese seja de fato a causa mais geral procurada, deve haver confirmações convergentes e independentes. Ela deve explicar discrepâncias que ficaram pendentes da *síntese*, e deve prever *novos fenômenos*. Não nos surpreende observar que esses precisos elementos se encontram na transição da gravitação de Newton para a teoria geral de Einstein. O físico alemão chega numa lei matemática que, embora bem mais complexa que a gravitação, é compatível matematicamente com ela – para os casos em que ela já operava com exatidão. Nenhuma outra teoria – ou hipótese – dentre as que se apresentavam à época de Einstein foi capaz de apresentar tal compatibilidade com a gravitação sem contrariar outras condições iniciais (leis físicas) consideradas verdadeiras. Mas além dessa compatibilidade, que por si só já é extremamente restritiva, a teoria de Einstein ainda foi capaz de explicar com grande precisão discrepâncias da teoria da gravitação de Newton, como a precessão do periélio de Mercúrio, e prever novos fenômenos, como a célebre observação da curvatura da luz no eclipse de 1919, apenas para citar os casos mais

conhecidos. Em resumo, não há descontinuidade nos critérios de evidência para aceitação da relatividade no lugar da gravitação. Não estamos diante de uma teoria de destruiu a anterior; de uma teoria que é essencialmente incompatível com a anterior. Estamos diante de uma teoria que amplia o escopo da anterior. Estamos diante de uma causa mais geral que engloba a causa anterior.

Curiosamente, o próprio Einstein foi criticado por alegações que afirmavam que a relatividade geral era incompatível com a relatividade especial. A relatividade especial afirma que a velocidade da luz no vácuo é sempre constante. Mas a relatividade geral afirma que num referencial acelerado a luz pode realizar uma trajetória curva, contrariando a relatividade especial. A explicação de Einstein é elucidativa:

Como os adversários da Teoria da Relatividade afirmaram frequentemente que a Teoria da Relatividade Especial é anulada pela Teoria da Relatividade Geral, desejo recorrer aqui a uma comparação para tornar clara qual é a verdadeira situação. Antes de ser estabelecida a eletrodinâmica, as leis da eletrostática eram consideradas como sendo simplesmente as leis da eletricidade. Hoje sabemos que a eletrostática só pode fornecer corretamente os campos elétricos no caso, nunca estritamente concretizado, de massas elétricas estarem perfeitamente em repouso umas em relação às outras e ao sistema de coordenadas. Será que por isso a eletrostática foi jogada no lixo pelas equações de campo da eletrodinâmica de Maxwell? De forma alguma! A eletrostática está contida no caso-limite na eletrodinâmica; as leis dessa última levam diretamente às da primeira no caso em que os campos não variam no tempo. Este é o mais belo destino que uma teoria física pode ter: quando ela abre caminho para o estabelecimento de uma teoria mais ampla, na qual continua a viver como um caso particular.⁹⁵¹

Parafraseando Einstein, pode-se bem dizer que a teoria da gravitação jamais foi anulada ou jogada no lixo pela relatividade geral, assim como a eletrostática jamais foi anulada pela eletrodinâmica, e nem a relatividade especial pela geral. Cada teoria mais geral tem como fundamento da sua validade o fato de ser compatível com a anterior, sem prejuízo de que, ao ampliar o seu escopo, a sua predecessora passe a existir apenas como um caso particular limite.⁹⁵² E por isso mesmo essa teoria mais geral é capaz de explicar discrepâncias e prever novos fenômenos. Essa compreensão deixa apenas mais evidente que não há, e jamais houve, uma verdadeira ruptura metodológica ou epistemológica entre a mecânica clássica e a relativística, ou entre a gravitação universal e a relatividade geral (ou a teoria geral da gravidade de Einstein, sendo mais exato). E muito mais do que isso. A natureza da transição da atração universal para a relatividade geral segue critérios muito parecidos com os parâmetros das transições da etapa da *análise* ilustradas nos *Principia*. Portanto, não deve

⁹⁵¹ Einstein, 1999, p.65,66.

⁹⁵² Caso particular “limite” precisamente porque a compatibilidade matemática não é estrita. Isso já é esperado em qualquer generalização que seja apoiada de algum modo na indução.

haver muitas dúvidas: Einstein, assim como os outros antes dele, de fato estavam seguindo a estrutura básica do programa da física teórica iniciada nos *Principia* e continuada nos séc. XVIII e XIX, ainda que concedamos que essa adesão não ocorreu de um modo totalmente consciente. A chamada “terceira revolução científica”, que deu origem a física moderna, não é mais do que a continuidade dos desdobramentos dos efeitos da incorporação do programa dos *Principia* na segunda metade do séc. XIX, que por um lado levou a uma aplicação significativa no campo da experiência, e por outro levou à reformulação de leis fundamentais que estavam na base empírica da ciência, produzindo profundas alterações em todo o seu edifício. À luz do exposto nesse capítulo houve somente uma revolução científica na história da física, precisamente a revolução newtoniana que deu origem a física teórica, e que impulsionou o surgimento da própria ciência natural.

19.4 IMPLICAÇÕES PARA A FILOSOFIA DA CIÊNCIA

Ao longo desse capítulo percebemos que é possível defender, numa análise preliminar, que a estrutura do programa dos *Principia* foi incorporada e reproduzida pela ciência empírico-matemática do séc. XVIII até o séc. XX. Como já foi reforçado, uma análise definitiva sobre essa transição depende ainda de um estudo aprofundado e exaustivo dos três séculos que se seguiram aos *Principia*, no entanto, pela discussão proposta já é possível concluir, de pronto, que a caracterização mais precisa do programa de Newton que aqui se propôs conduz, efetivamente, a uma reformulação no entendimento da herança dos *Principia* para a ciência posterior. Conduz a uma reformulação no entendimento de que houve uma segunda e terceira revoluções científicas.

Naturalmente, essas conclusões colocam novamente em evidência a filosofia da ciência, e em especial algumas teses de Thomas Kuhn sobre as revoluções científicas. Do exposto nesse capítulo se conclui que não houve uma ruptura revolucionária na transição da gravitação universal para a relatividade geral, como defendeu Kuhn. A transição ocorreu dentro dos parâmetros do programa metodológico dos *Principia*, conforme Harper e Smith já suspeitavam. Ainda assim, importa reconhecer que houve de fato uma reformulação conceitual profunda nessa transição. Conceitos muito elementares da Física foram modificados, o que teve consequências dramáticas no edifício da ciência. Como conciliar essas duas conclusões? Houve ou não houve revolução? Como entender as teses de Kuhn a partir do que foi exposto?

Para responder a essa pergunta o leitor deve lembrar que a profunda reformulação conceitual ocorrida nessa transição pode ser explicada pela mudança de conceitos que estavam na *base empírica* da ciência empírico-matemática, a qual é fundada, como já foi estabelecido, na *indução*. A mudança dessa base empírica indutiva pode efetivamente gerar efeitos profundos no conhecimento, que se assemelham a uma revolução. Da mesma forma que a indução leva ao estabelecimento de uma base empírica intersubjetiva e concensual, permitindo pontos de partida em comum na ciência, em certo momento, essa base se torna um fator de resistência à mudanças. Não por algum tipo de “dogmatismo” por parte dos cientistas, como Kuhn supôs, mas tão somente porque uma nova base empírica precisa ser estabelecida intersubjetivamente e concensualmente por meio de novas induções. Isso não é algo simples nem rápido de ocorrer. E quando ocorre, vai se espalhando gradativamente por diferentes grupos científicos, gerando uma coexistência temporária de bases empíricas conflitantes. Desse modo, é natural que se perceba um aparente dogmatismo de alguma comunidade em relação a certas novas teorias, principalmente quando ela própria ainda não foi suficientemente exposta aos dados que levaram à reformulação da base empírica, tornando-a mais exata. Mas uma vez ocorrido esse ajuste da base, alcançando o seu caráter intersubjetivo e concensual no interior da comunidade, ela levará inevitavelmente a uma reformulação conceitual profunda, que impregnará até mesmo as percepções elementares dos cientistas, e levará à famosa mudança na “visão de mundo” mencionada por Kuhn.

A descrição acima é a “revolução” que Kuhn aparentemente enxergou na transição da gravitação para a relatividade geral. Mas como vimos, isso não atinge o programa metodológico dos *Principia*, ou os princípios de aceitação de uma hipótese, até porque eles são os mesmos utilizados para o estabelecimento de qualquer conhecimento empírico: a indução. A meu juízo, Kuhn está correto em boa parte da sua descrição histórica da ciência, porém está errado nas razões que atribui para essa aparente resistência em abandonar um “paradigma”. Parece-me que essa aparente resistência decorre dos próprios desdobramentos da base empírica do conhecimento ser a indução. Quanto mais apoio indutivo tem um conhecimento, mais elementar ele é, não apenas na ciência, mas também no conhecimento em geral; quanto mais apoio indutivo tem um conhecimento, mais ele está impregnado em toda a nossa estrutura cognitiva; quanto mais apoio indutivo um conhecimento tem, portanto, mais difícil é o rompimento com ele, pois exige uma quantidade de suporte indutivo muito grande para produzir uma reformulação, e torná-lo mais exato. Mas uma vez ocorrida essa reformulação, ela de fato produz grandes repercussões em toda a nossa estrutura cognitiva.

Se extendermos a análise específica que foi feita acima para as *outras* revoluções de Kuhn, chegaremos à conclusão de que não há múltiplas “revoluções científicas” na história da ciência, como propôs o historiador estadunidense. O que há são *revoluções conceituais*, precisamente quando a base empírica indutiva do conhecimento se torna mais exata depois de um expressivo aumento na exposição a novos dados empíricos. Ou, sendo ainda mais específico, o que há são *revoluções epistemológicas* a partir de uma significativa ampliação no campo da experiência. Na sua análise histórica da ciência, Kuhn teria notado precisamente o *efeito* de todo conhecimento empírico ser construído pela indução, inclusive nas ciências mais abstratas, como na ciência empírico-matemática.

Finalizado esse capítulo – em que se analisou a ciência empírico-matemática após os *Principia* até o séc. XX, bem como algumas reflexões e conclusões sobre essa análise – será oportuno, agora, apresentar um resumo esquemático do programa completo dessa ciência e compará-lo com alguns episódios escolhidos da história da física, inclusive envolvendo pesquisas mais atuais, como a *Teoria de Campos Unificados* e as *forças interatômicas*. Para terminar essa análise, vejamos até que ponto a estrutura do programa aqui descrito pode ser relacionada com esses episódios, para retirarmos daí as conclusões finais sobre a estrutura geral e racionalidade da ciência empírico-matemática.

20 O PROGRAMA DA CIÊNCIA EMPÍRICO-MATEMÁTICA

Certamente se poderia encerrar a análise aqui proposta sobre o programa metodológico dos *Principia* de Newton com a discussão feita no capítulo anterior. As conclusões obtidas já seriam mais do que suficiente para produzir um bom debate tanto no campo da história quanto da filosofia da ciência. Contudo, como já mencionei antes, o horizonte maior desse trabalho tem objetivos eminentemente especulativos, sobre a natureza da ciência em geral, o que me impulsiona a direcionar as conclusões anteriores para um grau de generalidade ainda um tanto maior. Vislumbro aqui um *descriptivismo robusto*, razão pela qual esses últimos dois capítulos serão necessários.

Especificamente, no presente capítulo pretendo apresentar uma síntese esquemática do programa metodológico dos *Principia* para avaliar, em seguida, até que ponto ele pode ser uma boa chave interpretativa para a compreensão da própria estrutura do programa da ciência empírico-matemática *em geral*. Isso será feito comparando preliminarmente a síntese esquemática desse programa com alguns episódios da história da física já mencionados, e algumas linhas de pesquisa atuais desse campo, procurando por alguma convergência. Em caso de convergência, podemos avançar em nossas questões sobre a natureza geral do empreendimento científico. Resumindo, as questões de fundo desse capítulo são duas: (1) a partir desse estudo sobre o programa metodológico dos *Principia*, o que podemos aprender sobre a estrutura e funcionamento da ciência empírico-matemática em geral? (2) Que lições sobre a natureza, funcionamento e racionalidade da ciência em geral esse estudo nos leva? Vejamos, então, o que essa síntese esquemática do programa dos *Principia* pode nos oferecer de respostas sobre essas questões.

20.1 SÍNTESE DO PROGRAMA METODOLÓGICO DOS *PRINCIPIA*

Conforme foi evidenciado nos capítulos anteriores, o objetivo do programa metodológico dos *Principia* é avançar gradualmente em direção às causas dos fenômenos naturais por meio da determinação das leis matemáticas, as quais são confirmadas indiretamente num processo de eliminação de hipóteses. Como já vimos no capítulo 18, esse processo de eliminação de hipóteses pode ser considerado um adequado critério de confirmação *qualitativa*, pois satisfaz indiretamente as exigências para o estabelecimento de qualquer conhecimento empírico, que é a indução. Além disso, a elaboração e

desenvolvimento teórico dessas hipóteses alternativas com vistas a uma futura confirmação da origem ao programa que conhecemos basicamente hoje como *física teórica*, que foi consolidada na segunda metade do séc. XIX, fornecendo abrangentes frutos que se estenderam, inclusive, ao longo do séc. XX. Tentemos descrever o processo de funcionamento completo da ciência empírico-matemática, a partir de tudo o que foi estabelecido até aqui, para em seguida tentar sintetizá-lo num diagrama gráfico conveniente.

Inicialmente temos apenas o fenômeno cuja causa pretendemos conhecer. A partir desse fenômeno, hipóteses iniciais intuitivas são formuladas. Essas hipóteses iniciais são intuitivas, mas nem por isso desprovidas de fundamento. Elas são associações naturais que fazemos entre as propriedades perceptíveis do fenômeno e outros fenômenos cujos efeitos têm propriedades semelhantes, previamente estabelecidas por indução. Assim, as hipóteses intuitivas já se constituem num filtro eficiente para as causas possíveis do fenômeno. Iniciamos as investigações, portanto, a partir dessas hipóteses possíveis já sugeridas pela razão. No entanto, é claro que nenhuma dessas hipóteses pode ser considerada *estabelecida*. Elas são hipóteses meramente *possíveis*. Para que sejam estabelecidas é preciso empreender um processo de eliminação de hipóteses. Em primeiro lugar, determinamos as propriedades matemáticas abstratas dos fenômenos, limitando-nos rigorosamente ao ponto de partida da experiência. Essas “propriedades” variam desde proporções matemáticas entre as coisas, propriedades geométricas como trajetórias, velocidades, até leis que descrevem a *relação matemática entre propriedades*, revelando o comportamento regular dos fenômenos da natureza. Tais propriedades e leis matemáticas dos fenômenos são consideradas condições *verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras*.

Determinadas as leis matemáticas descritivas relacionadas ao fenômeno, em segundo lugar, exploramos as propriedades e consequências matemáticas das *hipóteses possíveis*, dadas certas condições iniciais consideradas verdadeiras. É isso que foi chamado em outros pontos desse trabalho de exploração dos “mundos possíveis”. Dadas certas leis empírico-matemáticas gerais consideradas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras, exploramos várias consequências e propriedades matemáticas convenientemente associadas aos fenômenos cuja causa buscamos determinar. Um exemplo que já foi mencionado é a exploração das propriedades matemáticas dos vórtices, dadas as leis do movimento, e certas propriedades extraídas de experimentos com fluidos e vórtices, que podem ser considerados análogos à hipótese.

Em terceiro lugar, após esse processo de exploração matemática das hipóteses possíveis, comparamos os resultados dos dois primeiros passos e eliminamos as hipóteses que

são incompatíveis matematicamente com os fenômenos. Como essa primeira eliminação de hipóteses não será suficiente para descartar todas as hipóteses possíveis, prosseguimos determinando outras propriedades matemáticas dos fenômenos, e explorando matematicamente as hipóteses restantes à procura de outras condições matemáticas restritivas que possam servir para eliminar as hipóteses remanescentes. Encontradas essas condições, repetimos o procedimento de comparação, eliminando outras hipóteses. E esse processo é repetido até que reste uma única hipótese. É só no momento em que restar uma única possibilidade que se considera a hipótese *confirmada*. Ela deixa de ser uma hipótese e passa a ser uma causa estabelecida. Um conhecimento verdadeiro ou aproximadamente verdadeiro. Conclui-se a etapa que na terminologia de Newton é chamada de *análise*.

Depois que a hipótese é confirmada e se torna um conhecimento verdadeiro (ou aproximadamente verdadeiro), iniciamos uma nova etapa: a *síntese*. Quando determinamos a causa anterior, ela foi obtida partir de suas propriedades matemáticas. Ou seja, antes de determinar a causa, determinamos a *lei matemática* associada a ela. E a partir dessa lei matemática estabelecida é possível construir um *modelo matemático do mundo* que pode extrapolar a explicação do fenômeno particular para o qual ela foi inicialmente determinada. O processo esclarecido no parágrafo anterior não determina somente a causa de um fenômeno em particular; determina uma lei matemática que está em operação no mundo. Por essa razão, a partir dela é possível criar um modelo matemático que pode prever o comportamento do mundo num alcance muito maior que o fenômeno considerado. Essa é a etapa anteriormente chamada de *síntese*. Constrói-se um modelo matemático a partir da lei determinada, e esse modelo é usado para fazer novas descobertas. Com efeito, novos fenômenos são descobertos, novas informações sobre o mundo são colhidas, dados mais precisos são obtidos, tudo isso porque, após se determinar a lei matemáticas que opera no mundo, é possível avançar além da experiência sensível imediata. O conhecimento do mundo dá um salto.

Mas em algum momento esse modelo matemático se esgota. O modelo vai sendo desenvolvido e aperfeiçoado a partir da resolução de problemas matemáticos, da introdução gradativa dos acidentes do mundo, até que tenha sido levado ao seu limite. Esse limite é alcançado pelo acúmulo de problemas sem solução, discrepâncias entre algumas previsões do modelo e observações da natureza sem uma solução aparente. É nesse ponto que a busca por uma causa mais geral que explique a causa anteriormente encontrada passa a ser determinante. Os passos da *análise* resumidos nos parágrafos anteriores são repetidos. A causa atual é considerada como um efeito de uma causa mais geral, e passa a ser tratada como um fenômeno cuja a causa precisa ser investigada. Hipóteses são levantadas, as propriedades

matemáticas das hipóteses são exploradas, e o mesmo roteiro já descrito é seguido. Encontrada a causa mais geral, segue-se uma nova etapa de síntese: um novo modelo matemático do mundo é construído e o conhecimento do mundo sofre novo salto. Esgota-se o modelo, registra-se discrepâncias e a busca por uma causa mais geral inicia novamente. E o programa se desenvolve dessa maneira, alternado etapas de análise e síntese, até se chegar nas causas mais gerais (ou essenciais) da natureza.

Será útil representar o programa delineado nos parágrafos anteriores através de um diagrama esquemático. Considere que F signifique “fenômenos”, H signifique “hipóteses” e C seja “condições iniciais”. Então, para um determinado fenômeno F_1 cuja causa se pretende determinar, um conjunto de hipóteses possíveis H são formuladas. O símbolo H , portanto, resume o conjunto de famílias de hipóteses $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5...$, cada qual podendo ser subdivididas em outras hipóteses $H_{1.1}, H_{1.2}, H_{1.3}...$ e estas subdivididas em $H_{1.1.1}, H_{1.1.2}..., H_{2.1.1}, H_{2.1.2}...$, e assim sucessivamente. Com o auxílio das condições empírico-matemáticas C_1 , consideradas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras, são eliminadas famílias de hipóteses, restando apenas a família H_1 , e o processo de eliminação prossegue por meio das condições iniciais C_2 e C_3 até que reste uma única hipótese.

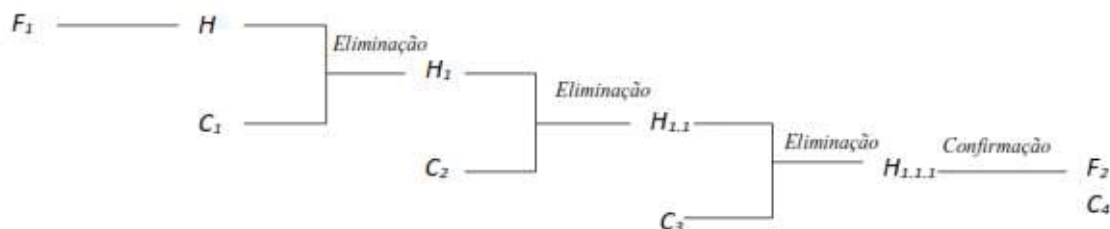


Figura 101 – Diagrama de eliminação de hipóteses e confirmação na ciência. Fonte: o autor.

No diagrama acima, quando todas as hipóteses alternativas são eliminadas, resta apenas $H_{1.1.1}$. Como não há outra hipótese alternativa, ela é admitida como *confirmada*, e assim não precisa mais ser considerada uma *hipótese*. Ela se torna um *fenômeno* (F_2). Como esse fenômeno está associado a uma lei matemática abstrata que foi determinada, essa lei pode ser considerada uma nova *condição inicial* (C_4), verdadeira ou aproximadamente verdadeira, que pode ser utilizada na construção do modelo matemático da síntese, e também na continuação da análise. No caso dos *Principia*, o diagrama acima teria a seguinte configuração:

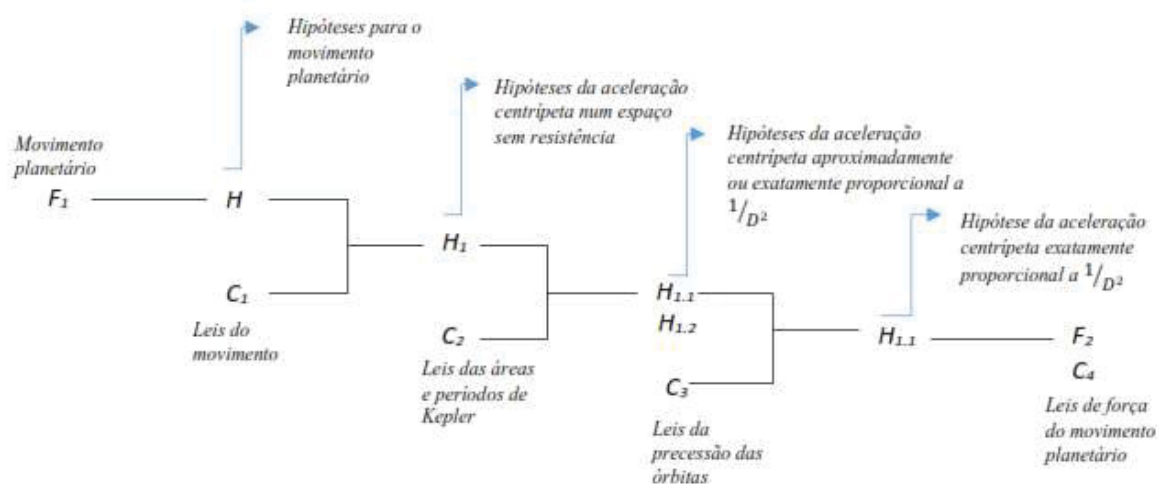


Figura 102 – Diagrama de eliminação de hipóteses nos *Principia*. Fonte: o autor.

Após confirmada a causa próxima do fenômeno inicial, um modelo matemático é construído a partir da condição inicial C₄. Essa etapa pode ser representada pelo diagrama abaixo:

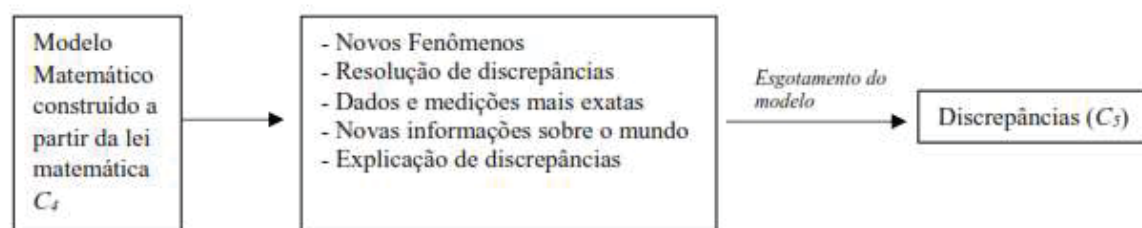


Figura 103 – Diagrama da síntese. Fonte: o autor.

As discrepâncias obtidas depois do esgotamento do modelo podem ser consideradas dados matemáticos verdadeiros ou aproximadamente verdadeiros sobre o mundo, portanto, uma nova condição inicial, com o mesmo estatuto das anteriores. Como base nos novos fenômenos e informações acumuladas, inclusive as informações relativas às discrepâncias obtidas depois do esgotamento do modelo, passa-se a buscar uma causa mais geral para o fenômeno. Retorna-se à etapa da análise, que agora pode ser representada pelo próximo diagrama⁹⁵³:

⁹⁵³ Note que a condição inicial C₅ (discrepâncias da etapa da síntese) não figura no referido diagrama sendo usada para eliminar hipóteses, mas acredito que não haveria problema se figurasse. Deixei-a de fora apenas para enfatizar que a causa mais geral pode ser obtida por meio somente da condição inicial C₄, e outras independentes, e ainda assim chegar numa hipótese que será compatível com C₅. Mas note que a compatibilidade com C₅ não é uma exigência, pois essa discrepância pode ser resolvida somente quando se chegar a causas ainda mais gerais. Por essa razão, reforço que a compatibilidade realmente necessária é que com C₄.

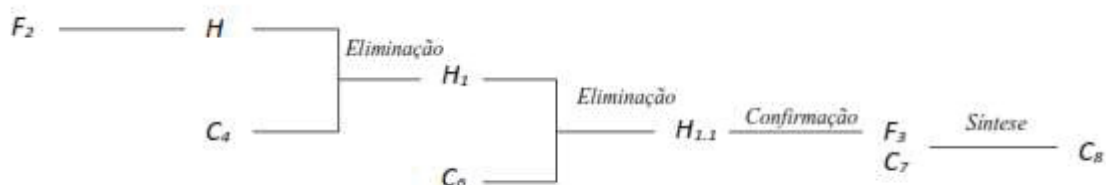


Figura 104 – Diagrama da análise e síntese na busca de uma causa mais geral.
Fonte: o autor.

Depois de uma nova etapa de síntese, semelhante a anterior, temos uma nova etapa de análise:

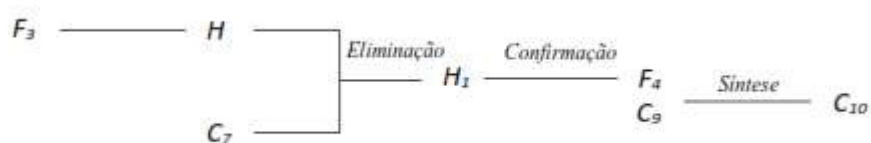


Figura 105 – Diagrama da análise e síntese numa etapa mais geral. Fonte: o autor.

E assim sucessivamente até chegar na causa mais geral.⁹⁵⁴

O que é fundamental reforçar mais uma vez é que o processo indicado nos diagramas acima raramente é levado a efeito por uma única pessoa e num curto período de tempo. Várias dessas etapas, e as vezes transições dentro de uma mesma etapa, são programas de pesquisa em si mesmos. Por exemplo, o estabelecimento da maioria das “condições iniciais” acima corresponde ao programa da matematização da natureza que foi iniciado nos séculos XVI e XVII. É necessário um trabalho árduo e constante para a determinação das propriedades e leis matemáticas descritivas dos fenômenos da natureza. Esse trabalho não é simples, nem de curto prazo. Havia muitos filósofos e matemáticos envolvidos nesse programa na época de Newton. A determinação da lei da queda dos corpos de Galileu (*Queda livre* $\rightarrow S \propto t^2$), das leis de Kepler, ou das leis do movimento são exemplos desse trabalho. Como já foi mencionado, esse esforço coletivo subsidiário, que alimenta o programa de Newton, tornou-se no campo que trabalho que hoje se sobrepõe mais ou menos ao domínio da *física experimental*. Da mesma forma, a exploração matemática das hipóteses possíveis a partir de certas condições matemáticas dadas, de modo algum é um trabalho simples e trivial. As dificuldades matemáticas e empíricas envolvidas facilmente podem atravessar uma geração de

⁹⁵⁴ Diminuí o número de eliminações no diagrama anterior apenas porque, na prática, o número de hipóteses possíveis vai se tornando mais restrito à medida que se avança para as causas mais gerais.

trabalho coletivo. É um programa em si mesmo. Como também já foi enfatizado, aqui se defende que esse programa passou a operar somente após os *Principia* de Newton e mais tarde foi denominado de *física teórica*.

Mas há um terceiro programa subsidiário do procedimento ilustrado nos diagramas acima. É a etapa da *síntese*. Essa etapa pode ser entendida também como um programa em si mesmo, que depende do trabalho coletivo e de longa duração. Após a confirmação da causa de um fenômeno particular, pelo desenvolvimento dos dois programas referidos anteriormente (teórico e experimental), uma etapa híbrida se estabelece. A construção de um modelo matemático a partir das leis matemáticas que operam na natureza, recém estabelecidas. Trata-se de um programa “híbrido” porque, embora altamente abstrato, afeito a problemas matemáticos difíceis, restringe-se a representação exclusiva do *mundo atual*, sendo requeridos dados e investigações empíricas de toda ordem. Por essa razão, a construção dos modelos científicos hoje pode ser compreendida como o resultado de um esforço concentrado de matemáticos, físicos teóricos e experimentais. Esse programa também só passou a operar plenamente depois do advento dos *Principia*.

O esclarecimento dos três programas subsidiários acima reforça como Newton articulou várias tradições de pesquisa distintas em um único e ordenado programa metodológico de investigação da natureza, conforme se defendeu no volume anterior.⁹⁵⁵ Mas para avançar nessa hipótese será preciso comparar o esquema desse programa com alguns episódios da história da física. A seguir, apresento alguns exemplos que nos permitem avaliar melhor esse ponto.

20.2 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO PROGRAMA METODOLÓGICO DOS

PRINCIPIA

O programa metodológico esquematizado na seção anterior pode ser verificado em outros episódios da história da ciência? Acredito que alguns exemplos serão úteis para fazer essa avaliação. Um primeiro e conveniente exemplo é o já citado artigo *Considerações sobre a Gravitação*, de Lorentz.⁹⁵⁶ No artigo, ele considerou três hipóteses possíveis para a causa da gravitação. O seu procedimento básico é partir de certas leis empírico-matemáticas (a lei da gravitação de Newton, as “leis da ciência elétrica”, e as leis da conservação de energia),

⁹⁵⁵ Veja a conclusão do volume I.

⁹⁵⁶ Lorentz, 1900.

assumindo-as como verdadeiras, e analisar algumas hipóteses para uma causa eletromagnética da gravitação a partir de estados possíveis de um suposto éter. Usando a terminologia aqui sugerida, ele estaria partindo de certas condições iniciais verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras e explorando matematicamente os mundos possíveis restringidos por essas condições. Em especial, ele postulou certas propriedades e estados do éter que satisfariam as condições inicialmente assumidas. Duas das hipóteses foram descartadas em razão da ausência de situações – mesmo imaginadas – em que se mostrasse possível a compatibilidade com as condições iniciais. Sobre a primeira hipótese, por exemplo, ele afirma:

A circunstância (...) que essa atração pudesse existir somente se a energia eletromagnética – de algum modo ou outro – desaparecesse continuamente é uma dificuldade tão séria que o que foi dito não pode ser considerado como uma adequada explicação da gravitação.⁹⁵⁷

Pela conclusão de Lorentz acima, percebe-se que a sua primeira suposição leva a consequências que entram em choque com outras condições consensualmente aceitas, como, no caso, a conservação de energia, não sendo, por essa razão, uma suposição aceitável. Depois de descartar essa primeira hipótese, ele segue com a apresentação e posterior eliminação da segunda. Ao final, restou apenas a terceira. Esta última hipótese de fato pôde ser conciliada com as condições iniciais. Mas nem por isso foi admitida como *confirmada*. Em vez disso, ele apenas considerou que “não há nada contra a formulação proposta”. Evidentemente, havendo outras hipóteses capazes de serem conciliadas com as condições iniciais, não há de se falar em confirmação. Ela apenas persiste como uma hipótese possível.

Outro exemplo significativo de aplicação do programa dos *Principia* está relacionado às hipóteses levantadas para explicar a causa dos fenômenos ópticos e eletromagnéticos no séc. XIX. Analisando esse exemplo a partir do esquema do programa dos *Principia* poderíamos resumir o seu processo também por meio de um diagrama. Inicialmente, temos os fenômenos ópticos e eletromagnéticos que pretendemos explicar (F). Várias hipóteses são formuladas (H). As condições matemáticas iniciais são as leis da ótica, da eletrostática e da eletrodinâmica (C_I). As hipóteses que não são compatíveis com essas condições iniciais são eliminadas, restando o conjunto de hipóteses H_I . Outras leis são utilizadas como condições iniciais, por exemplo, as leis da conservação da energia e momento (C_2). A partir dessas condições, outras hipóteses também são eliminadas, restando apenas um conjunto menor de hipóteses ($H_{I,1}$ e $H_{I,2}$). Explora-se matematicamente essas hipóteses, chegando à possibilidade

⁹⁵⁷ Ibid.

de um experimento empírico que poderia fornecer novas condições matemáticas cruciais para a escolha entre as duas hipóteses, ou melhor, para a eliminação de uma delas (C_3). Essa última condição inicial eliminou as últimas hipóteses restantes, permanecendo apenas a hipótese de Maxwell-Lorentz, que admite as *ondas eletromagnéticas* como causa dos fenômenos ópticos e eletromagnéticos. Eis o diagrama:

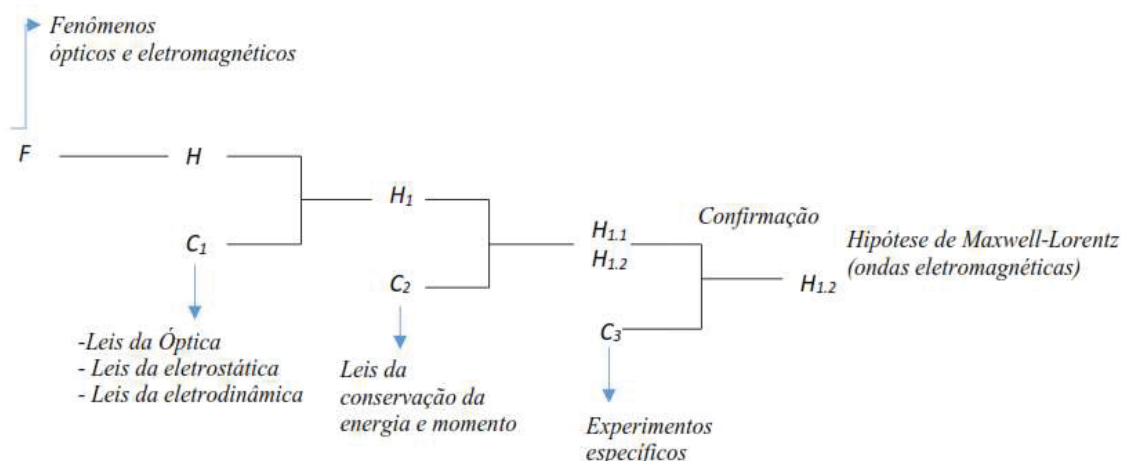


Figura 106 – Processo de confirmação da hipótese das ondas eletromagnéticas. Fonte: o autor.

Pela figura acima, a hipótese das ondas eletromagnéticas pela teoria de Maxwell-Lorentz foi *confirmada*. Após a sua confirmação, tem início a etapa da *síntese*, onde se detecta um problema que não apresenta solução simples, que é a já referida incompatibilidade com a lei da invariância de Galileu. Na falta de solução para esse problema dentro da síntese, os físicos passam a buscar uma resolução no próximo degrau da *análise*, admitindo que a teoria de Maxwell-Lorentz é incompleta e que deve ser substituída por uma lei mais geral, que está associada à causa da propagação das ondas eletromagnéticas em um *meio*. Lembremos que a determinação de uma causa mais geral tem como uma de suas consequências a “explicação de discrepâncias” do modelo anterior. Os físicos, portanto, começam a postular hipóteses teóricas que envolvem um suposto *meio* que explicaria a propagação das ondas eletromagnéticas, conforme o diagrama abaixo:

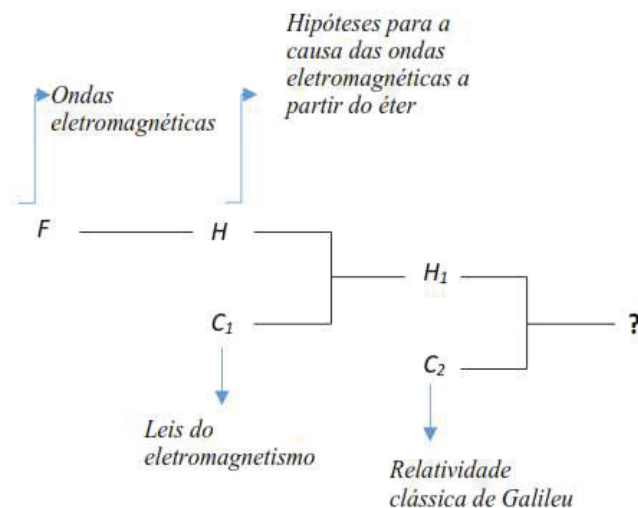


Figura 107 – Processo de análise das ondas eletromagnéticas. Fonte: o autor.

Mas como sabemos, essas buscas para a causa da propagação das ondas eletromagnéticas a partir de um possível *meio* não prosperaram. Os experimentos para determinar as propriedades do éter, bem como para detectar a sua existência, mostraram-se completamente inconsistentes, principalmente com a condição inicial C_2 . Em contrapartida, como também já sabemos, Einstein propôs uma alteração nessa condição inicial, a relatividade clássica de Galileu (C_2). Isso também era permitido pelas regras epistemológicas do programa dos *Principia*, uma vez que essa lei, assim como qualquer outra da base empírica da ciência, também poderia se tornar mais exata a partir do aumento do campo da experiência. O que Einstein fez, portanto, foi empreender o processo de *análise*, mas em uma lei fora do campo do eletromagnetismo, a lei da relatividade da mecânica clássica. Esse processo de análise de Einstein pode ser resumido no diagrama abaixo:

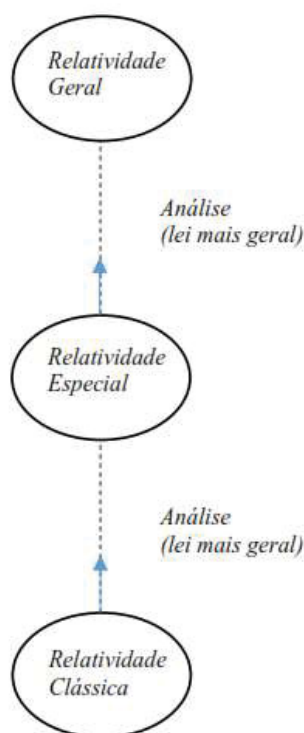


Figura 108 – Processo de análise da lei da relatividade. Fonte: o autor.

Nesse ponto estamos em condição de perceber que o foco principal de Einstein na sua teoria de 1905 não foi propor e explorar matematicamente outra hipótese possível para a causa da propagação das ondas eletromagnéticas através de um meio etéreo. O foco principal do cientista alemão foi resolver a incompatibilidade entre as leis da mecânica e da óptica, que ele desconfiava que deveria ser enfrentado antes de prosseguir com qualquer investigação sobre a causa da propagação daquelas ondas, ou seja, antes de buscar uma causa mais geral. Assim, a incompatibilidade entre a teoria eletromagnética de Maxwell-Lorentz e a lei da invariância de Galileu foi desfeita, e tanto a teoria da relatividade de Einstein quanto a teoria eletromagnética de Maxwell-Lorentz ganharam ampla aceitação.

Mas pela descrição e pelos diagramas acima se percebe que Einstein não enfrentou a questão da “causa da propagação das ondas eletromagnéticas”. Na verdade, a teoria da relatividade especial sugeria fortemente que não havia qualquer éter, uma vez que ele poderia ser completamente ignorado na teoria eletromagnética. Contudo, deve ficar claro que Einstein não propôs esse entendimento, e muito menos essa tese foi confirmada. A teoria da relatividade mostrou que, com o já referido ajuste nas condições iniciais da mecânica, os fenômenos ópticos e eletromagnéticos poderiam ser considerados como gerados por uma mesma causa, a saber, as ondas eletromagnéticas, sem que isso gerasse inconsistências com o campo amplamente estabelecido da mecânica clássica. Agora, se as próprias ondas

eletromagnéticas se propagam realmente por meio de um éter ou não, tornou-se uma questão a ser investigada posteriormente. Em outras palavras, acerca da *causa* da propagação das ondas eletromagnéticas, Einstein nada declarou. Dizer que o éter (ou a possibilidade da sua existência) pode ser ignorado é diferente de dizer que ele não existe. A teoria da relatividade não leva à conclusão de que o éter não existe; apenas que, caso exista, não recebe e nem exerce qualquer perturbação na interação com os corpos materiais.⁹⁵⁸ Portanto, a teoria da relatividade não resolveu a questão da causa da propagação das ondas eletromagnéticas. Apenas transferiu essa questão para um passo adiante da análise, passo que o próprio Einstein tentou investigar pela sua *Teoria de Campo Unificado*. Mas volto a esse ponto mais adiante. Vejamos, antes, o terceiro exemplo de aplicação do programa dos *Principia*.

O terceiro exemplo da aplicação do programa metodológico de Newton está ligado à formulação de uma lei mais geral da gravitação. Seguindo o roteiro do programa da ciência empírico-matemática, em primeiro lugar hipóteses possíveis deveriam ser levantadas e exploradas sistematicamente a partir de condições iniciais estabelecidas. Isso já estava sendo feito pelo menos desde a segunda metade do séc. XIX. Muitas dessas hipóteses não prosperaram, e outras tantas permaneceram como hipóteses possíveis. Após o advento da teoria da relatividade especial e geral, Einstein se volta para o problema da gravidade, e estabelece como condições iniciais a própria lei da gravitação universal de Newton, para os casos que ela já operava com exatidão, mas também a lei da relatividade geral, e a lei da conservação de energia-momento. Seguindo a numeração interrompida mais acima, no caso do diagrama esquemático da gravitação universal, teremos o seguinte diagrama para a lei geral da gravidade proposta por Einstein:

⁹⁵⁸ Einstein, 1920.

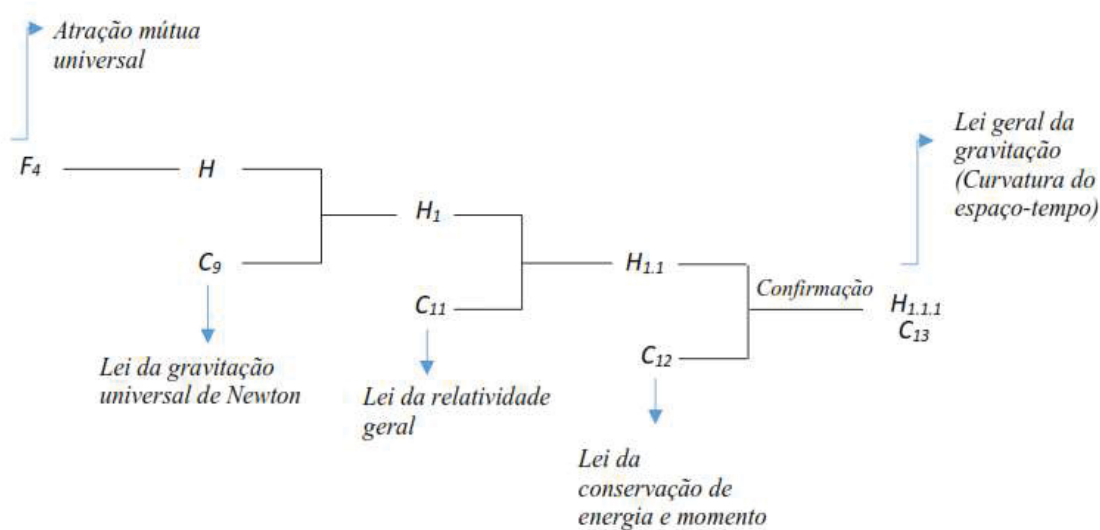


Figura 109 – Processo de confirmação com base na relatividade geral. Fonte: o autor.

Naturalmente, a partir de cada condição inicial imposta, o número de hipóteses possíveis vai se restringindo até chegarmos na única que satisfaça todas as exigências. Quando isso ocorre, consideramos que a hipótese foi *confirmada*. É claro que alguém pode levantar a objeção que é sempre possível alguém propor uma outra hipótese para explicar a gravitação universal. Com efeito, outras hipóteses foram propostas ao longo do tempo. Mas como já foi mencionado anteriormente, não basta à hipótese ser compatível matematicamente com a lei da gravitação universal. Propor uma hipótese que seja compatível com uma única lei é relativamente fácil. Mas não resolve o problema, pois sempre é possível encontrar várias hipóteses que satisfazem essa condição, e jamais temos uma efetiva confirmação. Agora, encontrar uma hipótese que seja compatível com um conjunto extenso de condições matemáticas iniciais, como no diagrama acima, além de extremamente improvável, caso se consiga essa façanha, não haverá muitas hipóteses restantes, se é que haverá mais do que *uma*. Esse foi o caso da lei geral da gravitação encontrada por Einstein. Outra hipótese que queira fazer frente a ela deve, antes de tudo, ser compatível com todas as leis físicas consensualmente aceitas. Isso é extremamente difícil. E havendo alguma hipótese que satisfaça esse critério, o processo de eliminação simplesmente continuará até que uma delas seja descartada.

É comum, entretanto, tentar antecipar algumas “pistas” sobre qual hipótese é mais “promissora”, ou sobre qual é mais “provável” de ser confirmada. Como em algumas situações o processo de eliminação de uma hipótese pode levar um tempo relativamente

longo, essas pistas podem poupar muito tempo e esforço da comunidade científica. Isso é feito principalmente se antecipando a etapa da *síntese*. Por isso é uma etapa frequentemente visitada como fonte de evidências convergentes, que fortalecem a convicção de que determinada hipótese será, ao final, confirmada. Como já se mostrou, caso a hipótese causal esteja correta, discrepâncias serão naturalmente explicadas, novos fenômenos serão revelados, dados mais precisos serão obtidos e novas informações sobre o mundo surgirão. Portanto, é normal que após o estabelecimento de uma hipótese, digo, após o estabelecimento da sua compatibilidade da hipótese com algumas condições iniciais, o cientista deduza de pronto uma série de consequências preliminares para avaliar se algumas discrepâncias já conhecidas são explicadas pela causa mais geral, ou se algum novo fenômeno detectável é predito. Foi isso que fez Lorentz, por exemplo, no fim do seu artigo *Considerações sobre a gravitação*; foi isso o que fez Einstein logo depois que chegou à constatação da compatibilidade da sua hipótese com as condições iniciais. Ambos fizeram cálculos preliminares para a conhecida discrepância da precessão da órbita de Mercúrio. Mas a diferença é que a relatividade geral levou a resultados muito mais contundentes que hipótese de Lorentz. E não apenas isso. Levou a outros resultados *convergentes*, como novos fenômenos, dados mais precisos, novas informações sobre o mundo, e assim por diante. Dificilmente uma hipótese errada terá tanto sucesso na convergência de resultados na síntese. Assim, mesmo que haja mais de uma hipótese possível, a etapa da síntese tem um grande peso na convicção dos cientistas sobre qual hipótese devem investir *primeiro*.⁹⁵⁹

A partir das considerações acima fica claro que também no estabelecimento da lei geral da gravitação, o programa dos *Principia* estava sendo seguido. Foi Newton quem ensinou o procedimento do parágrafo anterior. Após ele estabelecer a hipótese da atração universal, perfeitamente compatível com as causas anteriores, ele entrou na etapa da *síntese*, que forneceu evidências convergentes da corretude da sua hipótese, ainda que no caso dele esse procedimento não tivesse a intenção de antecipar pistas sobre a hipótese mais promissora. Mas, de qualquer forma, ele mostrou como a síntese apresenta resultados convergentes quando a hipótese é verdadeira (ou aproximadamente verdadeira), sugerindo aos

⁹⁵⁹ Não é difícil perceber que essa é a razão para os problemas frequentes em compreender o papel do método H-D na aceitação das hipóteses científicas no último século. Por um lado, parece que a predição de fenômenos tem grande importância para os cientistas na escolha teórica. Por outro lado, percebe-se que do ponto de vista lógico esse critério não é suficiente para aceitar uma hipótese. Como foi evidenciado nessa e nas últimas seções, o que ocorre é que esse critério é usado apenas para uma escolha *preliminar*, uma vez que uma confirmação definitiva pode levar muito tempo. Não é tão raro um cientista investir uma vida na investigação de uma única hipótese. Ele precisa, portanto, no mínimo, de alguns critérios preliminares para decidir onde vai investir a sua vida.

seus sucessores um modo de antecipar evidências sobre a hipótese mais provável de ser confirmada, num eventual dilema entre hipóteses possíveis.

Chegamos ao quarto e último exemplo de aplicação do programa da física teórica dos *Principia*. Trata-se da aplicação desse programa nos campos de pesquisa mais recentes da Física. Não é novidade que um dos principais campos de pesquisa em aberto da Física na atualidade é o *UFT (Unified Field Theory)*, ou a *Teoria de Campos Unificado*. Após da unificação do magnetismo e eletricidade por Maxwell, e depois da unificação do eletromagnetismo e da óptica por Maxwell, Lorentz e Einstein, passou-se a buscar uma teoria que unificasse o campo gravitacional e o campo eletromagnético. É bem verdade que uma relação entre a gravitação e o eletromagnetismo já era buscada desde o séc. XIX, como já vimos, mas aqui a proposta de Einstein preservou a hierarquia das causas, evitando teorias de éter, e propondo a busca por uma lei mais geral que incorpore tanto o campo eletromagnético, agora, covariante (pelo ajuste da relatividade especial), quanto o campo gravitacional, agora, também covariante (pelo ajuste da relatividade geral). Como se sabe, o termo *UFT* foi cunhado pelo próprio Einstein, que dedicou as últimas décadas da sua vida a esse projeto. Não é difícil perceber que objetivo dessa pesquisa não passa de uma nova etapa de *análise*. Buscar uma causa mais geral (ou uma lei mais geral) para os *campos* conhecidos. Em outros termos, Einstein mostrou que a causa da atração gravitacional é uma espécie de deformação do espaço-tempo. Mas o que é exatamente isso? Qual é a razão da massa deformar o espaço-tempo? Esse problema físico em aberto não passa do próximo passo na hierarquia das causas, a busca pela causa mais geral para a gravitação universal, que agora se manifesta pela busca da causa da curvatura do espaço-tempo pela distribuição de massa-energia. Paralelamente, Maxwell, Lorentz e Einstein mostraram que os fenômenos ópticos e eletromagnéticos são resultado de um único campo eletromagnético que se propaga de forma ondulatória. E Einstein mostrou que um suposto *meio* de propagação não exercia qualquer influência nos corpos materiais e, portanto, poderia ser ignorado. Mas como as ondas eletromagnéticas se propagam efetivamente? É inteligível supor que algo se propague no vácuo? Se o vácuo é a ausência total de matéria, como supor que uma *onda* se propague vácuo, uma vez que a própria definição de onda é uma energia que se propaga *por meio de* algo? Como vimos anteriormente, essa questão também não foi resolvida. Ainda que a teoria quântica tenha mostrado que luz tem propriedades de onda e partícula ao mesmo tempo, e como partícula não haveria uma restrição para a sua propagação no vácuo, persiste o problema de como algo pode ser, ao mesmo tempo, onda e partícula. Trata-se igualmente de um problema físico em

aberto, que segue, ou deve seguir, o roteiro da hierarquia das causas. Buscar uma causa mais geral para a propagação das ondas eletromagnéticas, ou para a dualidade onda-partícula.

Alguém poderia levantar a objeção de que o objetivo da física atual em buscar a unificação de teorias não é o mesmo objetivo de buscar causas ou leis mais gerais. O que Einstein, e outros que o seguiram na *UFT*, efetivamente perseguiam era a *unificação*, assim como o próprio nome do campo proposto pelo físico alemão já sugere. Mas aqui eu preciso discordar. O projeto de unificação e o projeto de busca das causas mais gerais, são *o mesmo projeto*. A unificação de leis físicas é exatamente a consequência de se encontrar uma causa mais geral. A própria história da gravitação universal serve como exemplo. Antes da teoria de Newton já havia um conjunto de leis empíricas independentes. A lei de Galileu da queda dos corpos, as leis de Kepler do movimento planetário, leis para o movimento específico da Lua, para o movimento das marés, e assim por diante. Uma causa mais geral, caso seja verdadeira, deve necessariamente unificar a explicação de vários fenômenos cuja causa é comum. É uma consequência *esperada* de uma causa verdadeira, sob os auspícios do princípio da simplicidade da natureza. Portanto, a busca por uma teoria que unifique outras é o mesmo que buscar uma causa mais geral que possa subsumir as demais sob ela. A unificação, contudo, não é imposta; é consequência natural.

Um diagrama pode ser útil para a melhor compreensão da equivalência entre os dois objetivos referidos no parágrafo anterior. Na base desse diagrama estariam as leis empírico-matemáticas descritivas dos fenômenos da natureza, considerados independentes. Seriam os fenômenos da óptica, da eletricidade, do magnetismo, da gravidade, da queda dos corpos, do movimento planetário, e assim por diante. Inicialmente são fenômenos naturais que não possuem qualquer relação. Inicia-se a busca pelas causas mais gerais para cada um desses fenômenos considerados isoladamente. À medida que se sobe na hierarquia das causas de cada campo, certas causas encontradas podem se mostrar comuns a dois ou mais campos de fenômenos, unificando-os. Segue o diagrama:

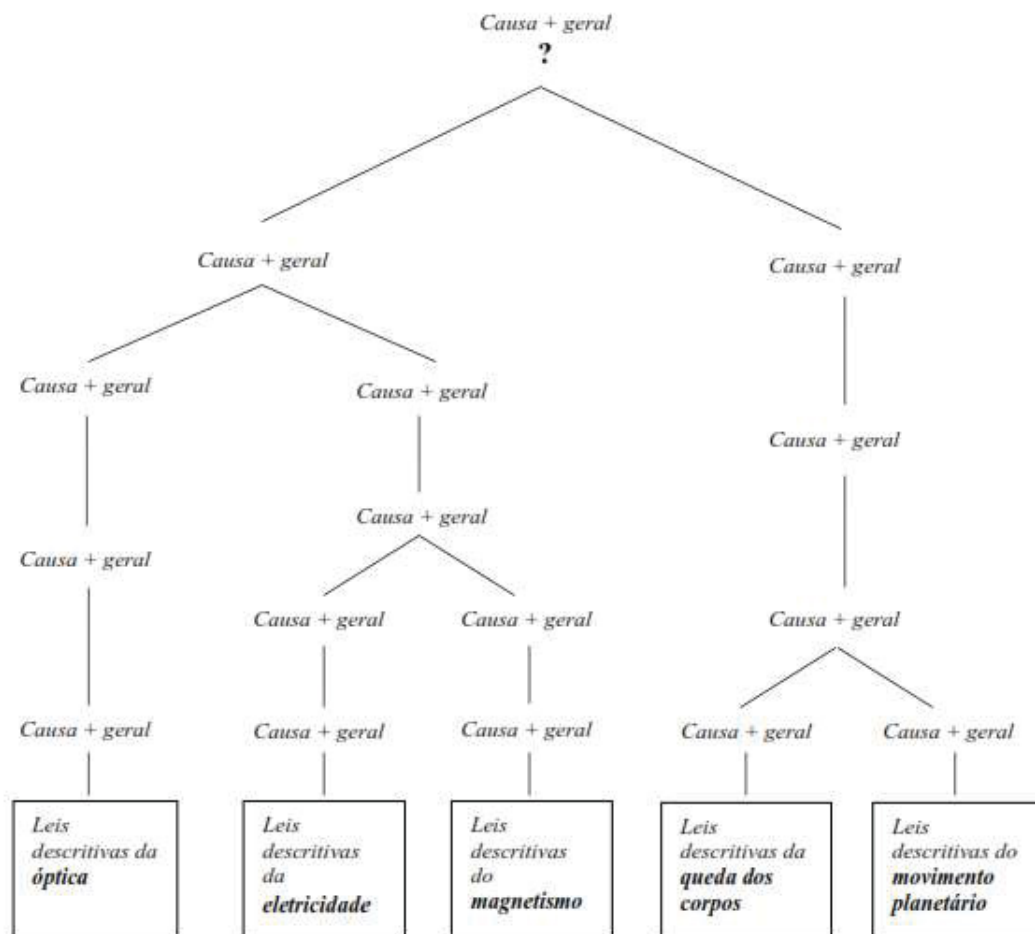


Figura 110 – Ilustração do processo de unificação na física. Fonte: o autor.

Como se sabe, Newton procedeu a primeira grande unificação da física. Unificou o fenômeno da queda dos corpos com o movimento planetário. Mas isso ocorreu precisamente porque encontrou uma causa mais geral que subsumia esses fenômenos até então considerados independentes. Maxwell procedeu a segunda grande unificação, reunindo os fenômenos elétricos e magnéticos sob uma única causa explicativa. E Einstein contribuiu para a terceira grande unificação, reunindo os fenômenos eletromagnéticos e ópticos sob uma causa única, sem qualquer inconsistência com as leis da mecânica. Portanto, nada mais natural do que o físico alemão imaginar que no desenvolvimento futuro da física, a determinação de uma causa mais geral, fosse para o campo gravitacional fosse para o campo eletromagnético, levaria a uma nova unificação. Assim, ele passou a buscar exatamente essa causa que unificaria os *campos* na física. Mas o que importa aqui enfatizar é que essa expectativa de Einstein, e outros, decorre imediatamente dos fundamentos do programa da ciência empírico-matemática iniciada nos *Principia*. O programa da física teórica. É esse programa que

compreende a natureza como simples, regular, regida por *leis matemáticas*, que permite acreditar numa metodologia que avança gradualmente para as causas mais gerais, por meio da matemática, e que leva a unificações cada vez mais abrangentes. Além disso, são os fundamentos desse programa que também esclarecem porque o “poder de unificação” de uma teoria é um valor tão caro para os cientistas. Assim como a “explicação de discrepâncias”, e a “predição de novos fenômenos”, o poder de unificação de uma hipótese pode servir como uma relevante pista que antecipa o seu potencial de ser efetivamente confirmada algum dia.⁹⁶⁰

Na esteira do mesmo raciocínio do parágrafo anterior podemos mencionar também a “simplicidade”, o “poder explicativo” e a “adequação empírica”. São todos valores caros aos cientistas porque são pistas extremamente valiosas para a *escolha preliminar* de teorias ou hipóteses possíveis, que podem ser eventualmente confirmadas no curso do tempo. Pela análise cuidadosa do diagrama de unificação da Física acima (Fig. 114), não é difícil perceber que uma causa mais geral verdadeira (ou aproximadamente verdadeira) sempre produzirá um *poder explicativo* maior que outras hipóteses consideradas, pois é capaz de englobar diversos conjuntos de fenômenos sob uma única explicação; do mesmo modo, uma causa mais geral verdadeira sempre aumentará o *grau de simplicidade* das explicações, pois uma única causa ou lei ordenará um conjunto cada vez maior de fenômenos; e uma causa mais geral verdadeira sempre produzirá também uma *adequação empírica maior* que as demais hipóteses, pois um número cada vez maior de fenômenos poderá ser deduzido de tais causas. Todavia, repito, esses critérios são apenas *preliminares*. Por isso nunca são suficientes. Eles são consequências esperadas de uma causa mais geral verdadeira, que se manifestam de forma natural *após* a confirmação de uma hipótese, mas que frequentemente são antecipados para tentar, ainda que de modo precário, definir um rumo mais seguro para o investimento de tempo e da energia da comunidade dos cientistas.

Voltando ao exemplo de aplicação do programa da ciência empírico-matemática na *Teoria de Campos Unificado* de Einstein, como dizia antes, o objetivo de unificação deriva da busca da ciência por causas mais gerais. São *um* e o mesmo projeto. Usando como mecanismo de confirmação estabelecidos nesse programa, um dos subprodutos do avanço da ciência é a própria unificação, que revela que teorias verdadeiras também tem maior poder explicativo, simplicidade e adequação empírica, e que termina por se tornar uma evidência surperveniente para os cientistas de que uma determinada hipótese pode eventualmente ser verdadeira.

⁹⁶⁰ Como vimos na seção 15.5, alguns filósofos defendem a unificação como um adequado critério de escolha das teorias.

Pelo diagrama acima, percebe-se que não foi possível encontrar qualquer caminho de conciliação, menos ainda de unificação, da teoria quântica com as leis do eletromagnetismo e da mecânica relativística. Mas aqui cabe algumas ponderações. Em primeiro lugar, a incompatibilidade entre a teoria quântica e a relatividade não pode ser utilizada para defender que não é possível uma teoria de tudo. Esse é precisamente um campo de pesquisa em aberto atualmente. Como vários historiadores da ciência já enfatizaram repetidas vezes, Einstein nunca foi contra a teoria quântica; nunca defendeu que essa teoria era irreconciliável com a relatividade; ele apenas acreditava que essa teoria deveria ser derivada de outra mais geral.⁹⁶² As dificuldades que ele encontrava em certos princípios da mecânica quântica deveriam ser esclarecidos naturalmente à luz dessa teoria mais geral. Em outras palavras, Einstein não abandonou a convicção de que o caminho para a conciliação da relatividade com a teoria quântica passava necessariamente por uma *Teoria de Campos Unificado*, ou seja, por encontrar uma causa mais geral que unificasse os campos eletromagnético e gravitacional.⁹⁶³ E outros ainda hoje continuam buscando uma tal teoria que unifique esses domínios.⁹⁶⁴ Portanto, é prematuro dizer que não é possível uma *teoria de tudo* porque a mecânica quântica não pôde ser conciliada com as outras teorias da física, em especial com a relatividade.⁹⁶⁵

Em segundo lugar, ainda que a relatividade e mecânica quântica fossem mesmo irreconciliáveis, isso não anularia o princípio básico que suporta o valor das unificações da física, que não é *a busca por uma teoria de tudo*, mas *o princípio da simplicidade da natureza*. Admitir que a natureza é simples e regular implica que o mundo natural é estruturado com um número finito e reduzido de propriedades e leis fundamentais, das quais todo restante deriva. Não implica, necessariamente, numa *única lei* do qual tudo derive. Em vez disso, estabelece que o número de leis fundamentais é pequeno. Ponto final. Isso já justifica a nossa busca por unificação, e a nossa expectativa de unificação, à despeito de ser

⁹⁶² Pais, 1979; Home, 2007; Lehmkuhl, 2014.

⁹⁶³ É bem provável que Einstein permaneceu focado no objetivo de unificação enquanto a maioria dos físicos e dedicavam ao desbravamento recém descoberto mundo quântico porque ele acreditava que essa unificação é que iria explicar corretamente os fenômenos do mundo quântico. Não acredito que se tratava de conservadorismo da parte de Einstein, como alguns têm defendido. Einstein foi um físico *teórico* por excelência. Ele estava fortemente associado ao programa da *análise*, de investigar as causas mais gerais dos fenômenos. Já os proponentes da mecânica quântica estavam procedendo a matematização das leis que descreviam esse novo universo. A meu juízo, não havia um lado que estava certo ou errado. Eles simplesmente estavam trabalhando em programas distintos.

⁹⁶⁴ Por exemplo, Orlov (2017); Dabbaj (2012).

⁹⁶⁵ Estou ciente do argumento que algumas leis da mecânica quântica são consideradas essencialmente probabilísticas, uma das razões pelas quais essas teorias seriam irreconciliáveis. O que acho precipitado é essa conclusão sobre leis que são *essencialmente* probabilísticas.

realmente possível uma “teoria de tudo”. Pode haver uma tal teoria. Ou pode não haver. Mas isso não afeta a expectativa de unificação das teorias físicas por meio de causas mais gerais.

As considerações anteriores reforçam que o projeto de unificação que se expressa em vários estudos e pesquisas da física atual – e que se expressa de forma emblemática no domínio da *Teoria de Campo Unificado* – é a continuação do programa da física teórica iniciada com os *Principia*, que estabeleceu o avanço gradativo em direção a causas cada vez mais gerais por meio de leis empírico-matemáticas. Mas a aplicação desse programa não se percebe somente nessa agenda específica de pesquisas atuais. Percebe-se também em outras linhas de pesquisa como, por exemplo, aquele que investiga as *forças interatômicas e intemoleculares*. Gostaria de encerrar esse capítulo fazendo um breve comentário sobre essa linha de pesquisa.

As forças interatômicas e intemoleculares são consideradas responsáveis tanto pela explicação das forças de contato, quanto pela explicação da coesão da matéria. A figura abaixo mostra um conhecido gráfico do comportamento das forças interatômicas em função da distância r entre os átomos. Após um certo valor crítico indicado pela linha tracejada, à medida que a distância r entre os átomos diminui, aumenta a força de repulsão; e à medida que a distância entre os átomos aumenta, a força de atração também aumenta, até chegar num ponto de inflexão a partir do qual a força atrativa diminui com uma certa função de r .

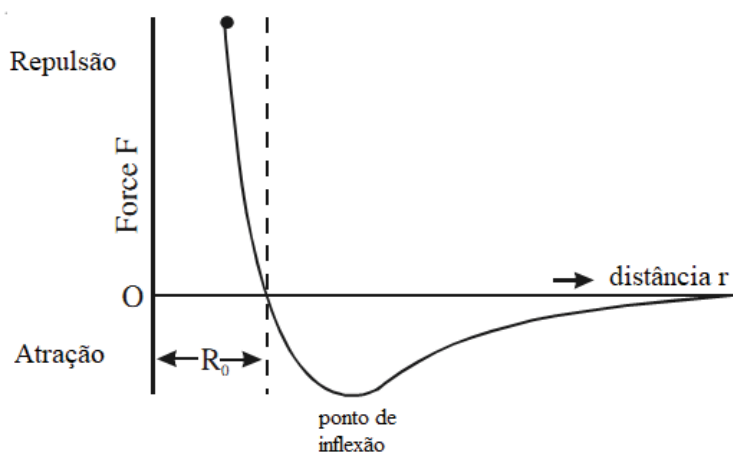


Figura 112 – Gráfico das forças interatômicas. Fonte: domínio público.

Percebe-se que o comportamento das forças interatômicas antes da linha tracejada justifica as *forças de contato*, em especial a força de ação e reação (ou a conservação do momento). Após a linha tracejada, o aumento da força de atração justifica a integridade e coesão da matéria, até o ponto de ruptura, a partir do qual essa força atrativa diminui.

Gostaria de fazer duas considerações sobre esse campo de pesquisa. Em primeiro lugar, ele parece retomar uma proposta de Lorentz, Hilbert, Wien e outros, de uma origem eletromagnética da matéria. A proposta de que as “forças eletromagnéticas”, ou talvez melhor dizendo agora, a energia potencial que gera certos *campos de força*, deve ser mais elementar que o *contato* entre os corpos. É isso, basicamente, o que decorre do gráfico acima. Em segundo lugar, decorrente da primeira observação, não é difícil perceber que o avanço do estudo dessas forças interatômicas também pode eventualmente explicar fenômenos como o da gravidade, curvatura do espaço-tempo, a causa da propagação das ondas eletromagnéticas, entre outros. Aliás, é possível encontrar estudos recentes que investigam precisamente essas relações.⁹⁶⁶ Isso nos leva novamente ao programa da ciência empírico-matemática dos *Principia* de Newton. O objetivo primário dessa pesquisa das forças interatômicas é prosseguir a trilha da hierarquia das causas, avançando cada etapa por meio da compatibilidade matemática com as causas anteriores, até chegar nas forças mais elementares da natureza. A suspeita que Newton expressou no prefácio aos *Principia* era que talvez todos os fenômenos da natureza dependessem de certas forças que emergem das partículas dos corpos. E que em vão se procura compreender a natureza sem considerar essas forças.

Acredito que os quatro exemplos da Física apresentados anteriormente servem para mostrar que é bastante razoável a hipótese de que o programa da ciência empírico-matemática dos *Principia* de Newton deu origem ao modo de investigação e justificação da ciência física atual. E assim sendo, que a compreensão da estrutura e funcionamento do programa de Newton é uma chave interpretativa particularmente útil para a compreensão do funcionamento da ciência em geral. Ficando esse ponto estabelecido, podemos avançar para mais algumas implicações e lições para o campo da filosofia da ciência. Podemos avaliar no que o quadro que aqui se desenhou desse programa nos ajuda a compreender a racionalidade da ciência como um todo.

20.3 IMPLICAÇÕES PARA A FILOSOFIA DA CIÊNCIA

Concluída a caracterização completa da estrutura e funcionamento da ciência empírico-matemática, podemos retornar para algumas conclusões que se relacionam com a disciplina da filosofia da ciência. Em primeiro lugar, do exposto anteriormente é possível esboçar uma caracterização geral das “teorias científicas” (pelo menos da ciência física) e da relação entre

⁹⁶⁶ Zhang, 2013.

as teorias, delineando uma estrutura geral da ciência. Como o programa da ciência empírico-matemática dos *Principia* foi incorporado em grande medida pela ciência posterior, pode-se defender que as teorias físicas são formadas por *modelos e leis*, sendo que os modelos são construídos sobre o alicerce das leis empírico-matemáticas, e as leis são construídas sobre o alicerce da indução. Em um maior nível de generalidade, as leis são estabelecidas de uma maneira indireta, por meio de uma confirmação que envolve um processo de eliminação de hipóteses alternativas que, em última análise, também satisfaz o critério indutivo.

Naturalmente, essa estrutura hierárquica lembra o projeto do positivismo lógico, porém com a diferença que aqui não temos uma abordagem unicamente *sintática* das teorias e expressa em termos da lógica clássica pura. A relação entre os níveis hierárquicos descritos acima simplesmente não pode ser reduzida a critérios de significado aplicados na linguagem com base na lógica clássica, como no projeto dos positivistas. Mas por outro lado, essas relações podem, sim, ser reduzidas à *indução*. Ou melhor, podem ser reduzidas à *dedução* e à *indução*, ou a uma lógica a ser formulada que relacione os dois tipos de inferências, ou trabalhe com premissas aproximadamente verdadeiras, e que podem se tornar mais exatas ao longo do tempo.⁹⁶⁷ Portanto, não confunda o leitor a descrição da ciência empírico-matemática que aqui se apresentou com o projeto positivista. Com efeito, as descrições aqui realizadas explicam precisamente *porque* os positivistas viram essa estrutura de níveis hierárquicos a partir de uma base na ciência, embora as suas explicações para essa percepção não tenham sido frequentemente satisfatórias.

Em segundo lugar, do esclarecimento do programa da ciência empírico-matemática feito anteriormente, fica também evidenciado que as teorias científicas *confirmadas* são, efetivamente, *aproximadamente verdadeiras*. A base empírica da ciência é construída por indução, e os conhecimentos construídos por indução são admitidos aqui como pelo menos aproximadamente verdadeiros, podendo ser reformulados e tornados mais exatos com a ampliação do campo da experiência. Assim sendo, as teorias construídas a partir das leis empírico-matemáticas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras também podem ser consideradas pelo menos aproximadamente verdadeiras. Afirma-se isso, agora, não mais apenas para a *teoria de Newton*, mas para as *teorias científicas em geral* (da ciência física, pelo menos), uma vez que ficou evidenciado que o programa dos *Principia* foi incorporado pela ciência posterior.

⁹⁶⁷ Já houve tentativas de construir uma lógica que lide com premissas aproximadamente verdadeiras (veja Weston, 1987). No entanto, esse projeto não recebeu muito atenção. Os conteúdos desenvolvidos nesse volume oferecem bons motivos para prosseguir com esse projeto.

Em terceiro lugar, do parágrafo anterior também decorre que o *realismo convergente* é possível na ciência *em geral*. Pelo esclarecimento do programa da ciência empírico-matemática realizado até aqui, percebe-se que as teorias científicas estão interligadas entre si, de modo a se aproximarem gradativamente das condições da realidade. Elas *convergem* para a realidade. Esse realismo é, no entanto, *isonomológico*, ou seja, está relacionado principalmente com as *leis* que operam na natureza. Desse modo, está mais próximo de um realismo estrutural do que de um realismo de entidades. Ainda assim, as estruturas representadas pelas leis matemáticas são aproximadamente verdadeiras, e podem levar eventualmente, na etapa da *síntese*, à dedução de entidades verdadeiras. Por conseguinte, deve-se distinguir claramente as entidades deduzidas na *síntese* daquelas hipotéticas propostas na *análise*, que não devem ser consideradas, de face, verdadeiras. O “calórico” e o “éter luminífero” são exemplos desses último de entidades teóricas, enquanto que o “elétron” e a “atração gravitacional” são exemplos do primeiro tipo.

Em quarto lugar, do esclarecimento aqui realizado do programa da ciência empírico-matemática, percebe-se que a noção positivista de progresso da ciência por “incorporação” de teorias (“chinese-box”) também é verossímil. A noção de que teorias vão se tornando mais gerais e englobando as anteriores, semelhante a caixas chinesas que são acompladas sucessivamente dentro de outras ligeiramente maiores, encontra respaldo na análise aqui efetuada. Ernest Nagel – que foi um dos principais defensores da visão de crescimento da ciência por incorporação de teorias – enfatizou que esse processo é uma característica inegável da ciência. Afirma ele que “o fenômeno de uma teoria relativamente autônoma ser absorvida ou reduzida por outra mais inclusiva é uma característica recorrente e inegável da história da ciência moderna”.⁹⁶⁸ Sobre isso também afirma Joseph Agassi:

Há duas demandas metodológicas que podem ser feitas a novas teorias propostas: deve entregar uma teoria que faça a primeira consequência dela ou uma primeira aproximada, ou um caso especial. É uma exigência que requer que a teoria explique o sucesso que a teoria prévia teve. A segunda demanda é que essa teoria seja mais geral e testada independentemente”.⁹⁶⁹

O crescimento por incorporação da ciência, portanto, foi notado por filósofos ao longo da história da ciência. Há quem enxergue esse processo na própria analogia dos rios afluentes oferecida por Whewell, no século XIX.⁹⁷⁰ Mas apesar de muitos terem notado essa característica da ciência, poucos foram capazes de explicar sob quais critérios e princípios

⁹⁶⁸ Nagel, 1961, p.336-337.

⁹⁶⁹ Agassi, 1963. Veja também Losee, 2001, p.174.

⁹⁷⁰ Losee, 2001, p.183.

essa incorporação se dá. Nagel notou, por exemplo, que nem sempre essa incorporação era “homogênea”, mas ainda assim tentou caracterizá-la em termos de consistência lógica dedutiva entre as partes, o que já sabemos que não é possível, em razão dessa incorporação se fundar, em última instância, na indução. Já iniciativas como a de Agassi, que procura colocar a incorporação como uma espécie de exigência metodológica, não funciona, porque ela não ocorre em todas as situações. A incorporação de teorias é mera consequência do desenvolvimento roteiro da hierarquia das causas a partir das leis matemáticas previamente confirmadas. Evidentemente ela não funciona com teorias que não são confirmadas, e também com as leis descritivas experimentais, que são estabelecidas de modo direto. De todo modo, diante do que aqui se estabeleceu, fica claro que a constatação de progresso por incorporação já evidenciada pelos positivistas é reforçada, mas com uma explicação distinta daquela adotada por eles.

Em quinto lugar, do esclarecimento aqui realizado do programa da ciência empírico-matemática, percebe-se que os critérios de escolha teórica distintos da confirmação ainda assim são importantes na ciência, como critérios preliminares. É claro que havendo a possibilidade de confirmação qualitativa na ciência tornam-se desnecessários outros critérios complementares. No entanto, se essa confirmação envolve décadas, as vezes até séculos de pesquisa, eventuais critérios preliminares podem poupar tempo, energia e recursos. Os cientistas, portanto, apoiam-se em certas pistas para uma escolha preliminar das hipóteses mais “promissoras”, para serem exploradas primeiro. Hipóteses promissoras são aquelas que oferecem: (1) predição de novos fenômenos; (2) explicação de discrepâncias; (3) maior poder explicativo; (4) maior simplicidade; (5) maior adequação empírica; (6) maior poder de unificação. Como já foi mencionado, o mais importante desses critérios é o “poder de unificação”, pois quando uma teoria unifica outras ela automaticamente se torna mais simples, como maior poder explicativo e com maior adequação empírica.

Para que fique mais claro esse último ponto pode ser útil tentar apresentar o procedimento de confirmação anteriormente esmiuçado de maneira paralela à confirmação H-D, também já discutida. Seguindo definição da confirmação H-D tal como apresentada por Sprenger, pode-se dizer que uma evidência E *confirma* H-D uma hipótese H , em relação a um conjunto de hipóteses auxiliares K , se e somente:

- (1) H e K são consistentes;
- (2) $(H \wedge K) \rightarrow E$;
- (3) K sozinho não implica em E .⁹⁷¹

De maneira análoga à essa exposição, seguindo os critérios já discutidos no capítulo 18, poderíamos sintetizar a confirmação defendida nesse trabalho da seguinte maneira: seja K o conjunto de conhecimentos e/ou leis físicas consideradas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras estabelecidas por indução ($L_1, L_2, L_3, L_4 \dots$); seja E o conjunto de evidências empíricas que sustentam esses conhecimentos e leis físicas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras ($E_{1.1}, E_{1.2}, E_{1.3}, E_{1.4}, \dots E_{2.1}, E_{2.2}, E_{2.3}, E_{2.4}, \dots E_{3.1}, E_{3.2}, E_{3.3}, E_{3.4}, \dots$, etc); seja H um conjunto de hipóteses concorrentes ($H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, \dots$) para fornecer uma causa mais geral para qualquer dos conhecimentos ou leis do conjunto K , digamos, L_1 ; seja K' o conjunto de conhecimentos de leis físicas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras levemente modificadas, ou, *tornadas mais exatas*, ($L_1', L_2', L_3', L_4' \dots$) que englobam a evidência empírica do conjunto K e avançam além dela; e seja E' um conjunto de fenômenos conhecidos ou desconhecidos que podem ser preditos por qualquer hipótese ($E_1', E_2', E_3', E_4', \dots$). Uma hipótese do conjunto H , digamos H_1 , estará confirmada como causa de L_1 se, e somente se:

- (1) H_1 e K (ou K') são consistentes;
- (2) H_1 implica em pelo menos um conhecimento ou lei ou do conjunto K ou K' , no caso, pelo menos L_1 ou L_1' ; ou seja, $H_1 \rightarrow (L_1 \vee L_1')$; ou $H_1 \rightarrow (L_1 \wedge L_2)$, ou $H_1 \rightarrow (L_1 \wedge L_2 \wedge L_3)$, ou qualquer combinação de conhecimentos dos conjuntos K ou K' , envolvendo necessariamente L_1 ou L_1' ;
- (3) Não há qualquer outra hipótese no conjunto H que atende tais exigências.

Uma hipótese que atende essas exigências pode ser considerada suficientemente *confirmada*. Note, no entanto, que a hipótese confirmada implicará necessariamente em *novos fenômenos*, ou seja, em um ou mais elementos do conjunto E' . À título de exemplo, digamos no nosso caso que seja o fenômeno E_1' . Assim, para reforçar a analogia, podemos acrescentar também esse último critério aos demais. A hipótese H_1 estará confirmada se, e somente se:

⁹⁷¹ Sprenger, 2011.

- (1) H_1 e K (ou K') são consistentes;
- (2) $H_1 \rightarrow L_1 \vee L_1'$ (pelo menos)
- (3) $H_1 \rightarrow E_1'$
- (4) Não há qualquer outra hipótese no conjunto H que atende tais exigências.

Não é difícil perceber que usual critério de aceitação de uma hipótese pela confirmação H-D funda-se somente em (3), que é, por si só, condição *necessária* para uma hipótese ser considerada verdadeira ou aproximadamente verdadeira, mas não *suficiente*. Com efeito, o critério (3) sequer pode ser considerado um critério de adequação empírica realmente robusto, posto que o lastro empírico massivo da hipótese repousa mesmo em (1) e (2). Toda a base empírica que sustenta os conhecimentos e as leis físicas aceitas como verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras está apoiando essa inferência por meio de (1) e (2). Ou seja, ao satisfazer especialmente (2), a hipótese H_1 já possui toda a evidência empírica correspondente a L_1 ($E_{1.1}$, $E_{1.2}$, $E_{1.3}$, $E_{1.4}$, ...), ou a L_1' , a seu favor, independente de qualquer predição do conjunto E' . E se a hipótese H_1 implica em L_1' e L_2' , incorporando essas leis sob uma única leis mais geral, ela vai incorporar também a evidência empírica correspondente a L_2' ($E'_{2.1}$, $E'_{2.2}$, $E'_{2.3}$, $E'_{2.4}$, ...). Portanto, quanto maior o poder de unificação, maior é a adequação empírica, maior é o poder explicativo e também maior é a simplicidade da teoria. Assim, a predição de novos fenômenos não é, nem de longe, o critério mais importante de adequação empírica da teoria; é apenas uma evidência convergente surperveniente. Assim como o poder explicativo, a simplicidade e a unificação. Eles podem servir como pistas para investir numa hipótese ou outra, mas não critérios definitivos de escolha.

De todo modo, a importância do poder de unificação de uma teoria fica patente. Não é sem razão que vários cientistas e filósofos já chamaram a atenção para a importância desse critério. Whewell fez alusão a esse critério ao discorrer sobre a “consiliência de induções”.⁹⁷² Philip Kitcher argumentou que a unificação é um adequado critério para explicação e aceitação de teorias.⁹⁷³ Nicholas Maxwell deu crédito a Einstein, que, segundo ele, considerou a unificação tanto como princípio diretivo da ciência, quanto critério de aceitação de teorias. Ele defendeu que “é tarefa do cientista descobrir essas leis [leis invariantes, determinísticas e estatísticas] e trabalhar em direção a uma unificada e compreensível ‘teoria de tudo’”.⁹⁷⁴ Ele fez da unificação o fundamento do “*aim-oriented empiricism*”. Nesse empirismo orientado, as

⁹⁷² Whewell, 1837.

⁹⁷³ Kitcher, 1989, p. 477.

⁹⁷⁴ Maxwell, 1993, p.62. Veja Também Losee, 2001, p.217.

teorias podem ser rejeitadas empiricamente por falharem nesse propósito de unificação. Não há dúvidas, portanto, da importância da unificação do projeto da ciência. Mas ainda assim a unificação é um critério meramente preliminar. Uma teoria não é correta porque unifica outras teorias; ela unifica porque é correta. Mas é possível também que certas teorias corretas não unifiquem, principalmente aquelas com grau de generalidade menor. Então não é possível admitir esse critério como suficiente na aceitação de teorias. De qualquer forma, se uma teoria unifica e incorpora outras, isso é um forte indício de que é correta, e eventualmente pode ser confirmada. Portanto, é um critério preliminar útil que pode poupar muito tempo e esforço.

Mas a discussão sobre os critérios preliminares realizada acima chama a atenção para uma outra questão, com a qual pretendo terminar esse capítulo. A confirmação indireta da física teórica envolve necessariamente informações novas e velhas, ou, usando uma terminologia mais conhecida dos filósofos da ciência, envolve *nova e velha evidência*. Essa é uma informação importante porque se relaciona com o *problema da velha evidência*, ou da *evidência antiga*. Esse problema pode ser resumido como aquele relacionado ao tipo de evidência que serve para confirmar uma teoria. Via de regra, os novos fenômenos preditos são considerados “nova evidência”. Por exemplo, a curvatura da luz predita pela teoria da relatividade geral de Einstein. Naturalmente, esse tipo de evidência tem um grande peso no suporte das teorias. A “velha evidência”, por outro lado, seria um fenômeno que é consequência da teoria, mas que já era, antes, conhecido. Por exemplo, a precessão da órbita da Lua, que é consequência da teoria da gravitação universal, mas que já se tinha conhecimento. O problema em se usar a velha evidência como suporte para teorias é que parece mera *acomodação*.⁹⁷⁵ Com efeito, não é difícil propor hipóteses alternativas que podem ser ajustadas de modo a acomodar igualmente a essa evidência, diferentemente do caso da nova evidência. Portanto, a velha evidência parece não ter um grande peso confirmatório. Esse problema é corroborado pela análise bayesiana de confirmação, na qual a velha evidência não aumenta a probabilidade de uma hipótese ser verdadeira.⁹⁷⁶ Mas isso é um problema efetivamente porque, ao contrário do que parece surgir as propostas tradicionais de confirmação, a história da ciência tem muitos exemplos de que a velha evidência desempenha um papel fundamental na confirmação de teorias. Um exemplo com frequência lembrado é o papel da precessão da órbita de Mercúrio (velha evidência) na confirmação da relatividade geral. A questão que emerge a partir dessa análise do problema é *como, porque e em que circunstâncias* a velha evidência tem peso confirmatório.

⁹⁷⁵ Barnes, 2021.

⁹⁷⁶ Veja Glymour, 1980.

Evidentemente, a descrição do processo de confirmação de uma teoria desenhado nesse volume tem o mérito de esclarecer, também, essa questão.

Do que foi exposto anteriormente sobre a confirmação de uma teoria, fica claro que *de maneira alguma* uma teoria é confirmada pela velha evidência da forma sugerida pela análise usualmente feita e exposta no parágrafo anterior. Ou seja, não é *uma única* evidência, jamais, velha ou nova, que confirma uma hipótese. *É um conjunto de evidências convergentes*. A confirmação depende de um conjunto de evidências convergentes que, juntas, satisfazem o critério indutivo. Supor que a predição da precessão da órbita de Mercúrio *confirma* a relatividade geral é o mesmo que dizer que a predição da precessão dos equinócios, sozinho, confirmou a teoria da gravitação universal. Essa sugestão não poderia estar mais longe da realidade. A teoria da gravitação universal prediz a lei da queda dos corpos de Galileu; a lei do movimento planetário de Kepler; a precessão do movimento da Lua; o movimento das marés; além da precessão dos equinócios e de vários novos fenômenos (como a perturbação nas órbitas de Júpiter e Saturno). A teoria da gravitação prediz um conjunto de velhas e novas evidências, e é a convergência dessas consequências que fornece o suporte necessário para a eliminação das hipóteses que satisfará o critério indutivo. Então, a evidência antiga tem um papel muito importante, mas dentro desse contexto confirmatório. Não é uma única evidência que é levada em consideração.

Esclarecido isso, cabe agora dizer que frequentemente uma *evidência antiga específica* assume um papel de destaque dentre as outras. Via de regra é uma evidência com um grau de precisão bastante elevado, e que não foi usada no processo para formular a nova teoria, ou seja, não foi usada como condição inicial no processo prévio de para eliminação de hipóteses. É uma evidência antiga, mas até certo ponto independente no processo de formulação da teoria. A razão para isso é simples: ela será usada como uma espécie de *evidência de teste*, uma espécie de “prova real” após a teoria ser formulada, e servirá para como teste adicional convergente para detectar eventuais erros na formulação da hipótese. Caso o teste dê positivo, a teoria é considerada sem nenhum erro aparente, e segue para a síntese; caso o teste dê negativo, significa que pode haver algum erro matemático na formulação da hipótese, ou mesmo alguma outra hipótese alternativa que não foi considerada. Como já foi mencionado no capítulo anterior, no caso da relatividade geral, após Einstein estar com as equações do campo gravitacional prontas, ele fez o teste para calcular a precessão da órbita de Mercúrio. O teste deu negativo, o que o levou a considerar duas hipóteses, ou algum erro matemático na formulação das equações ou eventualmente outra hipótese possível que se adequa a todas as condições iniciais previamente estabelecidas, e que não foi considerada. Não se trata nesse

caso, de um ajuste *ad hoc* da hipótese, mas da consideração de outras hipóteses possíveis que precisavam ser eliminadas pelos mesmos critérios estabelecidos anteriormente.

Uma outra forma de perceber o processo descrito acima é contrastando a o papel aqui atribuído à evidência antiga com na confirmação com o critério atribuído por Lakatos. O filósofo húngaro procurou esclarecer sob que condições uma evidência antiga (e_o) poderia prover suporte para uma hipótese H . Segundo ele, isso ocorre se:

1. H implica em e_o
2. Existe uma hipótese rival de toque H' tal que ou (a) H' implique $\sim e_o$ ou (b) H' não implique nem e_o nem $\sim e_o$.

Sendo que, para ele, uma “hipótese rival de toque” é uma séria competidora da hipótese H em questão, que possui apoio de cientistas praticantes.

O que Lakatos está dizendo é que se existem duas ou mais hipóteses rivais com suporte empírico equivalente (presume-se), e uma dessas hipóteses implica na evidência antiga enquanto que a outra não (ou uma hipótese implique exatamente e a outra apenas aproximadamente), então a evidência antiga poderá servir de um adequado critério de escolha.

A meu ver, há alguns problemas com essa proposta de Lakatos. Em primeiro lugar, o que está implícito nessa formulação é que a evidência antiga serve de evidência *apenas* no contexto de hipóteses competidoras. Isso de certo modo é surpreendente, porque fica subentendido que essa não é a regra geral da ciência, mas a exceção. O contexto de hipóteses competidoras é a situação usual da ciência, assim, se a evidência antiga tem um papel nesse contexto, isso significa que ela sempre tem um papel. Mas em segundo lugar, o que parece estar implícito na formulação de Lakatos é que a evidência antiga tem um papel apenas subsidiário no suporte das hipóteses, e o que realmente é importante são as novas evidências. Se em alguma situação as hipóteses rivais não apresentam evidências novas, ou se apresentam evidências novas distintas que, no final, não se torna possível aferir claramente qual delas são mais favoráveis, então a evidência antiga pode servir de desempate, seguindo os critérios acima estabelecidos. Nesse caso, portanto, o papel primário de suporte é atribuído a nova evidência, e a evidência antiga tem apenas um papel de apoio subsidiário, caso a nova evidência não dê conta de distinguir a hipótese com maior suporte.

Em contraste ao argumento apresentado por Lakatos, baseado na descrição do funcionamento da ciência aqui desenvolvido, eu proporia a seguinte formulação: seja e_o a evidência antiga, e a evidência nova, e F_1 e F_2 os dois fenômenos que compõem a evidência

antiga, de modo que $e_0 = (F_1 \wedge F_2)$. Seja, também, K um conjunto de leis empíricas já consensualmente aceitas de um domínio, por exemplo, da Física. Uma hipótese de uma lei empírica H_1 , que pretende explicar F_1 e F_2 , estará confirmada se:

1. H_1 e K forem consistentes
2. $H_1 \rightarrow e_0$
3. Não houver nenhuma outra hipótese rival que satisfaça essas condições.

Já sabemos como é possível usar outras evidências antigas convergentemente para eliminar hipóteses alternativas até que reste apenas uma. Naturalmente, essas outras evidências já fazem parte do conjunto K , ou, em caso de necessidade, podem ser construídas especificamente para o caso, e posteriormente acrescentadas a K .

Da formulação acima se percebe que não há necessidade de “nova evidência” na confirmação. O leitor talvez possa achar estranho esse ponto, mas não custa lembrar que o objetivo inicial de se formular uma hipótese é explicar a evidência já conhecida, e não predizer uma evidência que nem se sabe da existência. Isso é consequência de uma explicação correta dos fenômenos já conhecidos. Então não há nada de incomum nisso. Mas prosseguindo com o processo iniciado pela confirmação acima, a hipótese H_1 , uma vez confirmada, torna-se a lei L_1 , que pode prever um novo fenômeno F_3 , o que na terminologia de Lakatos poderíamos chamar de “evidência nova” (e). Assim, podemos afirmar sobre a nova lei que:

1. L_1 e K são consistentes
2. $L_1 \rightarrow e_0 (F_1 \wedge F_2)$.
3. $L_1 \rightarrow e (F_3)$

Evidentemente, após a descoberta de F_3 , o conjunto de evidência antiga se amplia, passando a ser $e_0' (F_1 \wedge F_2 \wedge F_3)$. No entanto, com o passar do tempo o conjunto de evidências conhecidas se amplia, assim como outras predições são feitas a partir de L_1 são realizadas, e, eventualmente, alguma predição pode apresentar uma discrepância em relação ao observado na natureza. Digamos que em algum momento se conheçam os fenômenos F_4 e F_5 , e que L_1 prediga pelo menos aproximadamente o fenômeno F_5 , com alguma discrepância em relação à natureza. Nesse caso, teremos que a evidência antiga é, nesse momento, $e_0'' (F_1 \wedge F_2 \wedge F_3 \wedge F_4 \wedge F_5)$, e a lei L_1 implica apenas *aproximadamente* na evidência empírica:

1. L_1 e K são consistentes
2. $L_1 \rightarrow \sim e_0''$; ou $L_1 \rightarrow (F_1 \wedge F_2 \wedge F_3 \wedge \sim F_4)$;

A lei L_1 implica em alguns fenômenos precisamente (F_1 , F_2 e F_3), e em F_4 implica apenas aproximadamente, apresentando uma diferença quantificável φ . O fenômeno F_5 sequer é predito pela lei. Em outras palavras, a lei L_1 não está mais explicando perfeitamente a evidência já conhecida (ou a evidência antiga), portanto ela deve ser atualizada. Surge uma nova hipótese H_2 para explicar a evidência antiga e_0'' . Naturalmente, essa nova hipótese será confirmada se:

1. H_2 e K forem consistentes
2. $H_2 \rightarrow e_0''$; ou em uma quantidade de evidência conhecida no mínimo maior que $\sim e_0''$ ($F_1 \wedge F_2 \wedge F_3 \wedge \sim F_4$), ou L_1 .
3. Não houver nenhuma outra hipótese rival que satisfaça essas condições.

Digamos, por conseguinte, que a hipótese H_2 já implique em *pelo menos* ($F_1 \wedge F_2 \wedge F_3 \wedge \sim F_4 \wedge F_5$), e que seja consistente com o conjunto K , e que não haja nenhuma outra alternativa que possua essa compatibilidade. A hipótese estaria confirmada. Ainda assim, após chegar nesse resultado é possível dois testes completos *de prova* para avaliar a robustez de todo o procedimento para se chegar na nova lei. O primeiro é calcular φ , o que pode ser feito imediatamente após o processo estar concluído. Caso o teste dê positivo, é uma evidência conclusiva de que todo o processo anterior realizado foi correto. O segundo é predizer um fenômeno desconhecido, digamos, F_6 . Caso isso ocorra, não há mais qualquer dúvida sobre a hipótese, uma vez que ela já ampliou significativa os conhecimentos prévios, ou a evidência, agora, “antiga”. Teremos que e_0''' ($F_1 \wedge F_2 \wedge F_3 \wedge F_4 \wedge F_5 \wedge F_6$), e a lei L_2 , que satisfaz:

1. L_2 e K são consistentes
2. $L_2 \rightarrow e_0'''$; ou $L_2 \rightarrow (F_1 \wedge F_2 \wedge F_3 \wedge F_4 \wedge F_5 \wedge F_6)$;

E assim o processo segue adiante.

O que fica claro pela formulação acima é, primeiro, que a evidência antiga tem um papel fundamental na confirmação, talvez até principal. Não subsidiário. E que algumas evidências antigas podem ser muito úteis como evidência de prova após o processo de eliminação de hipóteses, o que não significa que elas foram usadas isoladamente para a confirmação. Elas têm papel semelhante à predição de novos fenômenos, embora em geral a confirmação convergente dos novos fenômenos exija maior tempo e esforço dos cientistas. De todo modo, ambos os testes devem ser vistos como o fim de um processo relativamente extenso, e não os próprios mecanismos de confirmação. Talvez alguém julgue necessário

incluir esses dois procedimentos entre os critérios de confirmação convergente, mas aqui julgo que não é necessário. Prefiro continuar atribuindo a eles um estatuto de testes complementares.

Como é possível perceber do que foi exposto nos parágrafos anteriores, Lakatos percebeu a ocorrência desse processo no estabelecimento das hipóteses científicas, embora tenha persistido em atribuir à nova evidência o papel de destaque, relegando a esse procedimento um caráter meramente eventual. Reforço que o processo de confirmação que aqui se descreveu de fato se apoia na *velha evidência*, sem deixar de considerar, no entanto, o papel da nova evidência. Aliás, bem de encontro com o que é observado nos vários episódios já referidos da história da ciência. É claro que para um modelo de ciência que apresenta fundamentos para uma confirmação qualitativa, caso ela se sustente, não haveria qualquer necessidade de se entrar nesse debate sobre velha e nova evidência, que se funda num grau de suporte inferior à confirmação. Mas o contraste aqui usado foi válido para enfatizar o papel da velha evidência na confirmação, e para reformular ainda mais uma vez o processo de confirmação incorporado pela ciência empírico-matemática, a partir do contraste com outras compreensões.

Esclarecido, portanto, a razão pela qual as teorias confirmadas da ciência empírico-matemática podem ser consideradas pelo menos aproximadamente verdadeiras, interligadas numa estrutura hierárquica que se aproxima gradualmente das condições da realidade, e fundadas em última análise no procedimento indutivo, cabe entrar no último capítulo desse volume, no qual se tentará construir uma imagem geral da ciência a partir de tudo que se desenvolveu até aqui. Uma imagem da ciência a partir do seu fundamento último da indução.

21 UMA IMAGEM DA CIÊNCIA INSPIRADA NOS *PRINCIPIA*

Ao longo desse volume analisei o programa metodológico de Newton nos *Principia* do ponto de vista da filosofia da ciência. Procurei mostrar o que caracteriza esse programa, e como ele foi aplicado e seguido do séc. XVIII até os dias atuais. As principais teses que sustentam esse trabalho foram, portanto, estabelecidas. Com os *Principia* nasceu um novo programa de investigação da natureza, que prossegue ainda hoje, e que pode convenientemente ser chamado de ciência empírico-matemática. Agora, antes de concluir esse trabalho, pretendo ao menos fornecer o esboço de uma *imagem da ciência* inspirada nesse programa. Digo “inspirada” porque nesse esboço pretendo propositadamente extrapolar as fronteiras dos *Principia* e do que aqui foi previamente desenvolvido. Pretendo apresentar uma imagem da estrutura e racionalidade da ciência baseadas nas conclusões aqui obtidas, mas avançam abertamente para o campo especulativo. Ainda assim, considero que será útil oferecer essa apresentação, seja pelas relações óbvias que mantém com esse estudo, seja porque terá o mérito de revelar os desdobramentos futuros dessa pesquisa, direções que ela pode seguir, além de problemas e limitações a que ela está submetida.

Mas antes de apresentar o referido esboço conclusivo de imagem da ciência será importante reforçar o que talvez seja uma das principais lições que emerge do estudo desse programa de Newton. A partir de toda análise e discussões encaminhadas nesse volume, torna-se possível perceber que boa parte do que entendemos tradicionalmente por “método” dos *Principia*, ou mesmo por “método” da ciência em geral, não é método; é epistemologia. Está mais relacionado com a forma natural pela qual a nossa estrutura cognitiva constrói espontaneamente o conhecimento do que com certos métodos que acreditamos que inventamos e seguimos. Com efeito, uma das principais conclusões dessa pesquisa é que não há diferença essencial entre os conhecimentos da ciência e aqueles do senso comum. Não há diferença *qualitativa* entre esses conhecimentos. Ou é conhecimento, ou não é. A diferença está somente na *quantidade*, e no nível de minúcias desses conhecimentos. A ciência apenas direciona, amplia, restringe e, principalmente, acelera a construção do conhecimento. Ela não constrói conhecimentos de qualidade distinta dos demais. Os critérios que a ciência usa são os mesmos que a nossa própria razão usa para a construção de qualquer conhecimento. O que entendemos frequentemente por *metodologia*, na verdade é *epistemologia*. Mas isso não significa que estou defendendo que não haja qualquer método; estou defendendo apenas que muito do que com frequência é atribuído ao método na verdade não é método, é epistemologia.

A conclusão acima é particularmente importante para esse capítulo final. Porque significa que, em última instância, não é possível construir uma adequada imagem da ciência sem que se construa, ao mesmo tempo, as linhas gerais de uma epistemologia. Para compreender a estrutura, o funcionamento, a racionalidade da ciência, inclusive o seu método, alguém precisa esclarecer, primeiro, e precisamente, o que é o conhecimento, como é construído, e onde termina a fronteira da epistemologia e inicia a da metodologia. Além disso, para evidenciar a racionalidade da ciência é preciso inevitavelmente evidenciar a racionalidade do próprio conhecimento. Por essa razão será necessário oferecer uma breve seção preliminar apresentando inicialmente o *princípio fundamental do conhecimento*, o princípio do qual se segue todo o edifício do conhecimento, e, em consequência, da ciência. O princípio no qual se funda a racionalidade do próprio conhecimento. Portanto, inicio esse último capítulo com uma breve discussão sobre esse princípio, para em seguida concluir com a apresentação da referida imagem da ciência.

21.1 A RACIONALIDADE DO CONHECIMENTO

Adianto que não abordarei em detalhes a questão da construção do conhecimento aqui, uma vez que pretento oferecer esse tema em um trabalho futuro específico. Ainda assim, considero oportuno antecipar alguns pontos que serão úteis para a imagem da ciência que se oferecerá logo em seguida, e que de qualquer forma já poderiam ser depreendidos das discussões precedentes. Embora as teses principais que foram defendidas nesse trabalho sejam sobre a caracterização do método dos *Principia* e sobre a sua relação com o surgimento do programa da ciência empírico-matemática, não é difícil perceber que, ainda que importantes, elas não são as teses de maior abrangência e repercussão dentre aquelas que aqui foram discutidas. A meu ver, as teses de maior abrangência desse trabalho foram aquelas apresentadas no capítulo 18, que versam sobre os fundamentos do confirmacionismo de Newton, ou, como poderíamos dizer agora, os fundamentos do próprio conhecimento. São elas: (1) *a indução é condição para o estabelecimento do conhecimento*; e (2) *a indução é condição de possibilidade do conhecimento*. Acredito que essas teses poderiam ser resumidas em uma única e objetiva sentença: *a racionalidade do conhecimento – e consequentemente da ciência – reside, em última instância, na indução*. Essa é a tese de maior repercussão desse trabalho. Vale a pena fazer algumas breves observações sobre ela.

Já foi discutido anteriormente que o que está em questão nessa tese não é a validade lógica ou empírica da indução, o que já foi suficientemente esclarecido por Hume, Popper,

entre outros. O que está em questão é que a indução está na base do conhecimento em geral, como fato praticamente inegável. A indução é o processo pelo qual o intelecto amplia e constrói os conhecimentos sobre o mundo. E esse processo nos conduziu a todo o conhecimento e sucesso científico e tecnológico que temos atualmente. O problema jamais foi *se* a indução é válida ou não. A indução *é* válida. Esse é o ponto de partida. A questão é – e sempre foi – *por que* a indução é válida. Por que a indução conduz ao avanço do conhecimento. Qual é a racionalidade envolvida que permite aos conhecimentos de indução serem considerados válidos; o que há na estrutura do mundo, ou em nossa estrutura cognitiva, que permite que os conhecimentos obtidos por indução se ampliem com sucesso. Popper apenas mostrou que a indução não poderia ser justificada pela experiência, o que aqui se apresenta como evidente, uma vez que a indução é a própria condição de possibilidade do conhecimento. Nada mais. A investigação deveria seguir por outros caminhos. Mas ao excluir a indução das suas especulações, Popper acabou precariamente excluindo o elemento fundamental da racionalidade do próprio conhecimento, o que gerou todo tipo de dificuldades que se multiplicaram posteriormente. E o erro de Popper foi seguido por boa parte dos filósofos da ciência desde então. A racionalidade não só da ciência, mas do conhecimento como um todo, reside na indução. A questão é saber no que consiste essa racionalidade.

Para encaminhar algumas reflexões sobre isso, consideremos novamente as duas referidas teses apresentadas no capítulo precedente. A primeira delas afirma que *a indução é condição para o estabelecimento do conhecimento*. Ou, em outros termos, *todo conhecimento é construído pela indução*. Como sustentar essa tese? Para analisar em melhores condições a racionalidade do conhecimento é mais conveniente separar a questão em duas partes. A primeira parte seria discutir essa racionalidade investigando a racionalidade da própria indução; a segunda parte seria investigar e discutir a racionalidade do conhecimento *a partir* da indução. Mas questionar a validade da primeira parte é questionar a validade do próprio conhecimento, uma vez que todo conhecimento é construído por indução. Então, para alguém que aceita o conhecimento humano como essencialmente válido, não creio que seja imprescindível explicar a primeira parte da questão. Pode-se simplesmente admitir a indução, e analisar a racionalidade a partir dela. Caso alguém não considere o conhecimento humano válido, restaria a ele explicar porque está lendo esse trabalho, e explicar como é possível defender qualquer coerência nos sinais gráficos que estão espalhados por essas folhas, ou quaisquer outras já produzidas.

Admitamos, portanto, que podemos assumir que o conhecimento humano pode ser considerado válido, pois a alternativa oposta parece ser muito mais problemática. Nesse caso,

não seria estritamente necessária uma explicação da racionalidade da indução. Mas ainda assim seria lícito que alguém procure os fundamentos dessa racionalidade. Até porque, mesmo que alguém admita que o conhecimento humano é essencialmente válido, há um nítido problema como a tese que todo conhecimento é construído pela indução. A indução é geralmente compreendida como uma generalização a partir de instâncias particulares. O resultado da indução é uma instancia geral que surge de outras instâncias particulares. Mas se assim for, dizer que todo conhecimento surge da indução é o mesmo que dizer que todo conhecimento surge de *instâncias particulares*, o que implica que o conhecimento não surge da indução. Naturalmente, caímos em uma contradição. E para resolver esta contradição é preciso ou admitir que o conhecimento surge, na verdade, de instâncias particulares, não de indução, – o que comumente é defendido – ou admitir que essas instâncias particulares não são genuinamente conhecimento, o que também gera algumas dificuldades; ou ainda, admitir que essas próprias instâncias particulares na verdade não são genuinamente particulares, mas também são construídas por indução, o que leva a um regresso infinito. Em outras palavras, ainda que se aceite a indução como válida no ponto de partida, nem por isso se deixa de perceber que há um problema com a tese de que todo o conhecimento é construído pela indução, o que justifica uma investigação sobre esse ponto.

Evidentemente, nesse trabalho não discuti essa questão, o que demandaria a investigação dos fundamentos da construção do conhecimento desde a sua origem. Mas ainda assim, no primeiro volume se mostrou como a indução pode continuar sendo considerada válida a partir de uma determinada concepção da estrutura da natureza.⁹⁷⁷ Especificamente, mostrei que sendo a natureza considerada simples e regular, estruturada sob um número reduzido de princípios, propriedades e leis, o procedimento indutivo sempre conduzirá a conhecimentos aproximadamente verdadeiros, ou melhor, sempre captará a estrutura local da natureza, que pode ser ampliada por novas induções, e que ao cabo leva ao progresso gradual do conhecimento. Em outros termos, sendo a natureza estruturada de maneira regular, a indução é um procedimento que levará ao avanço do conhecimento.⁹⁷⁸ É preciso notar, entretanto, que considerar que a natureza é *regular* é distinto de considerar a natureza *uniforme*, conforme Hume e outros consideraram. O termo *uniformidade* é ambíguo, e levou Hume e vários outros que analisaram a questão da indução a dificuldades desnecessárias. Embora toda uniformidade seja uma regularidade, nem toda regularidade é uma uniformidade. A estrutura regular da natureza ilustrada no capítulo 12 do primeiro volume não leva

⁹⁷⁷ Cap.12, volume I.

⁹⁷⁸ Veja a seção 12.1.1 do volume I.

necessariamente a uma ideia que a natureza precisa continuar se comportando no futuro como se comporta no passado, para ser regular, e sim que as leis gerais que definem a sua estrutura sejam as mesmas. Em outras palavras, a admissão de uma regularidade da natureza – uma natureza regida por leis gerais – não exige que se assuma que o sol deva continuar nascendo todos os dias para ser coerente. Exige que se assuma, por outro lado, que a própria eventual mudança no comportamento regular sol seja uma instância, e uma evidência, de que ele está sujeito a uma lei mais geral que ainda não conhecemos. *Regularidade* não deve ser considerado como sinônimo de *uniformidade*. De todo sorte, a minha intenção não é discutir aqui essa questão, mas apenas ressaltar que, mesmo que não se consiga mostrar como o conhecimento é construído desde a sua origem, ainda assim é possível defender que o procedimento indutivo conduz ao progresso do conhecimento se admitindo uma ordem regular da natureza, e por essa razão pode perfeitamente ser aceito.

Estou ciente que as observações acima não bastam para encerrar essa questão, mas aqui considero suficiente como justificativa preliminar para aceitar a tese que *a indução é condição para o estabelecimento do conhecimento* e acompanhar a imagem da ciência que dela se segue. Mesmo não sabendo como a indução poderia operar desde a origem, é possível mostrar que, de um determinado ponto em diante, ela pode perfeitamente conduzir ao progresso do conhecimento. Certamente, alguém pode questionar o fato de se ter que adotar uma noção específica da estrutura do mundo para aceitar a indução. Mas não penso que esse é um ponto que precise ser absolutamente estabelecido. A questão não é mostrar que o mundo *é* assim; a questão é mostrar que *é possível* que a indução conduza ao progresso do conhecimento se o mundo tiver uma determinada estrutura. Agora, se é razoável que o mundo seja, de fato, dessa forma, caberá uma avaliação ulterior pelas consequências dessa suposição, por exemplo, pelos resultados do nosso próprio conhecimento. Portanto, insisto que as observações anteriores bastam para admitir preliminarmente a tese que *a indução é condição para o estabelecimento do conhecimento*.

Mas as observações anteriores também bastam para admitir a segunda tese, que *a indução é condição de possibilidade do conhecimento*? Penso que não. Na seção 18.3 esclareci essa tese afirmando que sem a indução sequer seríamos capazes de reconhecer os estímulos que se nos apresentam. Ou seja, as próprias categorias da percepção e do conhecimento são construídas pela indução. Naturalmente, não é possível justificar essa ideia sem esclarecer como o conhecimento é construído desde a sua origem, sob pena de cair no já referido regresso infinito. Para sustentar essa ideia é preciso admitir que as próprias instâncias que consideramos *particulares* são obtidas também por indução. E não somente elas; as

próprias *categorias* que tornam possível a compreensão dessas instâncias também são construídas pela indução. Isso significa que para defender esse ponto são necessários esclarecimentos que extrapolam o que foi desenvolvido nesse trabalho. Ainda assim, vale ao menos enunciar um encaminhamento de resposta para essa questão. Rigorosamente falando, as categorias da percepção e do entendimento não são construídas pela *indução* propriamente dita. São construídas pelo *mesmo princípio* que também coordena os procedimentos indutivos. Ou seja, há um único princípio que organiza todo o conhecimento, desde os primeiros estímulos sensoriais sem significado, até as mais abstratas estruturas do conhecimento. Esse princípio atua inicialmente na construção das categorias da percepção e do entendimento, e depois se manifesta naquilo que conhecemos como *indução*. A indução não é o princípio; é apenas a sua manifestação. O que aqui chamo genericamente de *indução* não é um tipo argumento, ou um tipo de inferência lógica, é apenas a explicitação de um processo mental que conduz o pensamento a estruturas cada vez mais gerais e abstratas, e que obedece um princípio fundamental que lhe confere a racionalidade.

Esse princípio, no entanto, não será apresentado nesse trabalho. Será suficiente aqui apenas aceitá-lo e vislumbrar a sua coerência a partir das consequências que dele se seguirão. Desse modo o leitor poderá avaliá-lo preliminarmente. Na verdade, boa parte do que já foi apresentado anteriormente é consequência de se admitir esse princípio. Diferentemente do que propõe Kant, as categorias da percepção e do entendimento não estão estabelecidas *a priori* em nossa estrutura cognitiva, mas são construídas por um único princípio, que também dá origem ao procedimento indutivo. Parafraseando Lakatos, essas categorias não seriam prisões com as quais nascemos, também não seriam prisões que nós mesmos construímos voluntariamente, ou criticamente, mas seriam prisões que a nossa própria estrutura cognitiva constrói autonomamente, a partir de estímulos que recebemos do mundo, e que são associados pelo princípio fundamental do conhecimento.⁹⁷⁹ Essas categorias, portanto, não são imutáveis, mas são, ainda assim, extremamente rígidas. Mais do que isso, não é possível dizer aqui.

Acredito que essas considerações são suficientes para esclarecer as linhas gerais do princípio que *todo conhecimento é construído por indução*, e que *a racionalidade do conhecimento reside, em última instância, na indução*. Vejamos, a seguir, a imagem de

⁹⁷⁹ Lakatos divide os epistemólogos em “passivistas” e “ativistas”. Passivistas seriam aqueles que sustentam que “a verdade da natureza é impressa em nossa mente perfeitamente inerte”. Os “ativistas” seriam aqueles que sustentam que “não podemos ler o livro da Natureza sem atividade mental, sem interpretá-lo à luz de nossas expectativas e teorias”. Os “ativistas conservadores” defendem que nascemos com as nossas expectativas básicas, e portanto, “tornamos o mundo em ‘nosso mundo’, e vivemos na “prisão do nosso próprio mundo”. Já os “ativistas revolucionários” acreditam que a nossa “estrutura conceitual pode ser desenvolvida e até substituída por novas, melhores; somos nós que criamos nossas próprias prisões, e também podemos, criticamente, demolí-las”. Lakatos, 1978, p.20.

ciência que surge a partir desse princípio, e como se pode vislumbrar a racionalidade do conhecimento avançando desse ponto de partida.

21.2 UM ESBOÇO DE IMAGEM DO CONHECIMENTO E DA CIÊNCIA

A partir das considerações preliminares sobre o conhecimento na seção anterior é possível, agora, construir uma imagem da ciência. Apresento essa imagem na forma de proposições em parágrafos numerados, e de maneira dogmática, por uma razão de economia e objetividade. Reforço que não é o propósito desse trabalho desenvolver cada um desses parágrafos, mas ainda assim defendo a utilidade dessa apresentação para conclusão da pesquisa.

(1) *Sobre o conhecimento. Todo conhecimento é construído por indução.* O princípio de associação fundamental do conhecimento constrói as categorias da percepção e do entendimento, e coordena o próprio processo de indução. A indução, portanto, é um processo cognitivo espontâneo, regido por um princípio de associação bem definido, e que torna as construções cognitivas cada vez mais abstratas e gerais. Ou seja, o *conhecimento* é aquilo que a nossa razão (ou a nossa estrutura cognitiva) constrói sozinha ao ser exposta a certos estímulos que são associados por meio de um princípio determinado.

(2) *Sobre o mundo, conhecimento e verdade. Todo conhecimento corresponde aproximadamente ao mundo.* Estabelecido o que é o conhecimento e como é construído, a questão seguinte é saber se ele *corresponde* ao mundo. A resposta é *não*. O conhecimento não corresponde *estritamente* ao mundo, mas corresponde *aproximadamente* ao mundo. Sendo a natureza simples e regular, a indução sempre construirá uma estrutura que corresponde aproximadamente ao mundo. Se *verdade* for definida como correspondência exata entre conhecimento e o mundo, então se pode dizer que todo conhecimento é *aproximadamente verdadeiro*. Apresenta uma correspondência aproximada com o mundo. À medida que outras induções são realizadas, mais o conhecimento se aproxima da correspondência exata com a realidade do mundo.

(3) *Sobre conhecimento e linguagem. O conhecimento é construído junto com a linguagem, portanto, pode ser expresso por meio dela.* As relações entre conhecimento e linguagem não serão desenvolvidas aqui. Mas basta dizer que se pode mostrar que o mesmo princípio que opera nas associações dos estímulos sensoriais e na indução também se manifesta na linguagem. Os conhecimentos de variados graus de generalidade são construídos juntamente com *nomes* que lhes são associados. Esses *nomes* são signos que se manifestam

desde um termo simples da linguagem até sentenças mais complexas, que podem ser formuladas de múltiplas maneiras. As traduções do conhecimento em linguagem podem ser melhores ou piores, mas em geral é possível apreender a estrutura básica do conhecimento pela linguagem e seu contexto.

(4) *Sobre a intuição. Conhecimentos possíveis podem ser antecipados pela intuição.* Para sobreviver, o ser humano muitas vezes precisa antecipar eventos, situações ou ocorrências. Frequentemente ele precisa agir antes de saber (ou conhecer). Por essa razão, temos a capacidade de formular hipóteses com o auxílio da *intuição*. Defino *intuição* como a capacidade da razão humana de oferecer uma resposta imediata e automática para toda demanda que se apresenta com base na totalidade dos conhecimentos previamente estabelecidos na estrutura cognitiva. O ser humano precisa desse expediente para agir. Para sobreviver, ele não pode ficar paralisado por não possuir um determinado conhecimento. A intuição decorre de uma espécie de *princípio de não-passividade da mente*. A mente simplesmente formula a hipótese mais provável com base no conjunto dos dados que possui, por mais precária que seja a hipótese. É um cálculo de probabilidades com base em ocorrências prévias, que pode ser comparado a muitos sistemas de inteligência artificial. Quanto maior o banco de dados, melhor funciona a intuição. Mudando o banco de dados, mudam as probabilidades, muda a intuição. Mudando a pessoa, muda a intuição. Mas em primeiro lugar é bom deixar claro que a *intuição* não pode ser confundida com *conhecimento estabelecido*. Quando observamos o sol nascer todos os dias e esperamos que nasça no dia seguinte, isso não é *intuição*. É *conhecimento*. A *intuição* se apresenta precisamente quando não há conhecimento estabelecido, antes que ele tenha sido formado, a partir do conjunto do banco de dados já pré-estabelecidos. Por exemplo, quando nossa mente espontaneamente associa a luz do sol com o fogo, sem que tenhamos tido experiências que pudessem estabelecer suficientemente que há fogo no sol, nesse caso estamos diante da *intuição*. Por isso, essa associação pode ser chamada mais convenientemente de uma *hipótese intuitiva*, não *conhecimento*. Em segundo lugar, é preciso deixar claro que essas hipóteses são formuladas *espontaneamente* pela mente, ou seja, não são formuladas pelo o exercício ativo e consciente do intelecto, e por isso inicialmente sequer são elaboradas na forma de linguagem. São relações que se estabelecem entre coisas ou entre eventos, e que surgem na mente de modo sutil e frequentemente vago.

(5) *As hipóteses intuitivas não são conhecimento, mas podem se tornar conhecimento.* Uma hipótese intuitiva é um *conhecimento possível*. Para que uma hipótese intuitiva se torne conhecimento basta que ela seja *confirmada*. A *confirmação* nada mais é que a ocorrência da

hipótese, que, ao se repetir, satisfaz a condição do conhecimento. Para fins de argumentação, suponha, por exemplo, que uma hipótese intuitiva possa ser traduzida grosseiramente pela sentença “onde há determinado som, há água”. Caso essa situação ocorra repetidas vezes, ou seja, caso se repita a experiência daquele determinado som em conjunção com a água, a hipótese se tornará, então, *conhecimento*. Esse conhecimento é absolutamente verdadeiro? Já sabemos que não necessariamente. Pode ser verdadeiro, mas é mais comum que seja aproximadamente verdadeiro. Há uma relação entre aquele determinado som e a água, e eventualmente podem surgir contra-exemplos, e novas induções, que tornem o conhecimento mais exato. Caso a ocorrência não se repita o suficiente para estabelecer o conhecimento, ou nem se repita, outras hipóteses intuitivas surgirão imediatamente após o teste, uma vez que nesse momento o observador será suprido com novas informações. Essa nova hipótese intuitiva, por sua vez, pode ser testada e confirmada, ou novamente alterada. E assim sucessivamente.

(6) *A intuição auxilia na construção do conhecimento.* Do que foi exposto nos parágrafos (4) e (5) é possível perceber como a intuição auxilia na construção do conhecimento. Em geral, a quantidade de estímulos e experiências provenientes do mundo são amplos demais para que se possa construir um conhecimento muito específico. Para isso, o nosso aparelho cognitivo precisa de *foco*. Quando surge uma necessidade por água, por exemplo, ele produz uma hipótese intuitiva “onde há determinado som, há água”. Isso acelera o processo de construção desse conhecimento específico. A mente entra, por assim dizer, em *modo de teste*, o seu foco ajustado e direcionado para os detalhes do mundo que se relacionam com a hipótese. Assim, a hipótese intuitiva é, em primeiro lugar, o resultado de uma demanda necessária para o indivíduo agir ou sobreviver, ou o resultado do princípio da não-passividade da mente; mas em segundo lugar, após a emergência da hipótese o seu aparelho cognitivo passa a observar os fenômenos sob o filtro dessa hipótese, o que direciona o foco para os detalhes do mundo que possam confirmá-la ou modificá-la. Ou seja, acelera a construção desse conhecimento específico. Portanto, a mente sempre trabalha com foco e prioridades.

(7) *Sobre a confirmação. Há confirmações diretas e indiretas.* Confirmar uma hipótese é satisfazer a condição do conhecimento, que é a indução. No entanto, essa condição pode ser satisfeita de modo direto ou indireto. A confirmação direta ocorre quando a hipótese intuitiva pode ser testada diretamente. Por exemplo, considere a hipótese intuitiva “um chimpanzé tem cinco dedos na mão”. Facilmente essa hipótese pode ser confirmada diretamente. Ao formular a hipótese, a mente passa a ter uma atenção direcionada especificamente aos dedos da mão de um chimpanzé (o que geralmente não ocorreria se não

houvesse a hipótese). Observando vários chimpanzés com o foco ajustado para as suas mãos e dedos, logo se satisfaz a condição do conhecimento, e se estabelece que o chimpanzé tem cinco dedos nas mãos. A hipótese intuitiva passa ser *conhecimento*. Mas há situações em que não é possível uma confirmação direta. Por exemplo, um evento passado que não se repete; a presença de um animal que não vemos, ou não conseguimos detectar. Suponha, por exemplo, que a mente de uma pessoa, ao ouvir alguns sons peculiares durante a noite em sua casa, apresente a hipótese intuitiva de que “há roedores na casa”. Será possível confirmar essa hipótese se ela não conseguir observar diretamente esses pequenos animais? A resposta é *sim*. Os roedores são animais que se enquadram em determinada categoria e possuem muitas propriedades já catalogadas por indução. Emitem determinados sons, apresentam certos comportamentos, comem determinadas coisas, deixam determinados rastros, e assim por diante. Apenas os sons correspondentes não são suficientes para estabelecer o conhecimento, por isso mesmo temos uma hipótese intuitiva. Mas se, além dos sons, observássemos objetos corroídos, determinados rastros, fezes, e outros vestígios, a convergência desses elementos iria eventualmente satisfazer a condição do conhecimento e teríamos uma genuína confirmação, embora *indireta*. Portanto, as hipóteses podem ser confirmadas de forma direta ou indireta. A confirmação indireta ocorre por *convergência*, que não passa de uma das manifestações da indução.

(8) *Sobre graus de convergência ou confirmação. Há conhecimentos estritos e prováveis.* Suponha que no exemplo anterior dos roedores as propriedades convergentes observadas não sejam suficientes para uma confirmação. Isso pode acontecer, em primeiro lugar, se houver um certo número de condições divergentes para a presença de animais na casa, além das convergentes. Em segundo lugar, isso pode acontecer se as propriedades convergentes não eliminarem outras possibilidades de animais; por exemplo, podem indicar tanto roedores quanto gatos. É importante ressaltar que, mesmo assim, pelo princípio da não-passividade da mente, esta continuará a sugerir uma hipótese intuitiva, a mais provável. A partir dos conhecimentos prévios sobre animais, casas, roedores, gatos, etc, caso haja a presença de mais propriedades comuns a roedores do que gatos, a probabilidade será maior para roedores, e a hipótese persistirá com roedores. Se houver mais evidências convergentes para a presença de animais na casa do que para a ausência, a intuição persistirá com a hipótese da presença de animais. Não é difícil mostrar esses cálculos. No exemplo considerado, se de dez evidências observadas, as dez convergirem para a presença de animais na casa, isso significa que o *grau de convergência* (ou confirmação) é 100%. Se apenas seis das dez evidências convergirem para os animais, o grau de convergência é 60%. E assim por diante.

Temos um *conhecimento*, estritamente falando, somente quando há 100% de convergência. Caso contrário, temos um *conhecimento provável*. Ainda no exemplo, se das dez evidências temos três compatível com roedores e sete compatíveis com gatos, teremos 70% de convergência para gatos. Temos também um *conhecimento provável*. Mas se das dez evidências tivermos quatro para roedores, e outras seis desconhecidas, isso significa que não temos em nosso banco de conhecimentos prévios os registros dessas propriedades, e, portanto, reconheceremos somente quatro propriedades de quatro, ou seja, 100% de convergência; teremos um *conhecimento estrito*, até que novas induções o tornem conhecimento provável, e posteriormente sofra um ajuste que o torne um conhecimento estrito de novo. Em suma, há conhecimentos *estritos* e *prováveis*.

(9) *Um conhecimento provável pode se tornar um conhecimento estrito, e um conhecimento estrito pode se tornar um conhecimento provável.* Do que foi exposto no parágrafo anterior é fácil perceber que um *conhecimento estrito* pode se transformar num *conhecimento provável*. Basta que se acumulem discrepâncias. Por exemplo, suponha que todos os corvos observados até o momento sejam pretos. Por indução, chegar-se-á ao conhecimento que pode ser traduzido por “todos os corvos são pretos”. Mas com o tempo se passa a observar um número pequeno, mas razoável de corvos brancos. Por indução surgirá o contra-exemplo: “há, também, corvos brancos”. O conhecimento antes *estrito* se tornou, agora, um conhecimento *provável*. Se de 100 corvos observados 10 forem brancos, o grau de convergência de “todos os corvos são pretos” é 90%. No entanto, a mente sempre busca conhecimentos estritos. Portanto, com o tempo os corvos passam a ser considerados de duas espécies: os corvos da espécie *A* são pretos, e os corvos da espécie *B* são brancos. Nesse caso a probabilidade volta a 100%, e voltamos ao conhecimento estrito. Todos os corvos da espécie *A* são pretos, e todos os corvos da espécie *B* são brancos. O processo de construção de conhecimento está sempre alternando em conhecimentos estritos e conhecimentos prováveis. Mas a estabilidade só é alcançada quando se tem um conhecimento estrito.

(10) *Há conhecimentos possíveis, prováveis e estritos. Os conhecimentos possíveis podem se mostrar, eventualmente, falsos. Os demais não.* Um *conhecimento possível* pode ser: (a) verdadeiro; (b) aproximadamente verdadeiro; ou (c) falso. Mostrar-se-á falso se não houver qualquer convergência. Um *conhecimento estrito* pode ser: (a) verdadeiro; ou (b) aproximadamente verdadeiro. Enquanto tiver 100% de convergência, pode ser verdadeiro. Quando deixar de ter 100% de convergência só pode ser aproximadamente verdadeiro. Um *conhecimento provável*, portanto, pode ser somente aproximadamente verdadeiro. Uma vez

que ele tem algum grau de convergência, ele nunca se tornará falso, podendo apenas ser ajustado a partir de novas induções.

(11) *Um conhecimento provável também pode ser considerado uma hipótese intuitiva.* Inicialmente a hipótese intuitiva é meramente um conhecimento possível que pode se mostrar eventualmente falsa. Se adquire algum grau de convergência significativo, não pode mais se demonstrar numa hipótese falsa, mas deve ser considerada aproximadamente verdadeira. Como há outras hipóteses com diferentes graus de convergência, a intuição sugere a mais provável. O conhecimento provável, portanto, também pode ser considerado uma hipótese intuitiva.

(12) *A estabilidade da estrutura cognitiva só é encontrada quando temos um conhecimento estrito. Caso contrário, temos um 'problema'.* No processo de construção do conhecimento, inicialmente uma hipótese intuitiva é um conhecimento meramente *possível*. Caso ela não seja confirmada e nem apresente qualquer grau de convergência ao longo do tempo será considerada *falsa*. Por outro lado, caso seja confirmada, tornar-se-á um *conhecimento estrito* (verdadeiro ou aproximadamente verdadeiro); esse conhecimento estrito, por sua vez, pode terminar com um grau de convergência menor que 100%, a partir de outras experiências, tornando-se um *conhecimento provável*. Mas conforme o parágrafo (9) o conhecimento provável é ajustado em novos enunciados mais exatos, tornando-se novamente *estrito*. A estabilidade da estrutura cognitiva só é encontrada quando temos um conhecimento estrito. Caso contrário, temos um *problema*.

(13) *Sobre problemas e impasses. Hipóteses intuitivas que persistem sem confirmação produzem o que chamamos de problemas.* Conforme vimos nos parágrafos (8) e (9) muitas vezes o grau de convergência de uma hipótese pode não ser suficiente para que ela se transforme genuinamente em conhecimento estrito (é necessário 100% de convergência). Mas como diferentes pessoas têm diferentes bancos de dados, haverá diferentes graus de confirmação entre as pessoas e, conseqüentemente, diferentes hipóteses intuitivas coexistindo. Chamo esse fenômeno de *impasse*. Uma vez que as pessoas convivem socialmente, e tem diferentes hipóteses intuitivas, não há acordo sobre o curso da ação. Se mesmo com o aumento das informações e ajustes sucessivos de hipóteses, a dificuldade de confirmação persistir, as diferentes hipóteses intuitivas podem começar a ser explicitadas, clarificadas, e até enunciadas, tornando-se *problemas em aberto*, ou simplesmente *problemas*. Portanto, os *problemas* são o resultado da persistência de hipóteses intuitivas sem confirmação, e o *impasse* ocorre quando há hipóteses intuitivas divergentes, o que reforça ainda mais o seu caráter problemático, pois interfere diretamente no curso de ação de um grupo de pessoas.

(14) *Sobre a imaginação. Problemas em aberto dão origem a hipóteses imaginativas.*

Em um problema em aberto as hipóteses intuitivas iniciam um processo de explicitação. Elas começam a ser enunciadas, agrupadas e classificadas. Por fim, começam a ser analisadas e desenvolvidas com o auxílio da imaginação. Defino *imaginação* como um processo de construção *consciente* do indivíduo a partir da sua própria intuição e da totalidade dos seus conhecimentos pré-estabelecidos. Assim, quando persistem problemas em aberto, inicia-se um processo de formulação consciente de hipóteses, com base nas hipóteses já apresentadas previamente pela intuição. Por exemplo, com base em uma única experiência envolvendo uma picada de cobra em que o paciente veio a falecer, a intuição de uma pessoa sugere que “picadas de cobra matam”. Na sequência, essa pessoa observa mais quatro casos letais. Portanto, estabeleceu-se um conhecimento por indução. “Picadas de cobra matam”. A hipótese intuitiva foi confirmada. Mas digamos que se observou posteriormente mais cinco casos, apenas dois fatais. O conhecimento antes *estabelecido* se tornou, agora, meramente *provável*, uma vez que somente 70% dos casos de picadas foram fatais. A persistência dessa situação do longo tempo a torna um *problema em aberto*. Suponha, agora, que outra pessoa, vivendo numa localidade distante da primeira, observou 60% de casos *não-letais* de picada de cobra. Temos, nessa situação, um *impasse*. Temos a coexistência de conhecimentos prováveis divergentes. O problema é reforçado. Se ao longo do tempo esse problema não se resolver, eventualmente se explicitarão as hipóteses intuitivas existentes: (a) “picadas de cobra matam”; (b) “picadas de cobra não matam”; (c) “picadas de cobra matam somente em determinado lugar”; (d) “picadas de cobra matam só algumas pessoas”; (e) “somente picadas de certos tipos de cobra matam”; (f) “picadas de cobra matam somente em certas partes do corpo”; e assim por diante. Nesse momento de explicitação, as hipóteses intuitivas variadas são enunciadas, comparadas, agrupadas, clarificadas e, por fim, formuladas com o auxílio da imaginação. Por exemplo, alguém pode formular a seguinte hipótese com o auxílio da imaginação: “somente as picadas de cobras policromáticas matam”. Em seguida, essa hipótese é submetida igualmente a teste, e pode ser efetivamente confirmada ou alterada. Esse processo pode se repetir várias vezes. Sempre que um conhecimento se torna provável, ele se torna um novo problema para ser resolvido, e, na sua persistência, surgem hipóteses imaginativas.

(15) *As hipóteses imaginativas direcionam e aceleram a construção do conhecimento.*

Assim como as hipóteses intuitivas, as hipóteses imaginativas auxiliam na construção do conhecimento. Em primeiro lugar, elas também ajustam o foco da percepção para a confirmação de um determinado conhecimento específico. No entanto, esse foco é maior que nas hipóteses intuitivas. Uma vez que são formuladas de forma consciente, a atenção

consciente também passa a fazer parte do processo de teste. Em segundo lugar, sendo as hipóteses imaginativas explicitadas na forma de enunciados, elas podem ser submetidas a análise e críticas, o que permite levantar incoerências e outros defeitos. Mas em terceiro lugar, e principalmente, o grande auxílio que essas hipóteses imaginativas trazem à construção conhecimento é a possibilidade de *mobilização coletiva* de teste. Posto que as hipóteses são explicitadas, sintetizadas, agrupadas e, principalmente, *enunciadas*, o teste das hipóteses sai do domínio da cognição pessoal, individualizada, e passa a ser de domínio coletivo. Um número indefinidamente maior de indivíduos pode ter o foco da percepção ajustado para a confirmar determinada hipótese, que foi socializada por meio de enunciados. Com o surgimento de um *problema*, e a enunciação de uma hipótese, a mente de um número massivo de pessoas pode ajustar o foco para confirmá-la. Portanto, as hipóteses imaginativas aceleram a construção do conhecimento.

(16) *Fatos, dados ou informações. Um conhecimento também é geralmente chamado de “fato”, “dado” ou “informação”.* Suponha que não temos a informação do número de dentes de um chimpanzé. Uma hipótese intuitiva é que ele tenha uma arcada dentária semelhante ao ser humano. Quando ocorre a confirmação que ele tem uma arcada dentária com 32 dentes, assim como os seres humanos, essa hipótese passa a ser considerada um novo *fato* sobre os chimpanzés, um novo *dado*, uma nova *informação*, em suma, um novo *conhecimento*. Essas palavras são perfeitamente intercambiáveis em nossa linguagem cotidiana, e referem-se à mesma coisa, a um *conhecimento*.

(17) *Sobre o conhecimento das causas. Um dos mais importantes conhecimentos para a sobrevivência humana é o conhecimento das causas.* Dentre os muitos conhecimentos que somos capazes de construir, o conhecimento da causa das coisas é de particular importância. A causa de uma coisa se refere à sua origem. O que a produz, o que a gera. David Hume já tentou formular uma explicação sobre como se constrói a ideia de *causa*.⁹⁸⁰ Mas vale a pena exemplificar uma formulação a partir dos pressupostos aqui encaminhados. Desde muito cedo observamos que o calor sempre surge em conjunção com o fogo. Por indução, portanto, concluímos que há uma conexão entre o fogo e o calor. Da mesma forma, pela experiência percebemos que há uma ordem temporal do calor sempre se seguindo ao fogo. Por indução, concluímos que o calor se segue ao fogo. De modo semelhante, desde cedo observamos o som que chamamos “latido” sempre ocorre em conjunção com um certo tipo de animal. Por indução, concluímos que há uma conexão entre o latido e esse tipo de animal. Por indução

⁹⁸⁰ Hume, 2000.

também estabelecemos que o som do latido sempre se segue ao movimento da mandíbula do animal. Desse modo, concluímos que há uma conexão entre esses eventos. O som do latido está para o cachorro assim como o calor está para o fogo. Essa *relação* entre o som do latido e o cachorro, que é da mesma natureza que a relação entre o calor e o fogo, pode ser chamada por variados nomes, mas escolhemos o termo *origem* ou *causa*. Assim, podemos dizer que o cachorro *origina* som do latido, da mesma forma que o fogo *origina* o calor. Ou ainda, o cachorro *causa* o latido, da mesma forma que o fogo *causa* calor. Não é difícil perceber que esse conhecimento das causas se mostra particularmente útil para a sobrevivência. Saber que o fogo causa calor, e que esse calor causa, por sua vez, queimaduras e dor é um conhecimento fundamental para o ser humano. Da mesma forma saber que um animal causa determinado som, principalmente quando se trata de um animal que pode trazer riscos à sua sobrevivência. O conhecimento da causa das coisas tem uma importância fundamental. Basta também lembrar do sem número de relações causais entre a ingestão de espécies vegetais e a saúde humana, algumas delas, como se sabe, letais. Isso faz com que os conhecimentos sobre as causas estejam entre aqueles mais importantes para a subsistência humana, o que justifica um foco especial da estrutura cognitiva para construí-los.

(18) *Tudo tem uma causa*. Uma vez que observamos as conexões causais do tipo ilustrado em (17) em um número incontável de coisas e situações, por indução concluímos que *tudo tem uma causa*. Tudo tem uma origem. Por indução nossa mente estabelece uma categoria abstrata da *causa*. Não se trata de um fundamento metafísico ou um enunciado absolutamente verdadeiro. Como deriva da indução, esse enunciado representa um conhecimento verdadeiro ou aproximadamente verdadeiro. A partir desse estabelecimento, tudo passa a ter uma propriedade específica: uma *causa*. Ouvimos um determinado som, admitimos que ele tem uma causa. Vemos um brilho no céu, admitimos que ele tem uma causa. Sentimos uma dor, admitimos que ela tem uma causa. E assim por diante. Admitimos que tudo tem uma causa. E precisamente por essa razão, para o ser humano tudo o que ocorre sempre é acompanhado da pergunta: “por quê?”. O ser humano é perseguido por essa pergunta que surge diretamente do modo como a sua estrutura cognitiva é constituída com o auxílio da indução. “O sol nasce todos os dias”. Por quê? “Onde há determinado som, há água”. Por quê? “O chimpanzé tem cinco dedos”. Por quê? “Quando esfria muito surge o gelo”. Por quê? “Quando esquenta muito, chove”. Por quê? Perguntamos sobre a causa de tudo o que nos cerca. E logo percebemos que são mais perguntas do que somos capazes de responder.

(19) *O problema da causa (ou problema da explicação).* Um dos tipos de problemas em aberto mais comuns são os problemas sobre causas. Do parágrafo anterior percebemos que a nossa mente admite que tudo tem uma causa. Não apenas admite, mas ela é impulsionada a perseguir essas causas. Como é um conhecimento vital, a nossa estrutura cognitiva sempre irá sugerir hipóteses intuitivas como respostas. A mente se ajusta para a construção desses conhecimentos específicos. No entanto, percebe-se que muitas das perguntas sobre as causas das coisas simplesmente não são – e nem serão – confirmadas. Ou porque a experiência para confirmar a hipótese intuitiva levará algum tempo até se manifestar, ou devido o grau de generalidade da causa procurada ou suposta. Devido o princípio da não passividade da mente, a resposta de um “por quê” sempre levará, também, a outros “por quês”. Por que o sol emite luz? Porque há fogo no sol. Mas por que há fogo no sol? Porque há fusão nuclear do hidrogênio no sol. Mas porque há fusão nuclear do hidrogênio? A pergunta sobre as causas jamais cessa e, uma vez respondidas, sempre leva a outras hipóteses mais gerais, a respeito das quais também se perguntará sobre as suas causas. Não é difícil concluir que as hipóteses sobre a *causa* das coisas muito frequentemente se tornam *problemas em aberto*. Chamo esses problemas particulares de *problemas explicativos*. Problemas relacionados com a causa das coisas. Os *problemas explicativos* são geralmente difíceis de serem confirmados. Dependendo do nível de generalidade, sequer haverá meios diretos ou indiretos de confirmação. Em geral, as hipóteses sobre as causas podem ser confirmadas apenas nos primeiros níveis de generalidade e depois disso se tornam inviáveis e até insolúveis. Como resposta, restam as *hipóteses imaginativas*, que, nesse caso, também podem ser chamadas de *hipóteses explicativas*.

(20) *A construção da estrutura cognitiva.* A mente não cessa a busca pelas causas até atingir o grau máximo de generalidade. Conforme já ficou claro dos parágrafos anteriores, a mente raramente permanece paralisada em relação às demandas da vida. Os estímulos sensoriais se associam formando categorias e conhecimentos. Os conhecimentos se associam por indução formando conhecimentos mais gerais, e novas categorias mais abstratas. Numa demanda em que não haja um conhecimento já estabelecido, a mente formula uma hipótese intuitiva, um conhecimento provável, o qual posteriormente é submetido a teste. Para problemas em aberto, a mente sugere caminhos intuitivos, e a imaginação nos leva a formular conscientemente hipóteses, que concentra ainda mais os nossos esforços para que ocorra a confirmação e se estabeleça o conhecimento. Mas até mesmo quando esses problemas em aberto são inacessíveis à confirmação – como, por exemplo, muitos problemas sobre *causas* – ainda assim a intuição não cessa de trabalhar, e oferece respostas que posteriormente são

desenvolvidas com o auxílio da imaginação. Parece que mente precisa de uma estrutura completa para funcionar corretamente; aparentemente, a mente só interrompe o processo de construção da estrutura cognitiva quando atinge o grau máximo de generalidade, mesmo que para isso precise extrapolar, e muito, o que consideramos aqui como conhecimento estrito, e fique no campo hipotético da intuição e imaginação. Quando a mente atinge a explicação de um “por que”, logo passa para o “por que do porque”, e assim prossegue até atingir o grau mais geral. Depois da mente ter estruturado as suas categorias até a máxima generalidade, a intuição e a imaginação também atingem o grau máximo de eficiência.

(21) *Sistemas explicativos. O funcionamento natural da nossa estrutura cognitiva leva, no limite, à construção dos grandes sistemas explicativos.* Como a mente jamais permanece paralisada, ela formula hipóteses com os dados que possui. No caso dos problemas sobre causas, em níveis mais altos de generalidade, essas hipóteses serão sempre imaginativas. Ao longo do tempo essas hipóteses vão sendo enunciadas, desenvolvidas, elaboradas, reelaboradas, agrupadas, classificadas, vão ascendendo no nível de generalidade explicativa até chegar aos grandes *sistemas explicativos* da humanidade. Diante de um fenômeno como o relâmpago e o trovão, naturalmente as pessoas se perguntarão: o que é isso? Por que acontece? Os sistemas explicativos podem declarar simplesmente que isso acontece porque existem deuses no firmamento que, quando em guerra, produzem tais efeitos. Note que é um sistema explicativo imaginativo válido, pois oferece *a causa*, a razão, a origem, o porquê. Note também que é uma explicação imaginativa que se fundamenta na *intuição*, no banco de conhecimentos prévios que aquela coletividade possui.

(22) *Sistemas explicativos filosóficos. Os sistemas explicativos filosóficos são mais restritivos que os demais.* Não há diferença essencial entre os sistemas explicativos mitológicos e os sistemas explicativos filosóficos. Ambos formulam hipóteses imaginárias sobre os “porquês”. No entanto, cada sistema explicativo trabalha com os dados que possui. Em primeiro lugar, os filósofos passaram a catalogar organizadamente e sistematicamente os conhecimentos sobre o mundo. Esses conhecimentos restringem e direcionam intuição e, conseqüentemente, a imaginação. Em segundo lugar, os sistemas filosóficos se muniram de conhecimentos específicos (a lógica, por exemplo) que permitiram a eles limitar ainda mais as hipóteses aceitáveis. São aceitáveis somente hipóteses que respeitam certas regras lógicas. E terceiro lugar, as hipóteses passaram a ser restringidas também por determinados “métodos” considerados racionais. Em sentido lato, esses “métodos” não passam de tentativas de explicitar o próprio processo de construção do conhecimento, principalmente para traçar uma demarcação entre as hipóteses explicativas filosóficas e aquelas mitológicas, ou do senso

comum, submetidas a restrições muito menores. Por exemplo, um método filosófico qualquer poderia ser resumido da seguinte forma: (1) ao enfrentar determinado problema, primeiro, deve-se levantar todas as hipóteses já formuladas sobre o assunto, ou tantas quanto possível, organizando-as e classificando-as; (2) como auxílio de ferramentas filosóficas já previamente desenvolvidas sobre a linguagem e lógica, deve-se analisar as hipóteses procurando contradições e incoerências lógicas internas; (3) usando as ferramentas da lógica e da linguagem, deve-se reestruturar e reformular as hipóteses em termos mais precisos; (4) deve-se consultar os seus conhecimentos espontâneos relacionados com o assunto ou, quando necessário, fazer o levantamento dos conhecimentos catalogados relacionados com o assunto; (5) por fim, formula-se uma nova hipótese imaginativa para o fenômeno. As hipóteses filosóficas continuam sendo imaginativas, mas sujeitas a muito mais restrições que uma hipótese mitológica ou uma hipótese imaginativa de algum indivíduo qualquer. Por exemplo, quando o filósofo busca investigar todas as hipóteses já formuladas sobre determinado problema, ele está partindo da intuição e imaginação de milhares de pessoas antes dele, e como já sabemos as sugestões da intuição não são meramente aleatórias. Portanto, o método filosófico restringe drasticamente as hipóteses explicativas aceitáveis.

(23) *A ciência antiga. A ciência surgiu como um sistema explicativo filosófico sobre o mundo natural.* A partir dos sistemas explicativos filosóficos surgiu a ciência antiga, que também veio a ser chamada de *filosofia natural*. Conforme definiu Aristóteles, a ciência é o conhecimento das causas. Ou seja, a busca pelas explicações do mundo natural. Essas explicações são como aquelas de qualquer sistema filosófico: restringidas pelos conhecimentos do mundo (agora o mundo *natural*), e restringidas por alguns conhecimentos específicos de particular importância, como aqueles metodológicos, da lógica, e da linguagem. A quantidade dos conhecimentos disponíveis, e a destreza na construção, mobilização e aplicação dessas ferramentas metodológicas definem a qualidade do sistema explicativo de filosofia natural, que pode ser criticado e rejeitado com base nesses mesmos elementos que lhe dão origem.

(23) *Importância dos sistemas explicativos. Os sistemas explicativos contribuem na construção do conhecimento.* A grande importância, ou talvez até necessidade, dos sistemas explicativos é que eles formam grandes categorias de análise para a mente. Como já foi mencionado, os estímulos recebidos pela mente são incontáveis, e em todas as direções. Para trabalhar com eficiência, a nossa estrutura cognitiva precisa, em primeiro lugar, reconhecer e organizar os estímulos que recebe. Os vários graus de categorias de conhecimento construídas pela indução até chegar aos mais abstratos sistemas explicativos formulados pela imaginação

auxiliam nesse reconhecimento e organização dos estímulos recebidos. Em segundo lugar, os sistemas explicativos também direcionam a mente a ter focos específicos para a construção dos conhecimentos. É preciso um foco determinado para as coisas consideradas de maior importância para a subsistência do ser humano. Os sistemas explicativos direcionam a mente para a construção de conhecimentos específicos. Isso acelera a construção do conhecimento em determinada direção. E acelera não apenas porque direciona o foco e mobiliza o trabalho coletivo naquele foco; acelera porque as informações divergentes dos sistemas explicativos são ressaltadas, formando conhecimentos discrepantes, que posteriormente podem levar até a eventual alteração do sistema explicativo. Em outras palavras, a partir da construção dos sistemas explicativos, as “discrepâncias” se tornam informações importantes (que de outra forma seriam ignoradas), que se acumulam, fazem novas associações, geram novos conhecimentos, e que ao final podem levar alteração do próprio sistema explicativo por outro mais adequado ao novo quadro de conhecimentos. O papel desses sistemas explicativos, portanto, não é necessariamente – ou inicialmente – fornecer uma representação aproximada da realidade; é reconhecer e organizar os estímulos, e direcionar o foco para acelerar a construção dos conhecimentos nessa direção. Somente no limite – depois de um período de tempo suficientemente longo – é que eles podem ser considerados como uma representação aproximada do mundo. Os sistemas explicativos são grandes lentes pelas quais se enxerga o mundo, que são substituídas por outras melhores de tempos em tempos.

(25) *A revolução científica dos séc. XVI e XVII. O acúmulo acelerado de novos conhecimentos na modernidade gerou a substituição de sistemas explicativos antigos.* Na modernidade, como se sabe, a ciência antiga passou por uma “revolução”. É consensual se admitir que essa revolução está relacionada basicamente com quatro fatores: a invenção de novos instrumentos, a prática de experimentos, o uso da matemática, e o surgimento das primeiras sociedades científicas. Sobre a invenção de novos instrumentos, pode-se dizer que impulsionou a revolução principalmente porque esses instrumentos amplificaram a nossa capacidade de captar as informações por meio dos sentidos. Instrumentos como lentes de aumento, telescópio, microscópio, barômetro, relógio de pêndulo, máquinas para calcular, entre outros, não deixam qualquer dúvida sobre isso. A invenção desses instrumentos amplificou a nossa exposição a estímulos sensoriais que antes não tínhamos acesso, e, portanto, aumentou a nossa capacidade de construir conhecimentos sobre o mundo, e também a quantidade de conhecimentos em áreas específicas de nosso interesse. Paralelamente à invenção desses instrumentos, a prática de “experimentos” (no sentido de hoje) também impulsionou a revolução. Esses experimentos criavam situações artificiais para “forçar” a

ocorrência de determinadas experiências que iriam abastecer a nossa percepção com eventos que iriam levar, por fim, à construção de conhecimentos específicos em áreas de nosso interesse. Para usar um termo que se tornou comum à época, os experimentos permitiam “torturar a natureza” com o objetivo de obter respostas. Boyle estava fazendo isso em seus experimentos com gases, e Galileu com seus experimentos com planos inclinados e pêndulos, por exemplo. Os experimentos se tornaram uma maneira artificial de acelerar e direcionar a coleta de dados em determinada direção. Isso sem falar no aumento da *precisão* desses dados, auxiliados pelos novos instrumentos, e pelas condições artificiais controladas. Dentre esses dados mais precisos estavam os dados *quantitativos*, matemáticos, que se tornaram comum com o uso de novos instrumentos criados exclusivamente para medição, e experimentos controlados especificamente para obter medições. O uso da matemática, por conseguinte, também impulsionou a revolução. Por fim, o surgimento das primeiras sociedades científicas, ou seja, sociedades exclusivas para a construção do conhecimento da natureza, também impulsionou a revolução. O trabalho coletivo, como já sabemos do parágrafo (15), acelera a construção do conhecimento. De forma geral, todos esses fatores que impulsionaram a revolução científica o fizeram porque tinham o mesmo fundamento: aceleraram a construção do conhecimento. Eles não criaram um novo tipo de conhecimento, eles apenas aceleraram a sua construção. A invenção de novos instrumentos aumentou a capacidade de construção de novos conhecimentos; o uso de experimentos tornou possível acelerar a construção de um conhecimento em determinada direção; a matemática também, como veremos a seguir; e a formação das sociedades científicas organizou ainda mais o trabalho coletivo, que já era organizado desde a fundação das primeiras escolas e posteriormente das universidades medievais. Com esses fatores, a quantidade de novos conhecimentos construídos se acelerou vertiginosamente na modernidade, e os efeitos mais imediatos disso foi o impacto que gerou nos sistemas explicativos (ou metafísicos) que vigoravam até então, e na sua ulterior substituição.

(26) *A ciência moderna. Os novos conhecimentos e novos sistemas explicativos em operação na ciência moderna geraram um aumento das restrições à intuição e imaginação.* O período geralmente chamado de revolução científica foi um período de transição entre sistemas explicativos em função do aumento abrupto dos conhecimentos sobre o mundo, devido novas ferramentas que passaram a ser utilizadas. Os novos sistemas explicativos (ou metafísicos) alteraram as lentes pelas quais passamos a enxergar o mundo, redirecionou os focos de investigação, e impulsionou ainda mais a revolução. Não é difícil perceber que a metafísica aristotélica começou a ruir nesse período e que a filosofia mecanicista foi

gradativamente assumindo o seu lugar. Também não é difícil perceber as conexões que haviam entre a nova metafísica emergente e os novos conhecimentos que se proliferavam. Mas é importante enfatizar que mesmo com todas essas transformações, nada mudou em relação à natureza do *conhecimento*, ou ainda em relação ao estatuto das explicações das causas mais gerais dos fenômenos. Quando se tratava de discutir as causas mais gerais dos fenômenos da natureza, persistia não havendo meios de confirmação possíveis, restando apenas apresentar essas causas como *hipóteses imaginativas*. As hipóteses para as causas dos movimentos planetários são um exemplo claro disso. Baseado no quadro de conhecimentos prévios da época, a intuição sugeriu várias hipóteses, dentre as quais a hipótese dos *vórtices* que, posteriormente foi desenvolvida com o auxílio consciente da imaginação, assumindo a forma conhecida e popularizada por Descartes.⁹⁸¹ Mas não havia meios de confirmação dessa hipótese. A compatibilidade com a filosofia mecânica era apenas o direcionamento que o sistema explicativo abstrato fornecia para mente e para o trabalho coletivo em torno dos problemas em aberto da época. Mas simplesmente era um fenômeno, assim como muitos outros, com acesso empírico limitado, o que tornava inviável uma confirmação simples. O método *H-D*, que era utilizado na época, não era mais do que aqui chamamos de um meio de *confirmação indireta*. Mas para que tal confirmação se efetivasse era preciso haver *convergência*. Se não houver convergência sempre restarão muitas alternativas possíveis e teremos um conhecimento *possível*, ou, no máximo, *provável*, baseado na intuição e imaginação. Ou seja, continuaremos com uma *hipótese*. Portanto, o método *H-D* não alterava a situação do estatuto básico das explicações na ciência moderna. A principal diferença entre a ciência antiga e a moderna era nos sistemas explicativos de fundo, e na quantidade dos conhecimentos estabelecidos, que aumentava as restrições à intuição e à imaginação.

(27) *O papel da matemática na revolução científica. A matemática abriu um caminho promissor para confirmações de hipóteses antes inacessíveis.* Quanto maior a quantidade de conhecimentos catalogados sobre as coisas e fenômenos em geral, maior a capacidade de confirmação de hipóteses eventuais que surgem em razão da necessidade. Voltemos ao exemplo dos roedores. Se não temos informações sobre as características, ou propriedades, dos roedores, menor as nossas condições de confirmar um evento concreto sobre a presença deles numa casa. A catalogação extensiva das propriedades das coisas é uma condição necessária para confirmações futuras e, conseqüentemente, para a construção de outros conhecimentos. Os experimentos utilizados no período da revolução científica tiveram um

⁹⁸¹ Descartes, 1997.

papel muito importante nesse ponto. Por meio deles se multiplicou o número de propriedades específicas das coisas e fenômenos. Dentre as propriedades que passaram a ser estabelecidas sobre as coisas, estavam as *propriedades matemáticas*. A natureza possui regularidades. E é possível mostrar que disso se segue que ela possui uma estrutura matemática.⁹⁸² Portanto, a natureza possui *propriedades matemáticas*. As propriedades matemáticas do movimento de queda livre, ou do movimento dos planetas, ou do comportamento dos gases são exemplos disso. A catalogação dessas propriedades tem grande utilidade para a confirmação de hipóteses futuras. Eis a razão para o amplo programa de matematização da natureza que havia na revolução científica. A matemática, por conseguinte, também era útil para acelerar a construção dos conhecimentos. Mas além disso, e principalmente, as propriedades matemáticas das coisas permitiam a construção de um quadro de propriedades para coisas cujas propriedades gerais eram de difícil acesso empírico. Isso permitia fazer as confirmações avançarem para fronteiras antes inacessíveis. A matemática, portanto, abriu um caminho promissor para a confirmação de hipóteses antes inacessíveis.

(28) *Os Principia de Newton*. O programa de Newton promoveu a confirmação das primeiras hipóteses imaginativas de grau mais elevado. Apesar dos modernos terem inventado instrumentos surpreendentes, terem criados métodos para acelerar a construção de conhecimentos (como os “experimentos”, o uso da matemática), e terem organizado sociedades científicas, eles não foram capazes de transformar a maior parte das suas hipóteses explicativas em genuíno conhecimento. Eles não foram capazes de elaborar meios de transformar as hipóteses sobre as causas dos fenômenos em *conhecimento estrito*. Não custa lembrar que o objetivo da ciência desde Aristóteles era o conhecimento das causas. Mas com exceção das causas de menor generalidade, que poderiam ser confirmadas diretamente pela experiência, todas as demais causas de grau mais geral não eram passíveis de serem confirmadas. Em geral, os modernos não foram capazes de avançar nessa questão. Mas não por duvidarem que era possível. Muitos deles tinham convicção dessa possibilidade. Com o desenvolvimento da *ciência empírica* (“filosofia experimental”), e com o desenvolvimento das ciências matemáticas e demonstrativas aplicadas à natureza, muitos passaram a se aplicar à construção de um projeto em que seria possível informar as causas dos fenômenos sem apelo à imaginação, ou seja, um projeto em que seria possível estabelecer um *sistema explicativo* como genuíno *conhecimento*. E isso efetivamente ocorreu com Isaac Newton nos *Principia*: ele foi o primeiro a conseguir estabelecer, com o auxílio da matemática e outras

⁹⁸² A relação de implicação entre a presença de regularidade no mundo e uma estrutura matemática será mostrada somente em trabalhos futuros.

técnicas, as causas de fenômenos mais abstrusos como legítimo *conhecimento*. Nesse momento houve uma grande ruptura. Pela primeira vez na história foi estabelecido um sistema explicativo (de segundo grau) como *conhecimento*, como um *fato aproximadamente verdadeiro*. Com os *Principia* de Newton a ciência atingiu um novo patamar explicativo.

(29) *A ciência atual. O programa científico atual tem como objetivo o estabelecimento de conhecimentos, estritamente falando.* Com os *Principia* de Newton se consolidou a revolução científica. De fato, a invenção de novos instrumentos e técnicas para extrair o conhecimento da natureza levou, por fim, à formulação de um programa que permitia o avanço sistemático na confirmação de hipóteses explicativas cada vez mais gerais. Aquilo que antes parecia improvável se tornou viável. Surgiu o programa científico atual. A ciência não precisa mais se contentar com hipóteses imaginativas para explicar as causas dos fenômenos naturais. Newton mostrou que também essas hipóteses mais gerais podem ser confirmadas por meio de ferramentas e técnicas adequadas. A ciência lida, portanto, com *fatos*. O domínio científico fica restrito a aquilo que é *confirmado*, ou o que está sendo investigado com vistas a uma eventual confirmação. Todas as ciências, não só a ciência empírico-matemática, tem o mesmo objetivo de estabelecer conhecimentos estritos. E não apenas estabelecer conhecimentos estritos, mas estabelecer conhecimentos estritos que são úteis. Que são necessários para a subsistência humana. É possível perceber que esses conhecimentos não são necessariamente conhecimentos de difícil estabelecimento, que dependem de instrumentos e técnicas inacessíveis para o indivíduo comum. Simplesmente não somos capazes de acessar, mobilizar, organizar e as vezes até lembrar de todos os conhecimentos que são necessários em boa parte das contingências da vida. Instituições que são responsáveis pela coleta, construção, catalogação desses conhecimentos são extremamente úteis para a coletividade. Nesse sentido, o conhecimento científico não passaria de *conhecimento*, estritamente falando. Nem melhor nem pior que outros. Mas em muitos casos se trataria de conhecimentos inacessíveis a um indivíduo desprovido de instrumentos especiais, técnicas e situações controladas. E dentre esses os conhecimentos frequentemente inacessíveis ao indivíduo comum estão as *causas* das coisas. O conjunto de propriedades que definem as causas e os efeitos das coisas, e a classificação e elaboração das cadeias causais que são úteis às ciências aplicadas. Em suma, a ciência atual, portanto, tem como objetivo a busca constante de novos conhecimentos, cada vez mais específicos, úteis para a subsistência humana, e a organização e socialização desses conhecimentos.

(30) *A ciência e a metafísica são interdependentes.* Do parágrafo anterior é possível concluir que a ciência simplesmente se constitui na busca e organização do *conhecimento*.

Mas do que até aqui já se expôs fica claro que é um erro pensar que a intuição, a imaginação, o senso comum, a filosofia e a metafísica não tem qualquer papel na construção desse conhecimento. Todos esses elementos funcionam conjuntamente, e de forma orgânica. Não há conhecimento sem intuição. A imaginação tem papel fundamental na estrutura de construção do conhecimento. E os sistemas explicativos aumentam a eficiência da intuição e imaginação. A ciência desenvolveu apenas técnicas e instrumentos para acelerar a construção do conhecimento. Mas ainda que não houvesse tais técnicas e instrumentos, o conhecimento prosseguiria. Os sistemas explicativos de variados graus organizam e direcionam o foco para a construção do conhecimento pela ciência; por outro lado, a ciência fornece os conhecimentos que alimentam e geram a eventual reformulação e aperfeiçoamento dos sistemas explicativos. Geralmente essas reformulações levam um tempo longo, as vezes séculos, tornando os sistemas explicativos imaginativos naturalmente rígidos, até dogmáticos. Contudo, a rigidez eventual dessas estruturas não resiste indefinidamente à pressão dos novos conhecimentos, e terminam por sucumbir diante da sua força, que se estabelecem na coletividade de forma inexorável, à despeito da sua própria vontade. Novas visões de mundo necessariamente se impõe, por mais que as vezes haja uma resistência consciente. Ciência e metafísica são interdependentes.

(31) *A linha demarcatória entre a ciência e a metafísica não é muito estreita.* Uma vez que a ciência e os sistemas explicativos mais abstratos são interdependentes, não é possível estabelecer uma linha muito estreita entre os dois domínios. É preciso formular hipóteses imaginativas para fomentar a construção do conhecimento. Na Física, por exemplo, há modelos explicativos que seguramente não são confirmados. São hipóteses imaginativas prováveis, às vezes meramente possíveis. Em algumas teorias os elementos imaginativos desses modelos podem ser discernidos sem grande dificuldade. Isso significa que não são científicos? É evidente que não. Isso ocorre porque as hipóteses sempre precedem o estabelecimento do conhecimento. Ocorre, também, porque as hipóteses imaginativas são necessárias para ajustar o foco e mobilizar o trabalho coletivo em determinada direção. Então, também faz parte do trabalho científico formular hipóteses imaginativas. Não como pontos de chegada, mas como pontos de partida. Apenas como um meio para impulsionar a construção do conhecimento.

(32) *As teorias científicas. Em geral, as teorias científicas são hipóteses imaginativas.* O parágrafo anterior leva à compreensão do porquê muitas propostas da ciência serem popularmente chamadas de “teorias”. Na verdade, as teorias são *hipóteses imaginativas*. Uma hipótese imaginativa é um conhecimento meramente *possível*, no máximo *provável*, portanto,

uma *teoria*. No entanto, uma *teoria científica* se distingue de uma hipótese imaginativa formulada por qualquer indivíduo. Distingue-se pelo número de restrições a que já foi submetida previamente, e principalmente pelas restrições impostas à intuição e imaginação pelo conjunto extenso de conhecimentos que os cientistas levam em conta, e que um indivíduo comum não tem acesso. Pode-se dizer, portanto, que uma teoria científica é seguramente uma hipótese *mais provável* que aquela do senso comum, ou melhor, um *conhecimento provável*, com um maior grau de probabilidade que aquelas hipóteses do senso comum. O universo desse cálculo de probabilidade é todo o conjunto de conhecimentos disponíveis da coletividade. Por isso a hipótese de um indivíduo isolado tem uma probabilidade muito menor. De todo modo, essencialmente uma teoria científica não deixa de ser uma hipótese imaginativa que auxilia na construção do conhecimento.

(33) *Somente as teorias científicas confirmadas podem ser consideradas aproximadamente verdadeiras.* Dentre as hipóteses imaginativas formuladas pelos cientistas há aquelas que são efetivamente confirmadas e aquelas que não são, ou ainda não foram. Somente uma teoria científica *confirmada* pode ser considerada aproximadamente verdadeira. As demais estão em fase de investigação e podem eventualmente ser eliminadas. A teoria *confirmada*, por sua vez, é *aproximadamente verdadeira*, e pode se tornar mais exata com o tempo. Portanto, o seu conteúdo fundamental não é, jamais, eliminado; é apenas incorporado a uma estrutura mais geral.

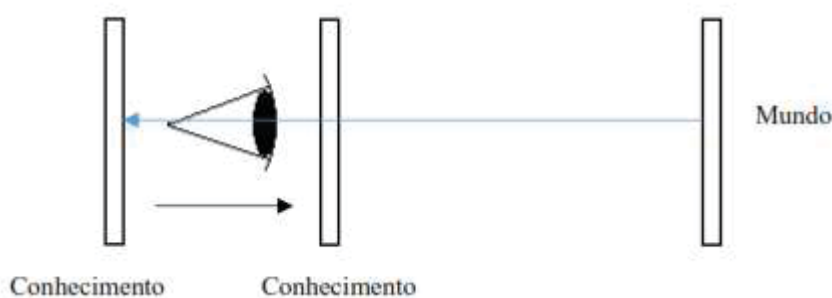
(34) *O estatuto dos inobserváveis. As entidades inobserváveis postuladas por teorias científicas que foram confirmadas podem ser consideradas ao menos aproximadamente verdadeiras.* A grande polêmica sobre o estatuto dos inobserváveis nas teorias científicas depende do estatuto da teoria científica considerada. Se a teoria foi confirmada, as entidades inobserváveis postuladas pela teoria podem ser consideradas verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras. Se a teoria não foi confirmada, o estatuto dos observáveis deve ser considerado como meramente *possível*. Pode ou não ser verdadeiro. Portanto, tanto realistas quanto instrumentalistas estão certos e errados ao mesmo tempo. Os realistas estão certos quando defendem que há muitas teorias que postulam entidades inobserváveis que são verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras; os instrumentalistas estão certos quando defendem que há muitas teorias que postulam entidades inobserváveis que são arbitrárias, e não há qualquer forma aparente de sustentar a sua existência. Mas ambos estão errados quando não admitem a hipótese contrária a que defendem. De todo modo, as entidades inobserváveis postuladas por teorias confirmadas são ao menos aproximadamente verdadeiras; e das teorias não

confirmadas são meramente *possíveis*, e não há outra alternativa a não ser esperar os testes ao longo do tempo.

(35) *A estrutura cognitiva completa. Na estrutura cognitiva humana, as categorias do conhecimento, as teorias científicas e os sistemas metafísicos trabalham em conjunto.* Ao longo dos 34 parágrafos anteriores foi exposto o processo de construção e organização do conhecimento humano. Todo conhecimento é construído por indução. Também as categorias da percepção e do entendimento são construídas por indução. Essas categorias não são fixas e imutáveis, mas vão se tornando cada vez mais abstratas e gerais por meio de novas induções. Mesmo quando os conhecimentos atingem os seus limites, pelo princípio da não-passividade da mente, sistemas explicativos são construídos com o auxílio da intuição e imaginação e se tornam, também, lentes pelas quais enxergamos o mundo. Portanto, a estrutura cognitiva humana é formada por categorias de diferentes níveis de generalidade, e pelos sistemas explicativos também com diferentes níveis de generalidade. Quando reduzimos tudo o que há em, basicamente, “coisas” e “pensamento”, estamos enxergando o mundo por meio dessas categorias formadas por indução. O mesmo poderíamos dizer sobre a redução de tudo em “matéria” e “energia”. São categorias construídas por indução. Os sistemas explicativos, por sua vez, são elaborados a partir dessas categorias mais gerais do conhecimento, o primeiro deles sendo *os sistemas explicativos científicos*, ou as “teorias científicas”, e posteriormente, num nível maior de generalidade, *os sistemas explicativos metafísicos*. Tem-se, portanto, uma estrutura cognitiva completa constituída para abordar o mundo. O esquema abaixo procura ilustrar a construção dessa estrutura completa.



Inicialmente, os estímulos sensoriais provenientes do mundo levam a construção dos primeiros conhecimentos que se tornam categorias pelas quais a nossa percepção é moldada, organizada e filtrada.



À medida que vão sendo construídos, os conhecimentos se tornam categorias sucessivamente mais abstratas, e quando atingem o grau máximo de generalidade, inicia-se a construção de hipóteses imaginativas que também vão ampliando gradativamente em seus graus de generalidade. Dessas hipóteses surgem *sistemas explicativos*.

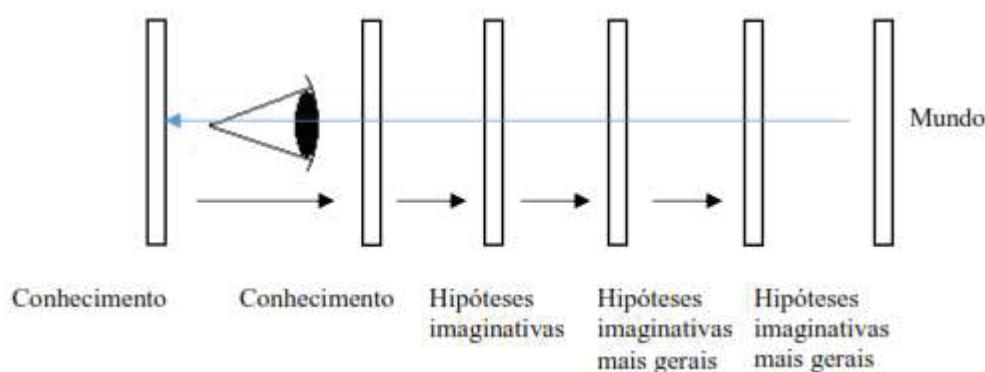


Figura 113 – Construção da estrutura cognitiva. Fonte: o autor.

Conforme os conhecimentos são construídos e alterados eles podem alterar em variados graus as categorias da percepção, e da mesma forma promoverão a alteração dos sistemas explicativos imaginativos que são construídos a partir deles, alterando, ainda mais, a nossa percepção do mundo, ou a nossa *experiência*.

(36) *As revoluções científicas. As revoluções científicas são, com efeito, revoluções do entendimento.* Do que foi exposto no parágrafo anterior se percebe mais claramente que as “revoluções científicas” percebidas por Thomas Kuhn na história da ciência são, mais exatamente falando, revoluções do entendimento, ou melhor, *revoluções epistemológicas*. A percepção da história da ciência de que há revoluções, revoluções tão profundas que sugerem até mesmo a alteração da percepção, não implicam no rompimento com a ideia que não há continuidade na construção conhecimento, mas tão somente que essa continuidade não é tão linear quanto inicialmente se imaginou. Por isso, diferentemente do que Kuhn defendeu, há uma continuidade da construção do conhecimento mesmo diante da suposta ruptura

promovida por essas revoluções. A revolução é alimentada pelo acúmulo de novos conhecimentos que se reestruturam por indução, chegando ao ponto de alterar as categorias do conhecimento já estabelecidas. Essas novas categorias são mais exatas que as anteriores, levando à revisão dos conhecimentos já previamente estabelecidos e à construção de outros conhecimentos mais refinados. Da mesma forma, essas novas categorias e conhecimentos levam à uma pressão sobre os sistemas explicativos já construídos que, uma vez que são compartilhados coletivamente, sofrerão resistência a alteração até um certo limite. Portanto, a ocorrência dessas revoluções não implica na ausência de continuidade na construção do conhecimento ao longo do tempo, da mesma forma não implica que não há um método que subjaz à ciência, e nem coloca em xeque a racionalidade do conhecimento científico ou do conhecimento de forma geral.

Acredito que a síntese oferecida nos 36 parágrafos precedentes é útil para revelar como várias das lições aprendidas no estudo dos *Principia* podem contribuir para a construção de uma determinada imagem da ciência. Em especial, essa síntese revela como a admissão do princípio que *a indução é condição para a possibilidade e para o estabelecimento do conhecimento* pode levar a uma ampla compreensão sobre a estrutura, funcionamento e racionalidade da ciência. Uma imagem que lança luz a muitos problemas recorrentes da própria filosofia da ciência contemporânea. Além disso, esse princípio conduz a uma imagem que esclarece o próprio papel fundamental dos *Principia* na história do conhecimento, e no estabelecimento do programa científico atual, razão pela qual me convenci em aqui apresentá-lo. Por outro lado, a síntese oferecida nesse capítulo também antecipa de maneira proveitosa vários dos valiosos temas e problemas que emergem desse estudo, muitos dos quais já estão em desenvolvimento para trabalhos futuros. O principal desses temas é o esclarecimento e justificação *do princípio fundamental do conhecimento*, que revela como o conhecimento pode ser construído desde a sua origem, além de servir como uma possibilidade de justificação para as inferências indutivas. O segundo tema é o da linguagem, ou melhor, o problema de esclarecer como a linguagem também pode ser construída e elaborada com o auxílio desse mesmo princípio, procurando esclarecer as relações entre a linguagem e o conhecimento. O terceiro tema é o aprofundamento dos parágrafos apresentados nessa última seção, a partir dos dois primeiros temas e da sua interlocução com os debates atuais da filosofia da ciência. Por fim, o quarto tema é a relação dessas conclusões com o campo das ciências cognitivas. Com alguma sorte, talvez consiga levar adiante essa agenda de pesquisas. De todo modo, o esboço apresentado nesses parágrafos pode servir de roteiro para outros

pesquisadores que eventualmente tenham interesse, e as condições favoráveis, para aprofundar nessas teses.

CONCLUSÃO

Nesse trabalho procurei abordar o problema da racionalidade da ciência a partir de um estudo histórico dos *Principia* de Isaac Newton. Mais exatamente, seguindo uma sugestão de Larry Laudan, ingressei num estudo histórico do *método* dos *Principia* de Newton, o que propiciou uma análise desse método tanto do ponto de vista histórico quanto do ponto de vista da filosofia da ciência. As conclusões decorrentes dessa investigação tiveram repercussão inequívoca para os problemas desse campo, e em especial para o problema da racionalidade científica. Vejamos as principais conclusões aqui alcançadas.

Da caracterização do método dos *Principia* de Newton *do ponto de vista histórico* (realizada no volume I) concluí que o matemático inglês criou um novo programa de investigação da natureza pela articulação de três tradições de pesquisa relativamente independentes: a filosofia natural aristotélica (a parte de lógica e método, em especial o método da análise e síntese), a filosofia experimental dos ingleses, e as ciências matemáticas, que trabalhavam com propriedades empírico-matemáticas dos fenômenos. Basicamente, Newton partiu das propriedades empírico-matemáticas e as incorporou no método da análise e síntese para determinar a causa próxima dos fenômenos investigados, e assim avançar gradualmente para causas mais gerais com o auxílio da matemática, sem a necessidade de recorrer a especulações filosóficas sobre as causas. Ele desenvolveu um programa de investigação da natureza capaz de determinar causas ocultas de fenômenos naturais, satisfazendo rigorosamente os princípios empíricos da filosofia experimental, com o auxílio da matemática. Uma abordagem que chamei, convenientemente, de um programa de uma “ciência empírico-matemática”. Além disso, também concluí que tal programa se tratava de uma abordagem inédita, não havendo qualquer paralelo semelhante entre os seus antecessores e contemporâneos.

Mas a partir dessa caracterização histórica do método de Newton, no presente volume se buscou fazer uma análise do método dos *Principia do ponto de vista da filosofia da ciência*. Dessa perspectiva, concluí que a tradição coheniana errou o alvo na sua caracterização do método de Newton. Esse método não pode ser adequadamente caracterizado reduzindo-o ao uso de *modelos matemáticos*, ou pelo seu suposto procedimento por meio de aproximações sucessivas a partir de um modelo inicial idealizado. Da mesma forma, limitar-se a defender apenas que o método de Newton é um procedimento que não é hipotético-dedutivo, ou que é mais rico que o método hipotético-dedutivo padrão, não faz justiça ao rigor e a amplitude do que representa o programa metodológico newtoniano como um todo. Com

efeito, a proposta de Newton pode ser considerada como um legítimo programa *confirmacionista*. Um programa que elimina as hipóteses alternativas com o auxílio da matemática. Como se mostrou, as leis empírico-matemáticas determinadas não são *idealizações matemáticas*; elas podem ser consideradas verdadeiras, ou aproximadamente verdadeiras, e servem de restrição para as hipóteses possíveis. Uma hipótese só pode ser considerada *confirmada* quando resta somente uma única possibilidade. A partir da confirmação de uma hipótese, pode-se avançar para hipóteses mais gerais com as mesmas ferramentas matemáticas, e assim fazer o conhecimento prosseguir gradativamente em direção às causas mais gerais da natureza. Não se cuida aqui nem de “aproximações sucessivas”, nem do uso mais sofisticado do método hipotético-dedutivo. Trata-se de um programa que promove genuínas confirmações. Newton usa um método H-D modificado, no qual todo um conjunto de hipóteses possíveis para a causa próxima dos fenômenos é explorado e desenvolvido matematicamente, e as hipóteses são eliminadas a partir de leis empírico-matemática já predeterminadas, restando ao final apenas *uma*, que pode ser considerada suficientemente confirmada. O que aqui se defendeu é que o elemento central do programa de Newton não são os *modelos matemáticos*, mas as *leis empírico-matemáticas*, e como elas são usadas. Os modelos são apenas um subproduto do estabelecimento dessas leis.

A caracterização do programa de Newton resumida acima nos levou a uma etapa posterior, na qual passei a analisar os fundamentos da racionalidade desse programa. Em primeiro lugar, concluí que tal programa realmente é capaz de produzir genuínas e suficientes confirmações qualitativas, por convergência indutiva. Partindo da análise da epistemologia dos *Principia* realizada no primeiro volume, e mais algumas análises adicionais no presente, foi possível concluir que (1) todo conhecimento empírico é, em última instância, fundado na indução, e pode ser considerado verdadeiro ou aproximadamente verdadeiro. (2) Não é possível falsear um conhecimento estabelecido por indução, apenas torná-lo mais exato pelo aumento do campo da experiência. Em outras palavras, proposições indutivas não são *falseadas*, são apenas *reformuladas* por induções mais amplas. (3) Das duas premissas anteriores se segue que é perfeitamente realizável a eliminação de hipóteses possíveis para a causa de um fenômeno, usando para isso uma base empírica de proposições estabelecidas por indução. (4) O processo de eliminação de hipóteses pode ser reduzido à confirmação por “convergência”, e a própria convergência pode ser reduzida ulteriormente à indução. Possuindo as hipóteses possíveis um quadro extensivo de propriedades (incluindo causas e efeitos), construídas por indução, cuja combinação é única para cada fenômeno, a observação de um número específico de propriedades do fenômeno considerado permite estabelecer

suficientemente qual é a hipótese atual, por convergência. Esse procedimento por convergência é, por sua vez, também fundado na indução, posto que nunca são observadas exaustivamente *todas* as propriedades combinadas dos fenômenos considerados. Portanto, da análise dos fundamentos da racionalidade do programa de Newton concluí, em primeiro lugar, que é possível obter genuínas confirmações qualitativas por meio da convergência indutiva. Essas confirmações são suficientes para estabelecer um conhecimento, pois satisfazem o critério para estabelecer qualquer conhecimento empírico, que é a indução.

Mas dessa análise dos fundamentos da racionalidade do programa de Newton, também concluí, em segundo lugar, que essa confirmação por convergência se estende até fenômenos naturais em que temos um acesso empírico bastante restrito. Não é difícil observar que quando temos fenômenos naturais cujas causas estão muito distantes da nossa experiência imediata sensível, (como é o caso dos fenômenos estudados nos *Principia*, e também em geral na ciência) o processo de confirmação descrito no parágrafo anterior pode encontrar dificuldades em ser realizado. Nesse caso, entra em cena o restante da estrutura do programa da ciência empírico-matemática dos *Principia*, a saber: (1) a fragmentação das causas numa cadeia causal que vai da causa próxima à causa final, e a investigação gradativa das causas dos fenômenos por meio da causa próxima, ascendendo gradualmente até a causa mais geral; (2) o uso de propriedades e leis empírico-matemáticas dos fenômenos para realizar o processo de eliminação de hipóteses, em fenômenos de acesso empírico mais restrito; (3) o uso das conclusões e resultados obtidos na determinação da causa próxima para a determinação da causa próxima mais geral, efetuando, assim, a ascensão das causas. Portanto, é possível também confirmar hipóteses causais até de fenômenos muito distantes da nossa experiência imediata. Pela análise dos fundamentos da racionalidade do programa dos *Principia* percebemos que tais confirmações qualitativas podem ser obtidas satisfatoriamente por convergência indutiva.

Esclarecidas as conclusões obtidas acerca do programa dos *Principia* e os fundamentos da sua racionalidade, convém agora resumir algumas implicações históricas e filosóficas de relevância que foram desenvolvidas ao longo desse volume. Começamos com as implicações históricas. Em primeiro lugar, as conclusões precedentes conduziram a uma releitura do legado histórico dos *Principia* nos séculos seguintes à sua publicação. Analisando a história da ciência empírico-matemática dos séculos XVIII ao XX a partir da caracterização precisa fornecida do programa dos *Principia*, concluí que a estrutura básica desse programa foi, de fato, incorporada na ciência posterior, mantendo-se em operação até os dias atuais. Essa incorporação gerou a assim chamada “segunda revolução científica”, depois dos meados

do séc. XIX, que levou à caracterização da abordagem dos *Principia* como o programa da *física teórica*, em contraste com as abordagens da *física experimental* e da *matemática*. A “revolução newtoniana”, assim referida por Cohen, portanto, aqui foi considerada como a revolução que deu origem à *física teórica*. Em segundo lugar, essa incorporação da estrutura dos *Principia* pela ciência posterior consolidou o fortalecimento e estabelecimento do próprio programa da *ciência empírica*, que abriu a porta para o surgimento de outras disciplinas como a Química, as ciências da vida, a geologia, e a própria nomenclatura de “ciências naturais”, em oposição à antiga filosofia natural. Portanto, o novo programa das ciências naturais, que foi nomeado na segunda metade do séc. XIX, pode ser considerado como uma espécie de ciência baconiana-newtoniana, que se tornou dominante nos séculos que se seguiram à publicação dos *Principia*.

Em terceiro lugar – por fim – do esclarecimento dos fundamentos do programa dos *Principia* é possível concluir que a própria revolução que deu origem à *física moderna* não foi decorrente de uma ruptura com esse programa metodológico de Newton, antes, foi o seu efeito. Como a base empírica desse programa é *indutiva*, ela pode ser tornada mais exata com o aumento do campo da experiência ao longo do tempo. E foi exatamente isso que ocorreu no fim do séc. XIX, com a ascensão dos campos do eletromagnetismo e óptica. Com o aumento expressivo dos dados e conhecimentos nesses campos, houve uma natural reformulação na base empírica da mecânica, gerando uma grande transformação de onde emergiram a teoria da relatividade e a teoria quântica. Todavia, insisto, isso não implica em ruptura com o programa de investigação da física teórica dos *Principia*, mas apenas uma reformulação já prevista pelos próprios critérios desse programa.

Em suma, o programa da física teórica que teve início nos *Principia* persiste até hoje. É um programa confirmacionista, que avança gradualmente para as causas mais gerais pelo uso de leis empírico-matemáticas, numa abordagem teórica. Esse programa abriu a porta para outros programas de ciência empírica que surgiram depois, delineando o campo das ciências naturais.

Além das implicações históricas referidas acima, podemos também mencionar as implicações filosóficas, ou mais exatamente, algumas implicações para o campo da filosofia da ciência e seus problemas, em especial o problema da racionalidade científica. A primeira implicação das análises previamente mencionadas – talvez a principal – é o resgate da indução como fundamento da ciência. Uma das principais conclusões desse trabalho é que a ciência, e o conhecimento em geral, são fundados, em última análise, na indução. E isso foi apresentado nesse volume praticamente como um *fato*. Uma coisa é a compreensão que todo

conhecimento é fundado na indução; outra coisa é a explicação da racionalidade da própria indução. Não se deve confundir esses dois domínios. É possível compreender e defender que o conhecimento seja fundado na indução sem que se precise explicar, de imediato, a racionalidade da própria indução. Na verdade, se alguém aceita – como foi feito nesse trabalho – que a indução é a própria *condição de possibilidade do conhecimento*, a consequência natural é que ela não pode ser justificada pela experiência. E não há nada de extraordinário nisso. Isso não descarta que ela possa ser o fundamento do conhecimento, e que possa ter uma racionalidade inerente. Além disso, essa suposta racionalidade da indução pode ser avaliada indiretamente pelas consequências de se assumir essa hipótese, ou seja, pelas respostas que oferece a problemas persistentes na filosofia da ciência. E as respostas que essa hipótese ofereceu são inegavelmente relevantes. Vale a pena sumarizar abaixo pelo menos *seis respostas* oferecidas por essa tese a problemas de destaque na filosofia da ciência.

Em primeiro lugar, a assunção da indução com fundamento do conhecimento oferece uma resposta satisfatória para o problema da distinção entre conhecimento empírico e teórico, o conhecido *problema do impregnacionismo teórico*. A partir da tese aqui assumida, não há impregnação de teoria; há impregnação de indução. Mas isso não é problema porque a própria base empírica da ciência é indutiva. Em segundo lugar, e consequentemente, a assunção da indução como fundamento do conhecimento oferece resposta ao *problema da base empírica da ciência*. Torna-se possível defender uma base empírica intersubjetiva e consensual, sem ter que recorrer a algum tipo de convencionalismo. Em terceiro lugar, a assunção da indução como fundamento do conhecimento oferece resposta ao *problema dos experimentos cruciais*, que passam a ser perfeitamente possíveis de serem realizados, revelando os fundamentos do seu uso corrente na prática científica. Em quarto lugar, a assunção da indução como fundamento do conhecimento oferece resposta ao *problema da confirmação*. É possível a confirmação qualitativa, e isso é realizado pela satisfação indireta do critério indutivo, por convergência. Mais uma vez, essa proposta de compreensão dos fundamentos da ciência se alinha com a prática observada na história da ciência. Em quinto lugar, a assunção da indução como fundamento do conhecimento oferece resposta ao *problema do estatuto epistemológico das teorias científicas*, que podem ser consideradas ao menos aproximadamente verdadeiras. Com uma teoria de confirmação coerente é possível estabelecer que as teorias científicas são aproximadamente verdadeiras. Em quinto lugar, a assunção da indução como fundamento do conhecimento oferece resposta ao *problema das descrições históricas da ciência*, que revelam um aparente dogmatismo das comunidades científicas, e também a aparente ocorrência de múltiplas rupturas revolucionárias, que colocam em xeque tanto a continuidade do

conhecimento como a sua própria racionalidade. Isso tudo se torna mera consequência da base empírica ser indutiva, e não afeta de modo algum o crescimento cumulativo e gradual da ciência. E, por fim, a assunção da indução como fundamento do conhecimento oferece resposta ao próprio *problema da racionalidade da ciência*. É possível reconstruir a racionalidade da ciência a partir dessa base empírica da indução. Portanto, a partir das respostas acima esboçadas temos pistas importantes sobre a possibilidade de haver na indução uma racionalidade intrínseca a ser revelada.

Não é difícil perceber que as conclusões resumidas acima rompem com várias imagens tradicionais da ciência. Para encerrar esse trabalho valerá a pena deixar claro alguns desses rompimentos. Em primeiro lugar, as conclusões acima levam a uma imagem de ciência *positiva*, ou seja, empírica, racional, contínua e progressiva, porém sem incorrer nas dificuldades já conhecidas dos positivistas históricos. É possível sustentar um conhecimento fundado na experiência sensível sem que para isso se precise admitir uma concepção puramente sintática das teorias, baseadas na análise lógica da linguagem, e numa base empírica imutável. Segundo a imagem de ciência que emerge desse estudo, os positivistas estavam quase sempre certos em suas intuições sobre o conhecimento, embora quase sempre errados em sua maneira de descrevê-lo. A indução pode ser aceita como válida, mas é um processo cognitivo que conduz a conhecimentos aproximadamente verdadeiros. Os conhecimentos empíricos têm, de fato, primazia sobre as especulações filosóficas e metafísicas, mas estas têm um papel subsidiário importante na construção daqueles conhecimentos, portanto, não podem ser eliminadas. E a ciência não é um simples acúmulo linear de conhecimentos que podem ser traduzidos de modo simples pela lógica clássica e a linguagem, mas ainda assim é progressiva e possui um método discernível. A imagem de ciência que surge desse trabalho é de uma ciência *positiva*, mas não *positivista*.

Em segundo lugar, as conclusões sobre a racionalidade científica obtidas nesse trabalho levam a uma imagem de ciência que rompe com o quase-irracionalismo da popularizada visão kuhniana, sem romper necessariamente com as suas descrições históricas da ciência. De fato, há mudanças dramáticas na história da ciência. Mas essas mudanças, longe de revelarem uma ameaça para a racionalidade, são a sua fonte. Os períodos de mudanças dramáticas da história da ciência, as mudanças de Gestalt, os períodos que Kuhn chama de ciência normal e revolucionária, até um o dogmatismo e resistência da ciência por mudanças, são consequências naturais do princípio que todo conhecimento é construído por indução. A indução forma categorias cada vez mais abstratas para a percepção que podem ser reformuladas por novas induções. Mas as alterações dessas categorias têm por base os

estímulos provenientes do mundo. E isso significa que, em última análise, por trás de todo esse comportamento aparentemente caótico da ciência há um fio condutor da sua racionalidade. Esse fio condutor é a indução. A imagem de ciência que surge desse trabalho, portanto, não rompe com as descrições históricas da ciência, mas rompe as interpretações irracionais dessas descrições.

E em terceiro lugar, as conclusões sobre racionalidade científica retiradas desse trabalho apresentam uma imagem de ciência basicamente *realista*, mas sem incorrer nos problemas normalmente enfrentados pelo realismo científico. As interpretações realistas da ciência admitem que as teorias são verdadeiras ou aproximadamente verdadeiras, ainda que não se consiga esclarecer porquê. Outras noções intuitivas também têm espaço entre os realistas, como, por exemplo, que há algum tipo de confirmação para a aceitação das teorias científicas, que as últimas teorias englobam as anteriores, que os inobserváveis dessas teorias têm referência no mundo, e assim por diante. O problema, como vimos, é que a fonte principal dessas teses não são argumentos bem estabelecidos, mas a intuição. No fundo, como sustenta Laudan, o principal argumento de sustentação do realismo é, ainda, o “argumento do milagre”. Se as teorias científicas não são ao menos aproximadamente verdadeiras, então o sucesso da ciência é um milagre. Uma vez que não é razoável supor que o sucesso da ciência seja fruto de um milagre, então as teorias científicas são ao menos aproximadamente verdadeiras. Todavia, acredito que uma das principais contribuições da imagem de ciência e racionalidade que surge do presente estudo é que ele conduz a um esclarecimento de como e porque podemos falar genuinamente de confirmação de teorias científicas, e como e porque essas teorias confirmadas podem ser consideradas aproximadamente verdadeiras. Uma das principais contribuições da imagem de ciência que emerge desse trabalho é que é possível defender que a ciência é realista sem que seja necessário apelar para qualquer versão do argumento do milagre ou para a intuição. Das conclusões desse estudo surge uma imagem de ciência que é basicamente indutivista, confirmacionista, progressiva e realista. Surge a imagem de uma ciência que é, basicamente, racional.

Para encerrar esse texto conclusivo gostaria de mencionar brevemente o que considero ser alguns limites desse trabalho. Em primeiro lugar, cabe enfatizar ao leitor que não aprofundei tanto quanto gostaria nas investigações históricas da ciência do séc. XVIII a XX, baseando-me, predominantemente, em bibliografia secundária. Trata-se de um período longo demais para que o aprofundamento dessas investigações atingisse um nível ideal. Fiz apenas uma primeira avaliação desse período histórico à luz do programa dos *Principia* aqui caracterizado. Acredito que certamente se torna necessário o aprofundamento dessa avaliação

a partir das fontes históricas primárias, procurando pontos de convergência e divergência. Em segundo lugar, também cabe enfatizar as limitações desse trabalho em relação às traduções dos argumentos dos *Principia* e da sua epistemologia confirmacionista em uma linguagem simbólica no capítulo 18. Tais traduções não possuíam a pretensão de seguir o rigor de um formalismo lógico, até porque se vislumbra que a lógica clássica não é capaz de dar conta dessas traduções. O passo adicional nesse sentido seria uma formulação de uma lógica que seja capaz de lidar com as premissas aproximadamente verdadeiras e reformuláveis, como se tentou ilustrar naquele capítulo. Mas aqui reconheço que não possuo o conhecimento técnico específico para a tentativa de tal formulação, o que deixo ao encargo de especialistas. Em terceiro lugar, reconheço que as relações da proposta aqui apresentada com os clássicos da filosofia da ciência não foi feita a contento. Para não estender demais esse trabalho, limitei-me a relações superficiais e pontuais. Fica igualmente encaminhado para trabalhos futuros aprofundar e contrastar as teses aqui defendidas com outros autores e concepções da filosofia da ciência. Por fim, reconheço que, embora a racionalidade da ciência aqui proposta seja explicada a partir da indução, fica em aberto a explicação da racionalidade da própria indução. Mas insisto que é possível defender que o fundamento indutivo da ciência, e que há bases para acreditar no progresso do conhecimento *a partir* da indução.

Não obstante as limitações do presente trabalho, espero que tenha ficado estabelecido as duas *Principias* teses aqui defendidas: primeiro, que Newton criou o programa da física teórica, que impulsionou as grandes transformações da ciência no século XIX que levaram ao surgimento do próprio programa ciência empírica natural que temos hoje; e, segundo, que esse programa é capaz de fornecer genuínas e suficientes confirmações qualitativas, que iluminam problemas persistentes da filosofia da ciência, permitindo compreender porque as teorias científicas podem ser consideradas pelo menos aproximadamente verdadeiras. Essas duas teses são suficientes para esclarecer que o tratado de Newton não foi apenas um dos mais significativos tratados científicos da história. Ele consolidou a grande revolução que atravessou os séculos XVI e XVII na Europa moderna. Ele deu fim a essa revolução, estabelecendo um novo modo de investigar a natureza que seguimos até hoje. Ele mostrou como as múltiplas e desorganizadas abordagens distintas de investigação da natureza poderiam ser articuladas em torno de um método, em torno de um programa coerente e eficiente. Como disse Lakatos, “Newton lançou o primeiro grande programa científico da história humana”, e com ele se estabeleceu “as características básicas da metodologia

científica”.⁹⁸³ O estudo detalhado desse programa certamente nos leva a uma compreensão mais profunda dos fundamentos, da estrutura e da racionalidade desse que é um dos mais bem-sucedidos empreendimentos que já fomos capazes de criar. O estudo detalhado desse programa nos leva mais perto da compreensão do que vem a ser um *conhecimento objetivo*, e a encontrar um caminho, ou ao menos uma esperança, para lidar com a “crise epistêmica” atual.

⁹⁸³ Lakatos, 1978, p.220.

REFERÊNCIAS ⁹⁸⁴

ACHINSTEIN, P. (Ed). **Science Rules: A historical introduction to scientific methods.** John Hopkins University Press, 2004.

AGASSI, J. Between Micro and Macro. **Brit. J. Phil. Sci.** 14, 1963.

ANSTEY, P. R. Experimental versus Especulative Natural Philosophy. In: ANSTEY, P. R.; SCHUSTER J.A. (Eds); **The Science of Nature in the Seventeenth Century: Patterns of Change in Early Modern Natural Philosophy.** Studies in History and Philosophy of Science, vol. 19. Springer, 2005. p.215-242.

ANSTEY, P. R.; SCHUSTER J.A. (Eds); **The Science of Nature in the Seventeenth Century: Patterns of Change in Early Modern Natural Philosophy.** Studies in History and Philosophy of Science, vol. 19. Springer, 2005.

AQUINAS, T. **Basic Writings of St. Thomas Aquinas.** A.C. Pegis (trans.), New York: Random House, 1945.

ARISTOTLE. *Analytica Posteriora*. In: MCKEON, R. **The Basic Works of Aristotle.** Edited by Richard McKeon. The modern library. New York, 1941.

ARISTOTLE. *Mechanical Problems*. In: HETT, W.S. **Aristotle Minor Works.** With an English translation by W.S. Hett, MA. Cambridge, Massachusetts. Harvard University Press. Willian Heinemann, London, 1955.p.329-411.

ARISTOTLE. **Metaphysics: Books M and N.** Trad. Julias Annas. Claredon Press. Oxford, 1976

ARISTOTLE. **Physics: Book I and II.** Trad. Willian Charlton. Claredon Press. Oxford, 1970

ARISTOTLE. **Physics: Books III and IV.** Translated with Introduction and Notes by Edward Hussey. Claredon Press. Oxford, 1993.

ARISTÓTELES. **Do céu.** Tradução do grego e notas de Edson Bini. São Paulo: Edipro, 2014.

ARISTÓTELES. **Física I-II.** Prefácio, introdução, tradução e comentários de Lucas Angioni. Editora Unicamp, 2009.

⁹⁸⁴ Referência geral dos dois volumes.

ARCHIMEDES. On floating bodies. In: HEATH, T. L. **The Works of Archimedes**. Edited in Modern Notation with Introductory Chapters by Thomas L. Heath. Cambridge University Press, 1897a. p.253-300.

ARCHIMEDES. On the equilibrium of planes or the centres of gravity of planes. In: HEATH, T. L. **The Works of Archimedes**. Edited in Modern Notation with Introductory Chapters by Thomas L. Heath. Cambridge University Press, 1897b. p.189-220.

ARCHIMEDES. The sand-reckoner. In: HEATH, T. L. **The Works of Archimedes**. Edited in Modern Notation with Introductory Chapters by Thomas L. Heath. Cambridge University Press, 1897c. p.221-232.

ARNAULD, A; P. NICOLE (1696). **Logic: Or, the art of thinking**. Containing, besides comum rules, several new observations appropriate for forming judgement. Translated and edited by Jill Vance Buroker. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

ARTHUR, R. T. W. Newton's Fluxions and Equally Flowing Time. **Studies in History and Philosophy of Science**. Vol. 26, 1995. p. 323–351.

AYER, A. J (ed). **Logical Positivism**. The Free Press. New York. 1959.

BACON, F. **The new organon and related writings**. Edited with an introduction by Fulton H. Anderson. Indianapolis, New York: The Bobbs-Merrill Company, 1960.

BACON, F. **The Philosophical Works of Francis Bacon**. Reprinted from the texts and translations, with the notes and prefaces of Ellis and Spedding. Edited with an introduction by John M. Robertson. Routledge Revival, New York, 2011.

BACON, F. **Novum Organum**. Tradução e notas: José Aluysio Reis de Andrade. Acrópolis. Fonte Digital: O Dialético www.odialetico.hpg.com.br. 2002.

BACON, R. **The Opus Majus**. Trad. R.B. Burke. New York: Russel & Russel. 1962.

BARNES, E. C. Prediction versus Accommodation. **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**, 2021. Disponível em <http://plato.stanford.edu/archives/fall2021/accommodation/>

BARRA, E. S. O. A primazia das relações sobre as essências: as forças como entidades matemáticas nos *Principia* de Newton. **Scientiæ Studia**, v. 8, n. 4. São Paulo, 2010. p. 547-569.

BARRA, E. S. O.; SANTOS, R. B. Duhem's Analysis of Newtonian Method and the Logical Priority of Physics over Methaphysics. **Transversal: International Journal for the Historiography of Science**. No.2. Dossier Pierre Duhem. 2017.

BARRA, E. S. O. Em que sentido Newton pode dizer 'hypothesis non fingo'? **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, CLE/UNICAMP - Campinas - SP, vol. 5, n. 1/2, 1995. p. 221-245.

BARROW, I. **The Geometrical Lectures of Isaac Barrow**: Translated, with Notes and Proofs, and a Discussion on the Advance Made Therein of the Work of his Predecessors in the Infinitesimal Calculus by James M. Child. London: Open Court, 1916.

BARROW, I. **The Mathematical Works of Isaac Barrow**. Edited by William Whewell. Cambridge: Cambridge University Press, 1860.

BARROW, I. **The Usefulness of Mathematical Learning Explained and Demonstrated**: Being Mathematical Lectures Read in the Publick Schools at the University of Cambridge. Translated by John Kirkby. London: for Stephen Austen, 1734.

BECHLER, Z. (eds) **Contemporary Newtonian Research**. Studies in the History of Modern Science, vol 9. Springer, Dordrecht, 1982

BECHLER, Z. Introduction: Some Issues of Newtonian Historiography. In: BECHLER, Z. (eds) **Contemporary Newtonian Research**. Studies in the History of Modern Science, vol 9. Springer, Dordrecht, 1982. P.1-20.

BÉLLIS, A. Harmonics. (Trad. Emoretta Yang and Catherine Porter). In: BRUNSCHWIG, J; LLOYD, G. E. R. (Ed.). **Greek Thought: a guide to classical Knowledge**. Translation under direction of Catherine Porter. The Belknap Press of Harvard University Press. London, England, 2000. p.312-327.

BELLONE, E. **A World on Paper: Studies on the Second Scientific Revolution**. Transl. Mirella e Riccardo Giacconi. Cambridge, MA and London: MIT Press, 1980.

BESANT, W. H. **Conic Sections Treated Geometrically**. Ninth edition revised and enlarged. Cambridge: Printed by J. & C. F. Clay. University Press, 1895.

BIENER, Z.; SCHLIESSER, E. (Eds). **Newton and Empiricism**. Oxford: Oxford University Press, 2014.

BLACKMORE, R. **King Arthur**. An heroick poem in twelve books. London, 1697.

BLAKE, R. M. Isaac Newton and the Hypothetical method. In: BLAKE, R. M; DUCASSE, J. C.; MADDEN, E. H.; (Eds). **Theories of Scientific Method: The Renaissance Through the Nineteenth Century**. Gordon and Breach, 1960a. p.119-143.

BLAKE, R. M; DUCASSE, J. C.; MADDEN, E. H.; (Eds). **Theories of Scientific Method: The Renaissance Through the Nineteenth Century**. Gordon and Breach, 1960b.

BOLTZMAN, L. On the development of the methods of the theoretical Physics in recent times (1899). Transl. Y Elcana. **Philosophical Forum**, n.s. 1. (1968-1969). p.97-120.

BOYLE, R. **The Works of the honorable Robert Boyle**. In six volumes to which is prefixed the life of the autor. Ed. T. Birch. A new edition. Vol 1. London, 1772.

BOYLE, R. **The Works of Robert Boyle**. Ed. M. Hunter & E.B. Davis. (14 vols). Vol.2. London, Pickering & Chato, 1999-2000.

BRACKENRIDGE, B. **The Key to Newton's Dynamics: the Kepler problem and the Principia**. Berkeley: The University of California Press, 1995.

BRUNSCHWIG, J; LLOYD, G. E. R. (Ed.). **Greek Thought: a guide to classical Knowledge**. Translation under direction of Catherine Porter. The Belknap Press of Harvard University Press. London, England, 2000.

BRUNSCHWIG, J. Epistemology. (Trad. Catherine Porter and Dominique Jouhaud). In: BRUNSCHWIG, J; LLOYD, G. E. R. (Ed.). **Greek Thought: a guide to classical Knowledge**. Translation under direction of Catherine Porter. The Belknap Press of Harvard University Press. London, England, 2000. p.72-93

BRUSH, S. G. **The Kind of Motion We Call Heat. A History of the Kinetic Theory of Gases in the 19th century**. 2 vols. Continuously paginated. Amsterdam, New York and Oxford: North Holland, 1976.

BRUSH S. G. **The History of Modern Science: A Guide to the Second Scientific Revolution, 1800-1950**. Iowa State University Press, 1988.

BUCHWALD, J. Z.; COHEN, I. B.(eds); **Isaac Newton Newton's Natural Philosophy**. Edited by Jed Z. Buchwald and I. Bernard Cohen. The MIT Press, 2001.

BUCHWALD, J.; FOX, R. (eds). **The Oxford Handbook of History of Physics**. Oxford: Oxford University Press, 2013.

BUNGE, M. **Racionalidad y realismo**. Madrid: Alianza, 1985.

BURIDAN, J. Questions on the Eight Books of the Physics of Aristotle. In: CLAGETT, M. **The Science of Mechanics in the Middle Ages**. Madison, Wis.: University of Wisconsin Press, 1959.

BUTTS, R.E.; PITT, J.C. (Eds). **New Perspectives on Galileo: Papers Deriving from and Related to a Workshop on Galileo held at Virginia Polytechnic Institute and State University**, 1975. D. Reidel Publishing Company. Boston, 1978.

CAPARRINI, S.; FRASER, C. Mechanics in the eighteenth century. In: BUCHWALD, J.; FOX, R. (eds). **The Oxford Handbook of History of Physics**. Oxford: Oxford University Press, 2013. p.358-405.

CARDONA, C.A. Neopythagoreanism in the work of Johannes Kepler. **Manuscrito**, Campinas, v.39, n.3, p.91-120, Sept.2016. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-60452016000300091&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 13 de Maio de 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-6045.2016.v39n3.cs>.

CARNAP, R. The elimination of metaphysics through logical analysis of language (1931). Trad. Arthur Pap. In: AYER, A. J (ed). **Logical Positivism**. The Free Press. New York. 1959.

CARNAP, R. **Logical Foundations of Probability**. University of Chicago Press, Chicago, 1950.

CASINI, P. Newton: The Classical Scholia. **History of Science**, Vol. 22, 1984. p. 1-58.

CENTORE, F. F. **Robert Hooke's Contributions to Mechanics: A study in seventeenth century natural philosophy**. Martinus Nijhoff. 1970.

CHANDRASEKHAR, S. **Newton's Principia for the Common Reader**. Oxford: Clarendon Press, 1995.

CHILD, J. M. Preface. In: BARROW, Isaac. **The Geometrical Lectures of Isaac Barrow: Translated, with Notes and Proofs, and a Discussion on the Advance Made Therein of the Work of his Predecessors in the Infinitesimal Calculus** by James M. Child. London: Open Court, 1916.

CLAGETT, M. **The Science of Mechanics in the Middle Ages**. Madison, Wis.: University of Wisconsin Press, 1959.

COHEN, H. F. A Historical-Analytical Framework for the Controversies over Galileo's Conception of Motion. In: PALMERINO, C.R.; THIJSSSEN, J.M.M.H (Ed.). **The reception of Galilean Science of Motion in Seventeenth Century Europe**. Kluwer Academic Publishers, 2004. p.83-98.

COHEN, I. B. **A Guide to Newton's Principia**. In: NEWTON, I. *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*, translated by I. Bernard Cohen and Anne

Whitman, assisted by Julia Budenz, pp. 1–370. Berkeley: University of California Press, 1999.

COHEN, I. B. Hypothesis in Newton's Philosophy. **Physics**, 8, 1966. p.163-184.

COHEN, I. B. **The Birth of new Physics**. Penguin Books. London, 1992. First Published by Heinemann Educational. Great Britain, 1961.

COHEN, I. B.; SMITH, G. M. (Eds). **The Cambridge Companion to Newton**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

COHEN, I. B. **The Newtonian Revolution**. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

COPERNICUS, N. (Kopernik). **De Revolutionibus Orbium Coelestium**. Nuremberg: Apud J. Petreium, 1543.

COPERNICUS, N. **On the revolutions**. Translation and Commentary by Edward Rosen. Johns Hopkins University Press. Baltimore and London, 1992.

CROMBIE, A.C. **Robert Grosseteste and the Origins of Experimental Science (1100-1700)**. Oxford: Claredon Press. 1953.

DABBAJ, R.H. **Quantum electric gravity**. 2012. Disponível online em <http://vixra.org/pdf/1205.0062v3.pdf>. Acesso em 24/05/2019.

DARRIGOL, O. **Electrodynamics from Ampere to Einstein**. Oxford University Press, 2000.

DEAR, P. **Discipline and Experience: The Mathematical Way in the Scientific Revolution**. Chicago: University of Chicago Press, 1995.

DE GANDT, F. **Force and Geometry in Newton's *Principia***. Princeton: Princeton University Press, 1995.

DE GANDT, F. Technology. (Trad. Selina Stewart and Jeannine Pucci). In: BRUNSCHWIG, J; LLOYD, G. E. R. (Ed.). **Greek Thought: a guide to classical Knowledge**. Translation under direction of Catherine Porter. The Belknap Press of Harvard University Press. London, England, 2000. p. 486-497.

DE LA ROCHE, M. **Memoirs of Literature**. Containing a large account of many valuable books, letters and dissertations upon several subjects, miscellaneous observations. Vol. 4. Second Edition. London, 1722.

DE PIERRIS, G.; FRIEDMAN M. **Kant and Hume on Causation**. Winter edition of Stanford Encyclopedia of Philosophy, 2018. Disponível online em <http://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/kant-hume-causality>. Último acesso em 15 de Agosto de 2021.

DESCARTES, R. **Oeuvres de Descartes**. (13 vol). Vol. III: Correspondance. Adams and P. Tannery (eds.), Paris: J. Vrin. 1976.

DESCARTES, R. **The Philosophical Writings of Descartes**. Vol. III: The Correspondence. Translated by J. Cottingham, R. Stoothoff, D. Murdoch, and A. Kenny. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

DESCARTES, R. **O Mundo ou Tratado da Luz**. Organização e tradução Érico Andrade. Editora Hedra. São Paulo, 2008.

DESCARTES, R. **Princípios da Filosofia**. Tradução João Gama. Edições 70, 1997.

DESCARTES, R. **Principles of Philosophy**: Part II, Paragraphs 24-54; Part III, Paragraphs 56-59; and Letter to Clerselier. On Motion. Transl. M. S. Mahoney, 1977, 1995. (Disponível online em <http://www.princeton.edu/~hos/Mahoney/texts/descartes/desc-mot.html>, acessado em 20 de outubro de 2015).

DESCARTES, R. **Regras para a direção do espírito**. Trad. João Gama. Edições 70. Lisboa, 1985.

DESCARTES, R. **The World and Other Writings**. Translated and Edited by Stephen Gaukroger. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

DENSMORE, D. **Newton's Principia, the Central Argument**: Translation, Notes, and Expanded Proofs. Translation and illustrations by William H. Donahue. Santa Fe, N.M.: Green Lion Press, 1995.

DOMSKI, M. The Constructible and the Intelligible in Newton's Philosophy of Geometry. **Philosophy of Science**, vol. 70, n. 5, p. 1114–1124, dez 2003.

DORLING, J. Henry Cavendish's deduction of the electrostatic inverse square law from the result of a single experiment. **Studies in History and Philosophy of Science**. Part A, 4(4), 1974, pp. 327–348.

DUCHEYNE, S. **The Main Business of Natural Philosophy**: Isaac Newton's Natural-Philosophical Methodology. Springer, 2012.

DUCHEYNE, S. Una historia editorial de las regulae philosophandi de Newton. **Estudios de filosofía**, n° 51, 2013. pp. 143-164.

DUGAS, R. **A History of Mechanics**. Transl. J. R. Maddox. Routledge & Kegan Paul LTD. London, 1957.

DUHEM, P. **The origins of statics: The Sources of Physical Theory** (1905). Translated from the French by Grant F. Leneaux, Victor N. Vagliente, and Guy H. Wagnener, with a foreword by Stanley L. Jaki. Boston Studies of Philosophy of Science, Vol 123. Springer Science+Business Media Dordrecht, 1991.

DUHEM, P. **The Aim and Structure of Physical Theory** (1906). Trad. da 2ª ed. por Philip. P. Wiener. New Jersey: Princeton University Press, 1991

DUNTON, J. **The Young-students-library**: containing extracts and abridgments of the most valuable books printed in England, and in the foreign journals, from the year sixty five, to this time: to which is added a new essay upon all sorts of learning wherein the use of the sciences is distinctly treated on. By the Athenian Society; also, a large alphabetical table, comprehending the contents of this volume, and of all the Athenian Mercuries and supplements, etc. London, 1692.

EARMAN J.; SALMON, C. W. The Confirmation of Scientific Hypotheses. In: SALMON, M. H (Ed). **Introduction to the Philosophy of Science**. Hackett Publishing Company. Indianapolis/Cambridge. 1992. Chap.2. p.42-103.

EINSTEIN, A. (1916) **A Teoria da Relatividade Especial e Geral**. Trad. Do original alemão Carlos Almeida Pereira. 5 ed. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.

EINSTEIN, A. (1920) **Ether and the Theory of Relativity**. Palestra realizada na universidade de Leiden, Holanda. Publicada por Methuen & Co. Ltd., London, 1922. (Disponível online em http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Extras/Einstein_ether.html. Último acesso em 23/05/2019).

EINSTEIN, A. (1940) Fundamentals of Theoretical Physics. In: **Ideas and Opinions**. New York: Dell, 1973. p. 315-326.

EINSTEIN, A. (1905) On the electrodynamics of moving bodies. In: EINSTEIN, A. **The collected papers of Albert Einstein**. Vol. 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909. Translated by Anna Beck. Princeton University Press, 1989. p.140-172.

EINSTEIN, A. **The collected papers of Albert Einstein**. Vol. 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909. Translated by Anna Beck. Princeton University Press, 1989.

EUCLID. **The Thirteen Books of the Elements** (3 vols). Translated from the text of Heiberg with introduction and commentary by Sir Thomas L. Heath. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1968.

EUCLIDES. **Os Elementos**. Tradução e Introdução de Irineu Bicudo. Editora Unesp. São Paulo, 2009.

EULER, L. **Mechanica sive motus scientia analytica**. (2vols). Petropoli. Ex typographia academiae scientiarum, 1736.

FALCONER, I. Charles Coulomb and the fundamental law of electrostatics. **Metrologia**, 41, 2004. S107–S114.

FALCONER, I. Editing Cavendish: Maxwell and The Electrical Researches of Henry Cavendish. **To appear in Proceedings of the International Conference on the History of Physics**. Trinity College, Cambridge, setembro 2014. Disponível em <http://arxiv.org/abs/1504.07437> [último acesso em 05/12/2020].

FALCONER, I. No actual measurement ... was required: Maxwell and Cavendish's null method for the inverse square law of electrostatics, **Studies in History and Philosophy of Science**. 2017. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.shpsa.2017.05.001>. [Último acesso em 05/12/2020].

FÉHER, M. **The method of Analysis-Syntesis and the structure of causal explanation in Newton**. International Studies In The Philosophy Of Science Vol. 1, Iss.1, 1986.

FEINGOLD, M. **Before Newton: the Life and Times of Isaac Barrow**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

FEINGOLD, M. Newton, Leibniz, and Barrow Too: An Attempt at a Reinterpretation. **Chicago Journal, History of Science Society**. Isis, Vol. 84, No. 2, Jun 1993. p. 310–338.

FELDHAY, R. The use and abuse of mathematical entities: Galileo and the Jesuits revisited. In: MACHAMER, P. K (Ed.). **The Cambridge Companion to Galileo**. Edited by Peter K. Machamer. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p.80-145.

FEYRABEND P. (1975) **Against Method**. Third Edition. Verso. London, 1993.

FEYRABEND, P. Consolations for the Specialist. In: LAKATOS, I.; MUSGRAVE, A. **Criticism and Growth of Knowledge**. Proceedings of the international colloquium in the philosophy of science, London, vol. 4, 1965. Cambridge University Press, 1970.

FISHER, N.W.; UNGURU, S. Experimental Science and Mathematics in Roger Bacon's Thought. **Traditio**, 27. 1971. p.353-378.

FRIEDMAN, M; DOMSKI, M.; & DICKSON, M (eds.). **Discourse on a New Method: Reinventing the Marriage of History and Philosophy of Science**. Open Court, 2010.

FOX, R. Laplace and the physics of short-range forces. In: BUCHWALD, J.; FOX, R. (eds). **The Oxford Handbook of History of Physics**. Oxford: Oxford University Press, 2013. p. 406-431.

FOURIER, J. J. **Théorie analytique de la chaleur**. Paris: Firmin Didot, père et fils. 1822.

GABBEY, Alan. What was “mechanical” about “mechanical philosophy”? In: PALMERINO, C.R.; THIJSEN, J.M.M.H (Eds). **The reception of Galilean Science of Motion in Seventeenth Century Europe**. Kluwer Academic Publishers, 2004. p. 11-23

GABBEY, A. Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy: A Treatise on 'Mechanics'? In: Harman, P.M., and A.E. Shapiro (Ed). **The Investigation of Difficult Things: Essays on Newton and the Exact Sciences**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. pp. 305–22.

GALILEI, G. **Diálogo sobre os dois máximos sistemas de mundo ptolomaico e copernicano**. Tradução, introdução e notas de Pablo Rubén Mariconda. Editora 34. São Paulo, 2011.

GALILEI, G. **Dialogue Concerning the Two Chief World Systems** (1632). Trad. S. Drake and Abridged by S. E. Sciortino. First Edition. Berkeley: University of California Press, 1953.

GALILEI, G. **Dialogue Concerning The Two Chief World Systems – Ptolomaic and Copernican** (1632). Translated by Stillman Drake and forward by Albert Einstein. Second Edition. University of California Press, 1967.

GALILEI, G. **Dialogue Concerning Two New Sciences**. Trad. Henry Crow e Alfonso de Salvio. Dover Publications, Inc., New York, 1914.

GALILEI, G. **Il Saggiatori**. Firenze. G. Barbèra Editore, 1864

GALILEI, G. **Sidereus Nuncius or The Sideral Messenger**. Translated with introduction, conclusion and notes by Albert Van Helder. University of Chicago Press. Chicago and London, 1989.

GALILEI, G. **Two New Sciences**. Including Centers of Gravity and force of Percussion. Second Edition. Translated, with a new Introduction and Notes, by Stillman Drake. And History of Free Fall: Aristotle to Galileo, by Stillman Drake. Wall & Emerson, Inc. Toronto, 2008.

GARRISON, J. W. Newton and the Relation of Mathematics to Natural Philosophy. **Journal of the History of Ideas**. Vol. 48, 1987. p.609–627.

GARISTO, R. An Error in Isaac Newton's Determination of Planetary Properties. **American Journal of Physics**, N. 59, 1991. p.42-48.

GAUCH, H.G. **Scientific Method in practice**. Cambridge University Press, 2003.

GILLIES, D. **Philosophy of Science in the Twentieth Century: Four Central Themes**. Blackwell. Oxford UK and Cambridge USA, 1993.

GHINS, M. **Uma introdução à metafísica da natureza**: Representação, realismo e leis científicas. Tradução de Ronei C. Mocellin e Eduardo S. O. Barra. Editora UFPR, 2013.

GLANVILL, J. **Plus Ultra**: Or, the progress and advancement of knowledge since the days of Aristotle. In and account of some of the most remarkable late improvements of practical, useful learning: to encourage philosophical endeavours. Occasined by a conference with one of the notional way. Printed for James Collins at the Kings-Head in Westminster-Hall. London, 1668.

GLYMOUR, C. Hypothetico-Deductivism Is Hopeless. **Philosophy of Science**. Vol. 47, no. 2, 1980a, p. 322–325. JSTOR, www.jstor.org/stable/187090. Accessed 29 Dec. 2020.

GLYMOUR, C. **Theory and Evidence**. Princeton: Princeton University Press, 1980b.

GOLDBERG, S. **Understanding relativity: Origin and Impact of a Scientific Revolution**. Birkhauser, Boston, 1984.

GRANT, E. **A History of Natural Philosophy: From the Antient World to Nineteenth Century.** Cambridge University Press, 2007.

GRANT, E. **The Foundations of Modern Science in the Middle Ages.** Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

GRATTAN-GUINNESS, I. (ed.). **Landmark Writings in Western Mathematics, 1640-1940.** Elsevier, 2004.

GUICCIARDINI, N. **Isaac Newton and Natural Philosophy.** Reaktion Books Ltd. London, 2018.

GUICCIARDINI, N. Mathematics and the new Sciences. In: FOX, R.; BUCHWALD, J. (Ed.). **The Oxford Handbook of History of Physics.** Oxford: Oxford University Press, 2013. p.226-264.

GUICCIARDINI, N. **Newton on Mathematical Certainty and Method.** Cambridge, MA: The MIT Press, 2009.

GUICCIARDINI, N. Reading the *Principia*: The Debate on Newton's Mathematical Methods for Natural Philosophy from 1687 to 1736. Cambridge University Press. 1999.

HANS, H.; NEURATH O.; CARNAP, R. A concepção científica do mundo: o Círculo de Viena. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência.** v.10 (1986), Série 1. UNICAMP. p.5-20.

HARPER, W. L. Acceptance and scientific method. In: HARPER, W. L. and WHEELER, G. (eds.) **Probability and Inference: Essays in Honour of Henry E. Kyburg, Jr.** London: King's College Press. 2007a. p.33-52.

HARPER, W. L. **Isaac Newton's Scientific Method: Turning Data into Evidence about Gravity and Cosmology.** Oxford University Press, 2011.

HARPER, W. L. and WHEELER, G. (eds.) **Probability and Inference: Essays in Honour of Henry E. Kyburg, Jr.** London: King's College Press. 2007.

HALL, A. R. **Philosophers at War: The Quarrel Between Newton and Leibniz.** Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

HALL, A. R. Merton revisited or science and society in seventeenth century. **History of Science**, Vol. 2, p.1. 1963.

HEATH, T. L. Introduction. In: EUCLID. **The Thirteen Books of the Elements** (3 vols). Translated from the text of Heiberg with introduction and commentary by Sir Thomas L. Heath. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1968. p. 1-151

HEATH, T. L. **The Works of Archimedes**. Edited in Modern Notation with Introductory Chapters by Thomas L. Heath. Cambridge University Press, 1897.

HEERING, P. On Coulomb's inverse square law. **American Journal of Physics** 60 (11), nov. 1992. p.988-994

HEILBRON, J. L. Electricity in the 17th and 18th centuries: a study of early modern physics. Berkeley: University of California Press. 1979.

HEILBRON, J. L (Ed). **The Oxford Companion to the History of Modern Science**. Oxford: Oxford University Press. 2003.

HELMHOLTZ, H. The aim and Progress of Physical Science. In: **Popular Lectures on Scientific Subjects**. Transl. E. Atkinson, 363-397. New York, 1873; 2nd ed. London.

HEMPEL, C. G. Studies in the logic of confirmation. **Mind**, 54, 1-26, 1945. p. 97-121.

HERIVEL, J. **The Background to Newton's Principia**: a Study of Newton Dynamical Researches in the years 1664-84. Oxford, 1965.

HETT, W.S. **Aristotle Minor Works**. With an English translation by W.S. Hett, MA. Cambridge, Massachusetts. Harvard University Press. Willian Heinemann, London, 1955.

HITTINKA e REMES. **The method of analysis: its Geometrical Origin and Its General Significance**. Boston Stidies in philosophy of science, vol. xxv. D. Reidel Publishing Company, 1974.

HOBBS, T. **De corpore (Elements of philosophy)**. London: Printed by R. & W. Leybourn, for Andres Crocke, 1656.

HOBBS, T. **The English Works of Thomas Hobbes of Malmesbury**. Edited by William Molesworth (11 vols). London: Bohn, 1839-1845. London: Routledge/Thoemmes Press, 1994.

HOFMANN, J. E. Leibniz in Paris 1672-1676: His Growth to Mathematical Maturity. Cambridge: Cambridge University Press, 1974.

HOME, D.; WHITAKER, A. *Einstein's Struggles with Quantum Theory: A Reappraisal*. Springer, 2007.

HOOKE, R. **Micrographia** and some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquiries thereupon. London, printed by So. Martyn and Sa. Allestry, printers to the *Royal Society*, 1664.

HOOKE, R. **Posthumous Works of Robert Hooke**. Containing His Cutlerian Lectures, and Other Discourses, Read at the Meetings of the Illustrious *Royal Society*. Illustrated with Sculptures. To These Discourses is Prefixt the Author's Life. Published by Richard Waller. London, 1705.

HOWELL, W.S. 1971. **Eighteenth-century British logic and rhetoric**. Princeton: Princeton University Press.

HUME, D. **Investigações sobre o Entendimento Humano**. Trad. André Campos Mesquita. Editora Escala, São Paulo. 2006.

HUME, D. **Resumo de um Tratado da Natureza Humana**. Trad. Rachel Gutiérrez e José Sotero Caio. Porto Alegre. Paraula, 1995.

HUME, D. **Tratado da natureza humana**. Trad. Déborah Danowski. Unesp. São Paulo, 2000.

HUTCHISON, Keith. What Happened to Occult Qualities in the Scientific Revolution? **Chicago Journal, History of Science Society**. *Isis*, Vol 73, No.2, Jun 1982. p. 233-253.

HUYGENS, C. (1673). **Horologium Oscillatorium**: sive, De motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae. Parisiis, 1673.

HUYGENS, C. **Oeuvres complètes de Christiaan Huygens**, 22 vols. 1888-1950.

HUYGENS, C. The Motion on Coliding Bodies. Trad. Richard Blackwell. **Isis**, vol. 68, 244, 1977. p.574-597.

HUYGENS, C. **The Pendulum Clock**: or Geometrical Demonstration concerning the Motion of a Pendula as Applied to Clocks. Ames. Transl. Richard Blackwell. The Iowa State University Press, 1986.

JARDINE, N. **The birth of History and Philosophy of Science**: Kepler's 'A Defence of Tycho against Ursus' with Essays on its Provenance and Significance. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

JESSEPH, D. M. Hobbes and the method of natural science. In: SORELL, T (Ed). **The Cambridge Companion to Hobbes**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.p.86-107

JESSEPH, D. M. **Squaring the Circle: The War Between Hobbes and Wallis**. Chicago: University of Chicago Press, 1999.

JUNGNICKEL, C.; MCCORMMACH, R. **The Second Physicist: On the History of Theoretical Physics in Germany**. Archimedes: New studies in the History and Philosophy of Science and Technology. Springer, 2017.

KANT, I. **Crítica da Razão Pura**. Trad. Valerio RoH-Den e Udo Baldur Moosburger. Nova Cultural. São Paulo, 1999.

KANT, I. **Metaphysical Foundations of Natural Science**. Translated and edited by Michael Friedman. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

KANT, I. **Prolegômenos a toda a metafísica futura que queira apresentar-se como ciência**. Trad. Artur Morão. Edições 70. Lisboa, 2008.

KARGON, R. H. The testimony of nature: Boyle, Hooke and the Experimental Philosophy. **Albion: A Quarterly Journal Concerned with British Studies**, Vol. 3, No. 2, summer, 1971. p. 72-81

KEPLER, J. **Astronomia Nova**. Translated by William H. Donahue. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

KITCHER, P. Explanatory Unification and the Causal Structure of the World. In: KITCHER, P.; SALMON, C. W. (eds). **Scientific Explanation**. Series: Minnesota Studies in the Philosophy of Science 13. University of Minnesota Press, 1989. p.410-505.

KITCHER, P.; SALMON, C. W. (eds). **Scientific Explanation**. Series: Minnesota Studies in the Philosophy of Science 13. University of Minnesota Press, 1989.

KOYRÉ, A. **Do mundo fechado ao universo infinito**. Trad. Donaldson M. Garschagen Forense Universitária, 2006. Publicado originalmente pela John Hopkins University Press, 1957.

KOYRÉ, A. **Newtonian Studies**. Chapman & Hall. London, 1965.

KUHN, T. S. **A Estrutura das Revoluções Científicas** (1962). Trad. Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. 5ª Edição. Editora Perspectiva, 1998.

KUHN, T. **A tensão essencial** (1977). Trad. Marcelo Amaral Penna-Forte. São Paula: Editora Unesp, 2011.

LAKATOS, I. Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes. In: LAKATOS, I.; MUSGRAVE, A. **Criticism and Growth of Knowledge**. Proceedings of the international colloquium in the philosophy of science, London, vol. 4, 1965. Cambridge University Press, 1970. p.91-196.

LAKATOS, I. The Methodology of Scientific Research Programmes. Philosophical Papers, v.1. Edited by John Worrall and Gregory Currie. Cambridge University Press. 1978.

LAUDAN, L. A Confutation of Convergent Realism. **Philosophy of Science**. v.48, n.1, mar, 1981a. p. 19-49.

LAUDAN, L. **Beyond Positivism and Relativism**. Boulder, CO, Westview Press, 1996.

LAUDAN, L. **Science and Hypothesis**. Historical Essays on scientific methodology. Springer-Science + Business Media, BV. 1981b.

LAUDAN, L. **Progress and its Problems: Towards a Theory of Scientific Growth** (1977). Routledge & Kegan Paul. London, 1977.

LAUDAN, L. Teorias do Método Científico de Platão a Mach (1968). Trad. Balthazar Barbosa Filho. **Cad. Hist. Fil. Ciência, Campinas**. Série 3, v.10, n.2, jul-dez, 2000. p.9-140.

LEHMKUHL, D. Why Einstein did not believe that general relativity geometrizes gravity. Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics. Volume 46, Maio 2014. p.316-326.

LEIBNIZ, G. W. Philosophical Letters Written by M. Leibniz and M. Hartsoeker. In: DE LA ROCHE, M. **Memoirs of Literature**. Containing a large account of many valuable books, letters and dissertations upon several subjects, miscellaneous observations. Vol. 4. Second Edition. London, 1722. p.452-471.

LEPLIN, J. (Ed.). **Scientific Realism**. Berkeley: University of California Press. 1984.

LOSEE, J. **A Historical Introduction to the Philosophy of Science** (1972). Fourth Edition. Oxford University Press, 2001.

LORENTZ, H.A. Considerations on Gravitation. **KNAW, Proceedings**, 2, 1899-1900, Amsterdam, 1900. p. 559-574.

MACH, E. **The Science of Mechanics**: A critical and historical account of its development. Translated from the German by Thomas J. Mckormack. The open court publications. London-Chicago, 1919.

MACHAMER, P. K. Aristotle on natural place and natural motion. *Isis*, Vol. 69, n. 3, p. 377-387. Sep, 1978.

MACHAMER, P. K. Galileo's machines, his mathematics, and his experiments. In: _____. **The Cambridge Companion to Galileo**. Edited by Peter K. Machamer. Cambridge: Cambridge University Press, 1998a. p. 53-79.

MACHAMER, P. K (Ed.). **The Cambridge Companion to Galileo**. Edited by Peter K. Machamer. Cambridge: Cambridge University Press, 1998b.

MAHONEY, M. S. Barrow's Mathematics: Between Ancients and Moderns. In: FEINGOLD, M. **Before Newton: The Life and Times of Isaac Barrow**. Edited by Mordechai Feingold, Cambridge: Cambridge University Press, 1990. p. 179–249.

MALCON, N. **Aspects of Hobbes**. Claredon Press. Oxford, 2002.

MAMIANI, M. To twist the meaning: Newton's regulae philosophandi revisited. In: BUCHWALD, J. Z.; COHEN, I. B. **Isaac Newton Newton's Natural Philosophy**. Edited by Jed Z. Buchwald and I. Bernard Cohen. The MIT Press, 2001. p. 3-14.

MATTHEWS, M. R. **Time for Science Education: How Teaching the History and Philosophy of Pendulum Motion Can Contribute to Science Literacy**. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2000.

MATTHEWS, M. R. **The Pendulum: Scientific, Historical, Philosophical and Educational Perspectives**. Edited by Michel Matthews. Springer, 2005.

MATHEWS, M. R. Scientific Background to Modern Philosophy. **Essays in the History and Philosophy of Science and Mathematics**. Chicago: Open Court. 1989.

MAXWELL, N. Induction and Scientific Realism: Einstein versus Van Fraassen. Part One: How to Solve the Problem of Induction. **Brit. J. Phil. Sci.** 44 (1993), p.62.

MAXWELL, N. Three Criticisms of Newton's Inductive Argument in the *Principia*. **Advances in Historical Studies**, Vol 3, N.1, 2014. p.2-11.

MCALLISTER, J. **Beauty and Revolution in Science**. Ithaca: Cornell University Press. 1996.

MCGUIRE, J. E. Body and Void and Newton's *De mundi systemate*: Some New Sources, **Archive for History of Exact Sciences**, vol. 3, No. 3, nov, 1966. p.206-248.

MCGUIRE, J. E. Newton's Principles of Philosophy: An Intended Preface for the 1704 *Opticks* and a Related Draft Fragment. **The British Journal for the History of Science**, vol.5, No.18. 1970. p.178-186.

MCGUIRE, J. E.; TAMNY, M. Comentary. In: NEWTON, I. **Certain Philosophical Questions**: Newton's Trinity Notebook. Edited by James E. McGuire and Martin Tamny. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. p.3-327.

MCGUIRE, J. E. **Tradition and innovation, Newton's metaphysics of nature**. Series: The University of Western Ontario Series in Philosophy of Science vol. 56. Dordrecht: Kluwer, 1995.

MCGUIRE, J. E.; RATTANSI, Piyo. M. Newton and the 'Pipes of Pan'. Notes and Records of *Royal Society*, v. 21, p. 108-143, 1966.

MCMULLIN, E. The Impact of Newton's *Principia* on the Philosophy of Science. **Philosophy of Science**. Vol. 68, No.3, Sep., 2001. p.339-345.

MCKEON, R (Ed). **The Basic Works of Aristotle**. Edited by Richard McKeon. The modern library. New York, 1941.

MELI, D. B. The Axiomatic Tradition in Seventeenth-Century Mechanics. In: FRIEDMAN, M; DOMSKI, M.; & DICKSON, M (eds.). **Discourse on a New Method**: Reinvigorating the Marriage of History and Philosophy of Science. Open Court, 2010.

MILL, J. S. **A System of Logic: Ratiocinative and Inductive**. (2 vols). 6th edn. London: Longmans, Green.1865.

MOLYNEUX, W. **Dioptrica nova**. A Treatise of Dioptricks, In Two Parts. Wherein the Various Effects and Appearances of Spherick Glasses, both Convex and Concave, Single and Combined, in Telescopes and Microscopes, Together with Their Usefulness in many Concerns of humane life, are explained. London: for Benj. Tooke, 1692.

MOSHENSKA, J. **Feeling Pleasures**: The sense of Touch in Renaissance England. Oxford University Press, 2014.

NAGEL, E. **The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation.** Publisher: Harcourt, Brace & World, INC., 1961.

NEMÉNYI, P. F. The Main Concepts and Ideas of Fluid Dynamics in their Historical Development. **Archive for History of Exact Sciences**, Vol. 2, No. 1, nov, 1962. p. 52-86.

NEWTON, I. **Certain Philosophical Questions:** Newton's Trinity Notebook. Edited by James E. McGuire and Martin Tamny. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

NEWTON, I. An account of the book entitled *Comercium Epistolicum*. In: HALL, A. R. **Philosophers at War: The Quarrel Between Newton and Leibniz.** Cambridge: Cambridge University Press, 1980. p.261-314.

NEWTON, I. De Analysi per Aequationes Numero Terminorum Infinitas. In: _____. **The Mathematical Papers of Isaac Newton.** Edited by Derek T. Whiteside. Vol. 2: 1667-1670. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

NEWTON, I. De Gravitatione et Aequipondio Fluidorum. In: _____. **Philosophical Writings.** Edited by Andrew Janiak. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. p.12-39

NEWTON, I. De Motu. In: HERIVEL, J. **The Background to Newton's *Principia*:** a Study of Newton Dynamical Researches in the years 1664-84. Oxford, 1965. p.257-303.

NEWTON, I. De Motu Corporum (On Motion). In: WHITESIDE, D. T. **The Mathematical Papers of Isaac Newton.** Edited by Derek T. Whiteside (8 vols). Vol. 7: 1684-1691. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. p.30-228.

NEWTON, I. De Quadratura Curvarum. In: WHITESIDE, D. T. **The Mathematical Papers of Isaac Newton.** Edited by Derek T. Whiteside (8 vols). Vol. 8: 1697-1722. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. p.92-167.

NEWTON, I. Geometriae Libri Duo. In: WHITESIDE, D. T. **The Mathematical Papers of Isaac Newton.** Edited by Derek T. Whiteside (8 vols). Vol. 7: 1691-1695. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. p. 402-561.

NEWTON, I. Lectiones Opticae (1670-1672). In: SHAPIRO, A. **The Optical Papers of Isaac Newton.** (3 vol). Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

NEWTON, I. **Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World** (2 vols). Third Edition. Translated into English by Andrew Motte in 1729. The

translations revised, and supplied with an historical and explanatory appendix by Florian Cajori in 1934. Eighth Printing. University of California Press, 1934.

NEWTON, I. **Opticks**: Or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. Third Edition. London: Printed for William and John Innys at the West End of St. Paul's, 1721.

NEWTON, I. **Philosophia Naturalis Principia Mathematica**. Autore Is. Newton, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali. Imprimatur. S. Pepys, Reg. Soc. Praesses. Londini, 1686.

NEWTON I. **Philosophia Naturalis Principia Mathematica**. Third Edition (1726). With variant readings. Assembled and Edited by Alexandre Koyré and I. Bernard Cohen, with assistance of Anne Whitman. Harvard University Press, 1972.

NEWTON, I. **Philosophical Writings**. Edited by Andrew Janiak. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

NEWTON, I. **Textos, Antecedentes e Comentários**. Escolhidos e organizados por I. Bernard Cohen e Richard S. Westfall. Tradução de Vera Ribeiro. Contraponto: EdUERJ. Rio de Janeiro, 2002.

NEWTON, I. **The Correspondence of Isaac Newton**. (7 vols). Edited by H. W. Turnbull, J. F. Scott, A. R. Hall and L. Tilling. Cambridge: Cambridge University Press, 1959-1977.

NEWTON, I. **The Mathematical Principles of Natural Philosophy**. Translated into English By Andrew Motte: To Which are Added the System of the World. First American edition carefully revised and corrected. Published by Daniel Adee. New York, 1846.

NEWTON, I. **The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy**. A new translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman, assisted by Julia Budenz, preceded by a guide to Newton's *Principia* by I. Bernard Cohen. Berkeley, CA: University of California Press, 1999.

NEWTON, I. **The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy**. Preceded by a Guide to Newton's *Principia* by I. Bernard Cohen. Translated by I. Bernard Cohen and Anne Whitman, assisted by Julia Budenz. Berkeley: University of California Press, 1999.

NEWTON, I. **Waste Book**. MS Add. 4004, Cambridge University Library, Cambridge, UK. Acessado digitalmente em *The Newton Project*:
www.newtonproject.ox.ac.uk/catalogue/record/NATP00176.

OKHAM, G. Reportatio, II. In: Tomás de Aquino, Dante Alighieri, John Duns Scot e William of Okham. Coleção os Pensadores, Abril Cultural, São Paulo, 1973.

ORLOV, S. A. Gravitational properties of atom. **J Phys Astron.** 2017;5(3):116.

OTTE, M.; PANZA, M. (Eds). **Analysis and Synthesis in mathematics:** history and philosophy. Boston studies of philosophy of science, vol. 196. Kluwer academic publiser, 2001.

PAIS, A. Einstein and the quantum theory. **Reviews of Modern Physics**, Vol. 51, No. 4, October 1979. p.863-911.

PALMERINO, C. R. Galileo's Theories of Free Fall and Projectile Motion as interpreted by Pierre Gassendi. In: PALMERINO, C.R.; THIJSSSEN, J.M.M.H (Ed.). **The reception of Galilean Science of Motion in Seventeenth Century Europe.** Kluwer Academic Publishers, 2004. p.137-164.

PALMERINO, C. R.; THIJSSSEN, J.M.M.H (Ed.). **The reception of Galilean Science of Motion in Seventeenth Century Europe.** Kluwer Academic Publishers, 2004.

PAPPUS. **Mathematical Collection, Book VIII.** Translated from the Arabic text by D. Jackson, Digital Research Library for The Archimedes Project, 1970.

PAPPUS. *Collectio*, VIII. In: THOMAS, I. B (Ed.) **Selections illustrating the history of Greek mathematics.** Vol. 2: From Aristarchus to Pappus. With and English translation from greek by Ivor Thomas. London, Cambridge, Mass. W. Heinemann, ltd. Harvard University Press, 1941.

PAPPUS. **Pappus of Alexandria: Book 4 of the *Collection*.** Edited With Translation and Commentary by Heike Sefrin-Weis. Springer, 2010.

PARKER, S. **A free and impartial censure of the Platonick philosophie.** Being a Letter written to his much honoured friend Mr. N. B. Oxford, Printed by W. Hall, for Richard Davis, 1666.

PATY, M. Mathesis universalis e inteligibilidade em Descartes. Trad. em português por Maria Aparecida Corrêa-Paty. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência.** Série 3, vol. 8, n.1, jan-jun de 1998. p. 9-57.

PEDERSEN, O. **Early Physics and Astronomy: Na historical introduction.** Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

POPPER, K. **Conjectures and Refutations: The growth of scientific knowledge.** 2nd Ed. New York: Routledge & Kegan Paul. 2002.

POPPER, K. R. **Lógica da Pesquisa Científica** (1934). Trad. Leonidas Hegenberg e Octanny Silveira da Mota. Editora Cultrix. São Paulo, 1974.

POPPER, K. R. **Realism and the Aim of Science**. London: Hutcheson, 1983.

PORTO, C.M.; PORTO, M.B.D.S.M. Galileu, Descartes e a elaboração do princípio da inércia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 4, 4601, 2009.

POWER, H. **Experimental Philosophy in three books**: containing new experiments microscopical, mercurial, magnetical: with some deductions, and probable hypotheses, raised from them, in avouchment and illustration of the now famous atomical hypothesis. London: Printed by T. Roycroft, for John Martin and James Allestry, 1664.

PUTNAM, H. What is realism? In: LEPLIN, J. (Ed.). **Scientific Realism**. Berkeley: University of California Press. 1984.

PYCIOR, Helena M. **Symbols, Impossible Numbers, and Geometric Entanglements: British Algebra Through the Commentaries on Newton's Universal Arithmetick**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

QUINE, W.V.O. **De um ponto de vista lógico**. (Trad. Antonio Ianni Segatto). Editora Unesp. 2010

QUINE, W.V.O. Dois Dogmas do Empirismo (1951). In: **De um ponto de vista lógico**. (Trad. Antonio Ianni Segatto). Editora Unesp. 2010. p. 37-72.

REINCHENBACH, H. **Experience and prediction**: an analysis of the foundations and the structure of knowledge. University of Chicago Press, 1938.

ROSENBERG, A. **Philosophy of Science: a contemporary introduction**. Second Edition. Routledge, Taylor and Francis Group. New York and London. 2005.

ROSSI, P. **O nascimento da ciência moderna na Europa**. Trad. Antônio Angonese. Edusc. Bauru, São Paulo, 2001.

RUSSEL, B. **The Problems of Philosophy**. With a new introduction by John Perry. Oxford University Press, 1997.

SAGENG, Erik. Colin MacLaurin and the Foundations of the Method of Fluxions. Ph.D. diss., Princeton University, 1989.

SALMON, M. H (Ed). **Introduction to the Philosophy of Science**. Hackett Publishing Company. Indianapolis/Cambridge. 1992.

SANDERSON, R. **Logicae artis compendium**. Editio Nova Emendata. Oxonii. J. Abrams. Londini, G. Bell, 1816.

SAUER, T. Albert Einstein's 1916 Review Article on General Relativity. In: GRATAN-GUINNESS, I. (ed.). **Landmark Writings in Western Mathematics, 1640-1940**. Elsevier, 2004.

SCHICKORE, J. & FRIEDRICH S (eds.). **Revisiting Discovery and Justification**. Historical and Philosophical Perspectives on the Context Distinction, New York: Springer, 2006.

SCOTUS, D. **Philosophical Writings**. Translation and editing by Allan Wolter. Edinburgh: Thomas Nelson. 1962.

SEFRIN-WEIS, H. General Introduction. In: PAPPUS. **Pappus of Alexandria: Book 4 of the Collection**. Edited With Translation and Commentary by Heike Sefrin-Weis. Springer, 2010.

SEPKOSKI, D. Nominalism and Constructivism in Seventeenth-Century Mathematical Philosophy. London: Routledge, 2007.

SERGEANT, J. **The Method to Science**. London, 1696

SGARBI, M. **The Aristotelian Philosophy and the Rise of the Empiricism. Logic and Epistology in British Isles (1570-1689)**. Studies in history and philosophy of science, vol. 32. Springer, 2013.

SHAPIRO, A. Newton Experimental Philosophy. **Early Science and Medicine**, 9, 3. Koninklijke Brill NV, Leiden, 2004. p.185-217.

SHAPIN. Understanding the Merton Thesis. **Isis** 79(4). 1988. 594-605.

SHAPIRO, A. **The Optical Papers of Isaac Newton**. (3 vol). Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

SHAPIRO, B. J. **Probability and Certainty in Seventeenth-Century England: A Study of the Relationships Between Natural Science, Religion, History, Law and Literature**. Princeton: Princeton University Press, 1983.

SHEA, W. R. Descartes as Critic of Galileo. In: BUTTS, R.E.; PITT, J.C. (Eds). **New Perspectives on Galileo: Papers Deriving from and Related to a Workshop on Galileo held at Virginia Polytechnic Institute and State University**, 1975. D. Reidel Publishing Company. Boston, 1978. p.139-160.

SHEA, W. R. The rational Descartes and the empirical Galileo. In: PALMERINO, C. R.; THIJSSSEN, J.M.M.H (Ed.). **The reception of Galilean Science of Motion in Seventeenth Century Europe**. Kluwer Academic Publishers, 2004. p.67-82.

SMEENK, C.; SCHLIESSER, E. (eds). **The Oxford Handbook of Newton**. Oxford University Press, 2018.

SMITH, G. E. The Methodology of the *Principia*. In: COHEN, I. B.; SMITH, G. M. (Eds). **The Cambridge Companion to Newton**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. p.138-173.

SMITH, S. **Aditus ad Logicam**. London: Apud Ed. Griffin pro Tho. Whitaker. 1649.

SPRENGER, J. Hypothetico-Deductive Confirmation. **Philosophy Compass**. 6. 2011. p. 497-508. Acesso online em <http://www.laeuferpaar.de/Papers/CompassH-D.pdf>. Último acesso em 29/12/2020.

SORELL, T (Ed). **The Cambridge Companion to Hobbes**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

STALEY, R. **Einstein's Generation: The origins of the Relativity Revolution**. University of Chicago Press, 2008.

STAN, M. Euler, Newton and Foundations fo Mechanics. In: SMEENK, C.; SCHLIESSER, E. (eds). **The Oxford Handbook of Newton**. Oxford University Press, 2018.

TAIT, P.G.; THOMPSON, W. **Treatise on Natural Philosophy**. Part I. Cambridge: Cambridge University Press, 1912.

TALIAFERRO, R. C. **Rational Mechanics: The Classic Notre Damme Course**. Edited by A. Hahn, T. Banchoff and F. Crosson. Dover Publications. 2014

THOMAS, I. B. **Selections illustrating the history of Greek mathematics**. Vol. 2: From Aristarchus to Pappus. London, Cambridge, Mass. W. Heinemann, ltd. Harvard University Press, 1941.

TRUESDELL, C. **Essays on History of Mechanics**. Springer-Verlag New York Inc, 1968.

VAN FRAASSEN, B. **Laws and Simetry**. Claredon Press. Oxford. 1989.

VAN FRAASSEN, B. C. **Scientific Representation: Paradoxes of Perspective**. Claredon Press. Oxford, 2008.

VAN FRAASSEN, B. C. **The Scientific Image**. Oxford: Oxford University Press. 1980.

VAN HELDER, A. Conclusion: the reception of Sidereus Nuncius. In: GALILEO, G. **Sidereus Nuncius or The Sideral Messenger**. Translated with introduction, conclusion and notes by Albert Van Helder. University of Chicago Press. Chicago and London, 1989. p. 87-113.

VIEIRA, R.S.; BRENTAN, H.B. Covariant theory of gravitation in the framework of special relativity. **European Physical Journal**. 28, April, 2018.

WESTFALL, R. S. **Force in Newton's Physics: the science of dynamics in seventeenth century**. Neale Watson Academic Publications. New York, 1971.

WESTFALL, R. S. **Never at Rest: A Biography of Isaac Newton**. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

WESTFALL, R. S. Newton and the fudge factor. **Science**. Vol. 179, Issue 407523, Feb 1973, p. 751-758

WESTMAN, R. S. Huygens and the problem of Cartesianism. In: BOS, H. J. M.; RUDWICK, M. J. S.; SNELDERS, H. A. M.; e VISSER, R. P. W. (Eds). **Studies on Christiaan Huygens: invited papers from the Symposium on the Life and Work of Christiaan Huygens**. Amsterdam, Lisse: Swets & Zeitlinger B. V., 1980. p. 83–103.

WESTON, T. Approximate truth. **Journal of Philosophic Logic**, 16, 1987. p.203-227.

WHEWELL, W. **History of the inductive sciences: from the earliest to the present times**. (3 vols). London, 1837.

WHEWELL, W. **On the philosophy of Discovery**. Including the completion of the third edition of the philosophy of inductive sciences. London, John W. Parker and Son, West Strand, 1860.

WHEWELL, W. **The philosophy of inductive sciences: founded upon their history**. (2 vols). London, 1840.

WHITESIDE, D. T. **The Mathematical Papers of Isaac Newton**. (7 vols). Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

YODER, J.G. **Unrolling Time: Christiaan Huygens and the Mathematization of Nature**. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.

YOLTON, J. **Locke and the Compass of Human Understanding**. Cambridge University Press. 1970.

ZHANG, L. **The van der Waals force and gravitational force in matter.** arXiv:1303.3579v1 [physics.gen-ph], 2013. Último acesso em 27-05-2019.

APÊNDICES E ANEXOS

APÊNDICE A – FUNDAMENTOS EMPÍRICOS DA PRIMEIRA LEI DO MOVIMENTO⁹⁸⁵

1. De Aristóteles à Copérnico

A primeira lei do movimento não foi obtida a partir das investigações empíricas de Newton sobre as colisões. Tampouco das investigações de Descartes, Huygens, Wallis ou Wren. Newton, assim como os demais, simplesmente assumiu esse princípio já no seu ponto de partida. Desse pressuposto ele organizou a sua investigação das colisões, esboçou suas teorias, e construiu uma mecânica racional dos impactos, mas em nenhum momento colocou em questão a validade do seu pressuposto. A única observação que fez sobre o “princípio da inércia”⁹⁸⁶ está no início do escólio às leis do movimento, quando ele nos dá a entender, no máximo, que foi Galileu quem nos deu a garantia da sua validade.⁹⁸⁷ Se fossemos nos basear somente pelas palavras de Newton nesse escólio, seríamos levados a pensar que a explicação de Galileu para o movimento dos projéteis já deveria ser considerada prova suficiente da validade da lei da inércia. Mas teria Newton mais fundamentos para admitir esse princípio? Certamente uma versão semelhante a lei da inércia era amplamente aceita na sua época. Não apenas Galileu, mas Descartes já havia formalmente enunciado esse princípio como parte de uma ampla reconstrução filosófica. Mas à luz dos seus próprios critérios, poderia Newton ter assumido a inércia sem uma sólida base experimental de sustentação? Poderia Newton ter inserido um princípio metafísico, ou uma ideia especulativa, como parte do seu programa metodológico? É claro que para garantir o êxito do seu projeto, Newton precisaria construir uma geometria mecânica cujos axiomas fossem rigorosamente análogos às leis que de fato se observam na natureza. E diante disso, ele não poderia trabalhar com um princípio sobre o qual pairasse alguma sombra de insegurança e incertezas. Haveria, assim, algum fundamento empírico para a aceitação de Newton ao princípio da inércia? Para abordar esse problema será necessário extrapolar a discussão de Newton no escólio às leis do movimento e apresentar uma breve contextualização histórica da questão⁹⁸⁸.

⁹⁸⁵ Antes de ler esse apêndice recomendo a leitura das seções 5.1.1 e 5.2.

⁹⁸⁶ Por um motivo de simplicidade, nesse apêndice chamarei a primeira lei do movimento de “princípio da inércia”, mesmo sabendo que esse termo surgiu somente com Kepler. Portanto, conto com a indulgência do leitor sobre isso.

⁹⁸⁷ Veja a seção 5.2.1.

⁹⁸⁸ Em boa parte das seções 1 e 2 desse apêndice segui a exposição de Porto, 2009.

A história do problema acerca das condições necessárias para um corpo permanecer em movimento geralmente é apresentada desde Aristóteles. Dentro de um abrangente arcabouço filosófico o pensador grego estabeleceu, grosso modo, que toda *mudança* ocorre em virtude de uma *causa*, e que o movimento, sendo uma das principais modalidades de mudança na natureza, também depende de uma causa para ser produzido e mantido. Todavia, existiam dois tipos de movimento na concepção aristotélica. Um *natural*, em direção ao centro da Terra, que era o lugar natural dos corpos; e outro *violento*, não-natural, ou *forçado*, que ocorria exclusivamente pela ação de uma força. O movimento de uma pedra sendo lançada ao ar, por exemplo, era gerado por meio de uma força aplicada pelo lançador no momento do lançamento. O próprio Aristóteles antecipou a principal objeção a esse pensamento. Como explicar a *continuidade* do movimento uma vez sendo extinta a força que o produz? Como explicar que uma pedra continue em movimento mesmo após cessar a força aplicada pelo lançador? Ao que tudo indica, foi nesse momento que surgiu a primeira hipótese auxiliar para sustentar a teoria de Aristóteles: o ar deve exercer uma outra força que impulsiona a pedra por mais algum curto espaço de tempo no seu movimento.

Evidentemente esse argumento gerou muitas objeções ao longo da história. Uma das mais severas foi produzida por Guilherme de Okham, no séc. XIV, que imaginou duas flechas lançadas em sentidos contrários cruzando-se no ar. No momento exato do cruzamento das flechas, a *mesma parcela de ar* precisaria ter dois movimentos diferentes para manter ambas as flechas em seus movimentos, o que seria absurdo.⁹⁸⁹ Okham, então, formulou uma concepção alternativa à de Aristóteles para explicar a continuidade do movimento dos corpos, defendendo que a permanência do movimento não exigia uma causa. No entanto, a sua teoria não ganhou força diante do surgimento de uma nova hipótese para salvar a concepção aristotélica. A teoria do *impetus*, de Jean Buridan.⁹⁹⁰ Essa teoria, que já havia surgido em outra forma anteriormente com John Philoponus, no séc. VI, afirmava que ao se empregar uma força num corpo, nele seria necessariamente impresso parte da virtude dessa força, um “*impetus*”, que se prolongaria, ainda, por algum tempo no corpo até por fim ser corrompido pela resistência do ar e pela gravidade. Essa nova hipótese ainda vigorou por pelo menos um século até ser ameaçada pelo abalo que a cosmologia aristotélica sofreu em razão da disseminação da obra de Copérnico.

Copérnico defendeu um sistema do mundo no qual a Terra não ocupava mais o centro do Universo, e os movimentos observados dos planetas poderiam ser melhor explicados com

⁹⁸⁹ Okham, 1973, p.402.

⁹⁹⁰ Veja, por exemplo, Grant, 2010.

a admissão de que todos eles, juntamente com a Terra, moviam-se em torno do Sol. Além disso, a Terra também se moveria em torno do seu próprio eixo, o que explicaria a impressão de que o Sol e os outros astros giravam ao seu redor. Essa mudança radical de perspectiva foi se tornando cada vez mais aceita e tornou-se decisiva para o desenvolvimento do princípio da inércia. Além de enfraquecer a distinção aristotélica entre movimento natural e violento, também arruinou a distinção entre o mundo supralunar e sublunar, ou seja, entre o mundo superior das essências imutáveis e movimentos permanentes, e o mundo terrestre, caracterizado sobretudo pela corrupção e mudança. Isso porque ao se admitir que a Terra girava com movimento eterno em torno do seu eixo, os adeptos da teoria copernicana foram obrigados a admitir que também os corpos na superfície terrestre, incluindo o próprio ar, moviam-se juntamente com a Terra, com o mesmo movimento eterno. Uma das principais objeções dos aristotélicos ao sistema de Copérnico era que, se a Terra realmente girasse em torno do seu eixo, ao se abandonar um objeto do alto de uma torre, este não cairia junto à base da torre, mas um pouco afastado dela, o que na realidade não ocorria. Todavia, a partir do famoso experimento imaginário do navio, os copernicanos argumentaram que a situação suposta não deveria acontecer. Um objeto abandonado do alto do mastro de um navio em movimento com velocidade uniforme não chega ao solo afastado da sua base, assim como não chegaria o objeto abandonado do alto da torre em virtude do movimento da Terra⁹⁹¹.

O próprio Copérnico formulou uma hipótese metafísica para explicar esse fenômeno. Usou um argumento que tentava, ainda, conciliar alguns elementos da antiga cosmologia aristotélica com o seu novo sistema do mundo. O movimento da Terra em torno do seu eixo seria um “movimento natural” do qual a matéria nas intermediações do planeta, devido a sua “afinidade” com este, de algum modo compartilharia. Giordano Bruno desconsiderou essas observações metafísicas de Copérnico e tentou explicar o fenômeno nos termos da teoria do *impetus*. O movimento do navio, bem como da Terra, transmitiria o seu *impetus* aos demais corpos em conjunção. Mas a esse tempo a teoria aristotélica já estava por demais fraturada para ter a mesma força que antes. Voltou à cena, então, uma versão atualizada da hipótese de Okham, que a essa altura já desfrutava do privilégio de oferecer maior simplicidade e economia explicativa para os fenômenos. Os corpos não precisariam de uma causa para se *manterem* em movimento; apenas para serem *colocados* em movimento. Galileu surgiu com um dos defensores do princípio da inércia. Um corpo, uma vez colocado em movimento, permanece indefinidamente em movimento, e esse movimento só é interrompido em virtude

⁹⁹¹Veja as considerações de Rossi (2001) sobre o assunto.

da ação da gravidade, de um obstáculo externo, ou da resistência do meio⁹⁹². O fundamento empírico básico para a hipótese explicativa de Galileu era a simples permanência de todos os corpos celestes em movimento, assim como a Terra. A tomar como premissa o sistema copernicano, grande maioria dos corpos que observamos não estão em repouso, mas em movimento uniforme. Rigorosamente, não temos qualquer experiência com um corpo que esteja absolutamente em repouso. Parafraseando Tait e Lord Kelvin, o único repouso que realmente conhecemos é o movimento uniforme.⁹⁹³ Aí já estava o germe inicial do princípio da inércia. Mas Galileu ainda teria a ocasião de estabelecer com mais vigor esta convicção.

2. Galileu

Paralelamente aos seus estudos astronômicos, Galileu também teve a oportunidade de refletir sobre o princípio da inércia. Nas suas investigações mecânicas sobre o movimento dos projéteis, o matemático de Pisa propôs que esse fenômeno poderia ser considerado como a composição de dois movimentos totalmente independentes, um vertical acelerado e outro horizontal uniforme. Para usar aqui um recurso muito comum no século XVI, imagine que uma pedra seja abandonada do alto do mastro de um navio em movimento uniforme perto de um cais. Uma pessoa observando o evento sobre o cais, em repouso em relação ao navio, verá a pedra descrever um percurso semelhante a uma semiparábola, enquanto que outra pessoa dentro do navio verá a pedra descrever um movimento de queda vertical. A pessoa dentro do navio perceberá apenas o movimento vertical acelerado. A pessoa sobre o cais perceberá, além do movimento vertical, também um movimento horizontal acompanhando o navio, ou seja, um movimento horizontal uniforme. Imagine, agora, um pássaro voando sobre o cais na mesma altura do mastro do navio, carregando uma pedra, e acompanhando exatamente o movimento do barco sobre a água. Se o pássaro soltar a pedra no mesmo momento que o objeto é abandonado do mastro do navio, o percurso tanto para a pedra do navio quanto para a pedra lançada pelo pássaro, observado pela pessoa no cais, será precisamente o mesmo. A conclusão é óbvia. O movimento de um corpo abandonado em queda livre a partir de um navio com movimento uniforme é igual ao movimento de um projétil lançado fora do navio, com a mesma velocidade da embarcação. Portanto, o movimento dos projéteis sempre pode ser entendido como composto de um movimento vertical acelerado, e um movimento

⁹⁹² Galileu, *Discorsi*.

⁹⁹³ O que eles dizem exatamente sobre a lei da inércia é: “[a força resultante nula] é o único tipo de repouso do qual podemos ter qualquer consciência”. Tait e Thompson, 1912, p.244.

horizontal uniforme. Qualquer que seja a maneira como o corpo tenha sido lançado, o movimento horizontal sempre será uniforme⁹⁹⁴. É claro se a altura do mastro for muito grande, ou a pedra abandonada for muito leve, ou ainda velocidade do navio for muito alta, observar-se-á que a pedra chegará ao solo levemente afastada da base. Mas essas pequenas variações da experiência proposta acima apenas sugerem que de fato há uma sutil força de resistência do ar atuando no corpo.

Mesmo com todas as evidências para a aceitação do princípio da inércia, no *Discorsi* Galileu formulou uma maneira de fornecer uma evidência intuitiva e contundente para o princípio. Ele apresentou o famoso experimento de pensamento do plano inclinado, que vale a pena lembrarmos. Em dois planos inclinados e perfeitamente lisos, como na figura abaixo, caso abandonemos uma esfera também perfeitamente lisa e livre de imperfeições, ela atingirá no segundo plano a mesma altura de que partiu do primeiro, desprezado-se a resistência do ar. Isso é garantido pelo fato de um único movimento estar atuando sobre a esfera, a saber o movimento acelerado em direção ao centro da terra, que aumentará a velocidade da esfera na descida, e retardará na subida.

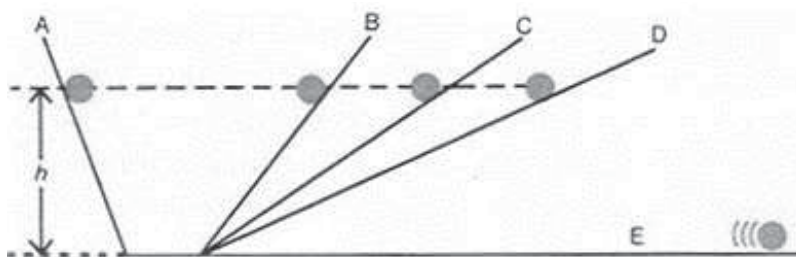


Figura 114 – Experimento do plano inclinado de Galileu para evidenciar o movimento horizontal uniforme.
Fonte: domínio público

Galileu já havia mostrado que a aceleração da esfera era proporcional à inclinação do plano. Assim, durante a subida a aceleração contrária da esfera diminui na proporção da diminuição da inclinação do plano, permitindo que a esfera seguisse por uma distância maior até atingir a mesma altura que foi abandonada. Quanto menor a inclinação do segundo plano maior será a distância percorrida. Seguindo esse raciocínio, quando o plano atingir a inclinação nula, ou seja, se tornar horizontal, a distância percorrida pela esfera será infinita, ou seja, permanecerá indefinidamente em movimento uniforme. Assim, também pelos seus estudos mecânicos,

⁹⁹⁴Esse exemplo não é de Galileu. Aproveitei as considerações do filósofo italiano e o famoso exemplo do navio para inventar um novo exemplo que me parece mais claro. Porém, tentei construir um exemplo à maneira da época, um experimento de pensamento.

Galileu chegou ao princípio da inércia. No entanto, como muitos comentadores do filósofo italiano mostraram, a inércia de Galileu estaria ainda relacionada ao movimento circular.

Tanto o movimento eterno da Terra quanto dos corpos nas suas proximidades eram movimentos circulares. Copérnico havia explicado o movimento de rotação da Terra, bem como os demais corpos em conjunção, como um movimento circular *natural* que os corpos experimentariam, juntamente com o movimento *natural* em direção ao centro da Terra. Entretanto, com seus estudos sobre a queda dos corpos e o movimento dos projéteis, Galileu havia mostrado que não apenas o movimento de rotação dos corpos junto à Terra é uniforme e permanente, mas todo e qualquer movimento horizontal relativo ao lançamento de um projétil. Qualquer movimento, uma vez iniciado, tem uma parte horizontal uniforme, e outra vertical acelerada, a menos da resistência do ar. O experimento do plano inclinado também levava à mesma conclusão. Todavia, “horizontal uniforme”, para Galileu, era um movimento paralelo à superfície da Terra, a uma distância constante do centro do planeta; portanto, rigorosamente falando, tratava-se de um movimento circular. Galileu não tinha qualquer evidência que o levasse a cogitar uma continuidade do movimento em linha reta. Todas as experiências a partir das quais ele realizou os seus estudos e especulações, quer na astronomia ou mecânica, eram de corpos descrevendo movimentos circulares.

Ainda assim, Galileu considerou a possibilidade do estado natural de movimento dos corpos ser em linha reta. Contudo, se assim fosse, em primeiro lugar o corpo se moveria afastando-se da sua tendência natural para o centro da Terra, o que geraria uma aceleração contrária no seu movimento, não permitindo que a sua velocidade horizontal fosse constante. Em segundo lugar, o movimento eterno em linha reta soava absurdo para Galileu, uma vez que seria um movimento infinito sem um fim determinado. Isso contrariava os compromissos metafísicos do matemático italiano. Afirma ele:

Estabelecido, portanto, este princípio, pode-se imediatamente concluir que, se os corpos integrais do mundo devem ser por sua natureza móveis, é impossível que seus movimentos sejam retos ou diferentes dos circulares; (...) Além disso, sendo o movimento reto por natureza infinito, porque infinita e indeterminada é a linha reta, é impossível que móvel algum tenha por natureza o princípio de mover-se pela linha reta, ou seja, para aonde é impossível chegar, inexistindo um término predefinido. E a natureza, como afirma com propriedade o próprio Aristóteles, não se propõe a fazer o que não pode ser feito, nem empreende o movimento para onde é impossível chegar.⁹⁹⁵

As concepções metafísicas de Galileu, ainda parcialmente ligadas ao aristotelismo, o impediram de endossar a possibilidade de um estado de movimento uniforme em linha reta.

⁹⁹⁵ *Dialogo* [Mariconda], p.104-105.

No entanto é bastante interessante notar que ele não excluiu a possibilidade de que um movimento assim jamais tenha existido. Apenas considerou que ele não mais precisaria existir diante da ordem estabelecida na configuração atual das coisas:

E se, ainda assim, alguém disser que, embora a linha reta, e consequentemente o movimento sobre ela, seja produtivo ao infinito ou seja indeterminada, todavia a natureza atribui-lhe, por assim dizer, arbitrariamente alguns termos e dá instintos naturais a seus corpos naturais para que se movam em direção a eles, responderei que isso talvez se pudesse imaginar ter ocorrido no primeiro caos, onde confusa e desordenadamente vagavam matérias indistintas, para cuja ordenação a natureza se tivesse muito adequadamente servido dos movimentos retos, os quais, assim como movendo os corpos bem constituídos desordenam, assim também são apropriados a bem ordenar os confusamente dispostos; contudo, depois da ótima distribuição e disposição é impossível que neles uma inclinação natural de ainda moverem-se com movimento reto, do qual agora somente se seguiria o afastarem-se os corpos do lugar próprio e natural, ou seja desordenarem-se.⁹⁹⁶

Talvez Galileu tenha especulado sobre uma inércia retilínea dos corpos por perceber intuitivamente que o movimento em linha reta é mais simples que o movimento circular e, portanto, na ordenação lógica das coisas a linha reta deveria surgir antes que a curva. Afirma o filósofo: “O movimento circular (...) nunca seria adquirido naturalmente, sem o precedente movimento reto, mas uma vez adquirido, ele continuaria perpetuamente com velocidade uniforme”. Mas à despeito de ter aparentemente se inquietado com essa questão, Galileu terminou por aceitar a conclusão da inércia circular. Tivera ele a oportunidade de investigar as características do movimento circular mais a fundo, talvez pudesse reconsiderar essa conclusão. Todavia não teve tempo para tanto. Descartes, Huygens e Newton, por outro lado, não perderam a oportunidade de analisar com profundidade o movimento circular e perceber que ele não poderia se sustentar naturalmente. Puderam, assim, mudar a história da inércia circular.

3. Descartes

A transição da concepção de uma “inércia circular” para uma “inércia retilínea” ocorreu inicialmente com o trabalho de Descartes. O filósofo francês enunciou formalmente a inércia retilínea nas duas primeiras “leis da natureza” apresentadas no seu celebrado *Princípios de Filosofia*. A primeira lei enuncia a continuidade do movimento sem a necessidade de qualquer causa:

A primeira [lei] é que cada coisa particular, enquanto simples e indivisa, se conserva o mais possível e nunca muda a não ser por causas externas. (...) se

⁹⁹⁶ Ibid, p.105.

estiver em repouso, nunca se moverá por si mesma; mas, uma vez posta em andamento, também não podemos pensar que ela possa deixar de se mover com a mesma força enquanto não encontrar nada que atrase ou detenha o seu movimento. De modo que, se um corpo começou a mover-se, devemos concluir que continuará sempre em movimento [e que nunca parará por si próprio].⁹⁹⁷

E a segunda lei enuncia a continuidade do movimento *em linha reta*:

A segunda lei que observo na Natureza é que cada parte da matéria, considerada em si mesma, nunca tende a continuar o seu movimento em linha curva mas sim em linha recta, embora muitas destas partes sejam muitas vezes obrigadas a desviar-se porque encontram outras no caminho, e quando um corpo se move toda a matéria é conjuntamente movida e faz sempre um círculo [ou anel]. (...) Embora seja verdade que o movimento não acontece num instante, todavia é evidente que todo o corpo que se move está determinado a mover-se em linha recta e não circularmente.⁹⁹⁸

Descartes afastou completamente a hipótese de uma inércia circular. Os corpos, uma vez movidos, permanecem em movimento invariavelmente numa linha reta. Mas os argumentos mobilizados pelo filósofo francês para fundamentar a sua posição têm natureza bem distinta daqueles utilizados pelo matemático italiano. Enquanto o último defendeu seus princípios com base em experimentos (ao menos de pensamento), o primeiro os fundamentou em considerações metafísicas:

Como Deus não está sujeito a mudanças, agindo sempre da mesma maneira,⁹⁹⁹ podemos chegar ao conhecimento de certas regras a que chamo as leis da Natureza, e que são as causas segundas, particulares, dos diversos movimentos que observamos em todos os corpos [e daí a importância dessas leis]. A primeira é que cada coisa particular, enquanto simples e indivisa, se conserva o mais possível e nunca muda a não ser por causas externas. Por conseguinte, se vemos que uma parte da matéria é quadrada, ela permanecerá assim se nada vier alterar a sua figura; e se estiver em repouso, nunca se moverá por si mesma (...).¹⁰⁰⁰

Do contexto da primeira lei da natureza acima percebe-se claramente que Descartes a derivou imediatamente dos seus princípios metafísicos. O mais fundamental desses princípios é a “imutabilidade de Deus” (*immobilitate Dei*). Dele se segue que tudo permanece no estado em que foi inicialmente criado até que uma causa externa o modifique. O mesmo vale para o movimento e o repouso. Entretanto, o leitor não deve se apressar em concluir que isso significa que o pensador francês ignorou a experiência ao formular os seus princípios, ou que ele não tinha qualquer compromisso com a ela na construção do seu sistema filosófico. Pelo

⁹⁹⁷ *Princípios [João Gama]*, 37, p.76.

⁹⁹⁸ *Ibid.*, 39, p.77.

⁹⁹⁹ Essa primeira frase no latim é mais contundente em relação a dependência metafísica das leis da natureza. Descartes afirma “Atque ex hâc câdem immobilitate Dei (...)”, que poderia ser mais exatamente traduzido como “A partir dessa mesma imutabilidade de Deus (...)”.

¹⁰⁰⁰ *Princípios [João Gama]*, 37, p.76.

contrário. Logo na sequência do texto, Descartes lança mão da experiência para argumentar em seu favor da validade da primeira lei:

Presenciamos diariamente a prova desta primeira regra nas coisas que atiramos para longe; não há razão para continuarem a mover-se quando estão fora da mão que as lançou, a não ser que [de acordo com as leis da Natureza] todos os corpos que se movem continuem a mover-se até que o seu movimento seja travado por outros corpos. É evidente que o ar e os outros corpos líquidos, nos quais vemos estas coisas a moverem-se, gradualmente diminuem a velocidade do seu movimento: se abanarmos um leque agitadamente, a nossa mão consegue sentir a resistência do ar (o que também é confirmado pelo voo das aves). E na Terra o único corpo fluido que oferece tanta resistência aos movimentos dos outros corpos é o ar.¹⁰⁰¹

A tradução portuguesa deixa a desejar nessa passagem em relação ao original. Em latim, Descartes escreve na primeira frase: “*et vero quotidiana experientia in iis quae projiciuntur*”.

A tradução de Mahoney me parece mais fiel ao original:

Certainly, *everyday experience of things* that are thrown wholly *confirms* our rule. For there is no other reason why thrown [bodies] should continue in motion for any time after they have been separated from the thrower than that once moved they continue to be moved, until they are slowed by contrary bodies. And it is manifest that they usually are gradually retarded by the air, or some other fluid bodies in which they are moved, and hence their motion cannot last long. For *we can experience* air resisting the motions of other bodies by our *sense of touch* if we strike it with a fan; the flight of birds *also confirms* the same thing. And there is no other fluid which does not, even more manifestly than air, resist the motions of projectiles.¹⁰⁰²

Inegavelmente há uma resistência do ar, e isso é confirmado pelos nossos sentidos, afirma Descartes. Observamos os pássaros se utilizando dessa resistência ao voar, e igualmente os efeitos dela sobre o movimento dos projetéis. Deve haver poucas dúvidas que essa última referência aos movimentos dos corpos no ar é uma alusão aos estudos dos projéteis de Galileu.¹⁰⁰³ Com efeito, ao que tudo indica, Descartes incorporou as conclusões de Galileu sobre o princípio da inércia num arcabouço filosófico mais amplo. Embora o fundamento último fornecido pelo filósofo francês seja metafísico, provavelmente as suas reflexões filosóficas tiveram como ponto de partida o que ele já tinha como certo da experiência.

Mas o que dizer da defesa cartesiana da permanência do movimento *em linha reta*? Haveria também algum tipo de sustentação *empírica* para essa posição? Recorrendo ao

¹⁰⁰¹ Ibid, 38, p.77.

¹⁰⁰² *Princípios [Mahoney]*, grifos meus.

¹⁰⁰³ No original Descartes menciona expressamente o movimento de “projeteis”. “*Et nullus alius est liquor, quin non manifestius adhuc aër motibus projectorum resistat*”.

contexto da segunda lei da natureza percebemos de imediato que Descartes igualmente a deriva dos seus princípios metafísicos.

A segunda lei que observo na Natureza é que cada parte da matéria, considerada em si mesma, nunca tende a continuar o seu movimento em linha curva mas sim em linha recta (...) Esta regra, tal como a precedente, depende de facto de Deus ser imutável e de conservar o movimento na matéria por meio de uma operação muito simples.¹⁰⁰⁴

Também nesse caso a tradução de Mahoney nos parece mais fiel ao original:

The second law of nature is that any part of matter, considered apart, never tends to continue to be moved along any oblique lines, but only along straight lines (...) The cause of this rule is the same as that of the one preceding, namely the immutability and simplicity of the operation by which God conserves motion in matter.¹⁰⁰⁵

A permanência do movimento dos corpos deve ser em linha reta em virtude da “imutabilidade e simplicidade das operações pelas quais Deus conserva o movimento da matéria”. A “simplicidade”, nesse ponto, parece ser a qualidade principal [de Deus] que fundamenta o percurso natural dos corpos em linha. Mas aqui, novamente, o leitor não deve tirar conclusões apressadas. A questão é se Descartes levantou a hipótese da inércia retilínea com base nos seus pressupostos metafísicos ou, ao contrário, se refletiu sobre os pressupostos metafísicos que estavam por trás da conclusão empírica da inércia retilínea. Parece-me que a segunda opção é mais plausível. Na sequência imediata da apresentação da segunda lei da natureza Descartes faz referência aos estudos que ele empreendeu sobre o movimento circular, precisamente aqueles aos quais me referi mais acima que, caso Galileu tivesse tempo de realiza-los, talvez reconsiderasse a sua conclusão sobre a inércia circular. Afirma Descartes:

Por exemplo, quando a pedra A gira na funda EA, seguindo o círculo ABF, no preciso momento em que está no ponto A determina-se a mover-se para qualquer lado, isto é, para C seguindo a recta AC, se supusermos que é essa linha que toca o círculo. Mas não conseguimos imaginar que estivesse determinada a mover-se circularmente pois, apesar de vir de L para A seguindo uma linha curva, não conseguimos conceber que qualquer parte da curvatura possa estar nesta pedra quando se encontra no ponto A. E já *nos certificámos disto por experiência* [lit. Isso também é confirmado pela experiência¹⁰⁰⁶], pois esta pedra quando sai da funda segue em linha recta para C e nunca tende a mover-se para B. O que claramente nos mostra que qualquer corpo que se move circularmente tende constantemente a afastar-se do centro do círculo que descreve; *até o sentimos com a mão* [lit. experimentamos isso pelo sentido manual¹⁰⁰⁷] quando giramos a pedra na funda (porque a pedra estica e estende a corda para se afastar directamente da nossa mão).

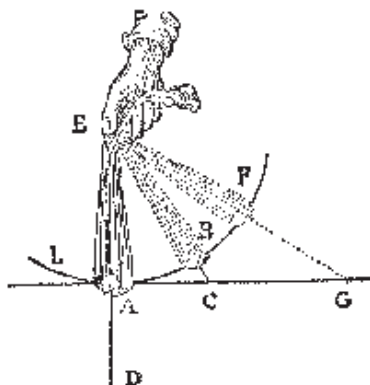
¹⁰⁰⁴ *Principios* [João Gama], 39, p.77.

¹⁰⁰⁵ Ibid [Mahoney].

¹⁰⁰⁶ Original em latim: “Hocque quoque confirmatum est per experientiam (...)”.

¹⁰⁰⁷ Original em latim: “Ut ipso manūs sensu experimur in lapide (...)”.

Esta consideração é de tal importância, e ser-nos-á útil em tantas ocasiões, que devemos assinalá-la imediatamente, propondo-me eu explicá-la ainda melhor quando for ocasião disso.¹⁰⁰⁸



“Isso também é confirmado pela experiência”, afirma Descartes. “Pois esta pedra quando sai da funda segue em linha recta para C e nunca tende a mover-se para B. O que claramente nos mostra que qualquer corpo que se move circularmente tende constantemente a afastar-se do centro do círculo que descreve”, acrescenta.

Uma análise cuidadosa dos corpos movendo-se em trajetórias circulares mostra que eles tendem sempre a se afastar do centro e seguir uma linha reta, e, portanto, deve haver algo, alguma *matéria*, que os mantém na trajetória circular, como no exemplo da funda. Para Descartes, não restam dúvidas de que a experiência comprova que o movimento natural é em linha reta, e não circular. Ele chega mesmo a afirmar que “*experimentamos* isso pelo sentido manual quando giramos a pedra na funda”¹⁰⁰⁹. Ao que tudo indica, Descartes acrescentou os seus estudos sobre o movimento circular a aqueles que Galileu já havia realizado sobre o movimento dos projéteis, e chegou à conclusão de que os corpos permanecem em movimento, como Galileu já argumentara, porém numa linha reta. Em outras palavras, acerca do mesmo dilema que Galileu enfrentara sobre a inércia retilínea ou circular, Descartes, a partir das conclusões dos seus estudos sobre o movimento circular, decidiu-se pela inércia retilínea. Agora, se esses estudos de Descartes sobre o movimento circular estavam corretos ou não é

¹⁰⁰⁸ *Princípios* [João Gama], 39, p.77. Grifos meus. Na tradução de Mahoney: “For example, stone A, rotated in sling EA around circle ABF, at the instant in which it is at point A is determined to motion in some direction, namely along a straight line toward C, such that the straight line AC is tangent to the circle. But one cannot arrange that it be determined to any curved motion; for, even if it previously came from L to A along a curved line, nevertheless nothing of this curvity can be understood to remain in it when it is at point A. *This is also confirmed by experience*, because if it then left the sling it would not continue to be moved toward B, but toward C. From which it follows that everybody that is moved circularly, perpetually tends to recede from the center of the circle it describes. *We experience this by tactile sense* in a stone that we move in a circle with a sling. And, because we will often use this consideration in the things that follow, it should be diligently understood and will be expounded in more detail below”. (Grifos meus)

¹⁰⁰⁹ Grifo meu.

uma outra questão. O fato é que ele acreditou – assim como vários depois dele – que as leis da natureza poderiam ser aceitas como enunciados obtidos da experiência. Isso se confirma igualmente na “terceira lei da natureza”, na qual Descartes apresenta a conclusão a respeito das suas investigações empíricas sobre a conservação da quantidade de movimento dos corpos.

Os estudos de Descartes sobre o movimento circular, entretanto, não precisariam ser obrigatoriamente aceitos como corretos para que se confirmasse a inércia retilínea. Afinal, Descartes estava muito longe de ser um experimentador como Galileu. Mas as elaborações posteriores de Huygens e Newton produziram uma teoria muito mais robusta sobre o movimento circular, que, por fim, abriria caminho para uma conclusão definitiva do princípio da inércia retilínea.

4. Newton

Nas investigações sobre as colisões realizadas por Descartes, Huygens, Newton e outros, a ideia da inércia *retilínea* não precisaria necessariamente ser acatada para se chegar em boa parte das conclusões que foram obtidas. Para analisar o comportamento de um sistema de corpos colidindo numa pequeníssima parcela do globo, tudo o que seria necessário assumir era o movimento uniforme horizontal de Galileu, que, como já vimos, na realidade era circular. Comparada com as dimensões da Terra essa pequeníssima parcela da circunferência seria, naturalmente, retilínea. Assim, os resultados experimentais sobre os impactos tanto de Descartes, quanto Huygens, Newton e outros, caso a inércia retilínea não fosse verdadeira, teriam a mesma validade, porém, somente na superfície da Terra, ao longo dessa linha horizontal que mantém uma distância constante do centro do planeta. A principal conclusão dos estudos de Huygens sobre as colisões, em particular, que aqui eu considero como uma espécie de “princípio da inércia ampliado”, teria validade somente para os corpos colidindo frontalmente na Terra numa direção “horizontal”. Esse “princípio da inércia ampliado” de Huygens estabelece basicamente que na ausência de forças externas, o centro de gravidade de um sistema isolado de corpos – colidindo frontalmente ou não – permanece em repouso ou movimento uniforme em linha reta. Huygens chamou esse princípio de “o mais certo axioma da mecânica”¹⁰¹⁰. Caso fosse admitido como ponto de partida uma inércia galilaica, essa “linha reta” seria necessariamente a “linha horizontal” e, portanto, esse “sistema de corpos”

¹⁰¹⁰Huygens, 1977.

não poderia ser composto por todos os corpos do sistema solar, por exemplo, e menos ainda do universo. O “sistema de corpos” em questão deveria ser um sistema de corpos qualquer em movimento circular uniforme na superfície da terra, ou, no máximo, de algum outro planeta, ou órbita particular. Mas vale notar que mesmo assumindo a inércia retilínea no ponto de partida essa universalização não seria possível.

Para que o princípio da inércia ampliado de Huygens pudesse ser considerado válido para todos os corpos do sistema solar, o movimento do centro de gravidade do sistema deveria se conservar mesmo no caso de choques oblíquos. Obviamente, não existe qualquer restrição quanto à direção dos choques entre os corpos no universo, e, portanto, na ausência de uma abordagem precisa de Huygens para os choques oblíquos, o seu princípio não poderia ser aplicado. Além disso, e principalmente, nem todos os movimentos no universo poderiam ser considerados *uniformes*. O movimento em direção ao centro da Terra, por exemplo, era um caso de movimento acelerado. Possivelmente o movimento em direção ao centro dos outros planetas também seria. Esses corpos acelerados produziriam uma aceleração no centro de gravidade do sistema e, assim, também impediria que o princípio de Huygens pudesse ser estendido para todos os corpos do sistema solar. De qualquer maneira, mesmo se admitindo a inércia retilínea, o princípio de Huygens não poderia ter seu alcance ampliado para muito além das situações em que valeria caso se admitisse uma inércia circular.

As contribuições de Newton para o estudo dos choques, entretanto, foram fundamentais para mudar esse quadro. Considerei duas contribuições decisivas aqui. Sem dúvida, a primeira delas é a segunda lei do movimento. Admitindo somente a inércia *circular* como ponto de partida (que é *retilínea* para uma parcela muito pequena do globo), Newton ainda poderia ter chegado às mesmas conclusões sobre as relações entre a mudança de movimento e a mudança de direção dos corpos. É evidente que essa relação já era um dos pressupostos de Descartes na sua filosofia, mas nem Descartes, nem Huygens, Wallis, ou qualquer outro, conseguiu determinar a relação exata entre a força de um impacto e a mudança de direção gerada por ele.¹⁰¹¹ Na segunda lei do movimento, como sabemos, essa relação exata foi estabelecida. Newton pôde mostrar, com toda a clareza, a proporção precisa da mudança de direção de um corpo depois de um impacto. E com esse resultado ele pôde relacionar as suas conclusões sobre as colisões entre corpos com os estudos do movimento circular, chegando numa sólida teoria que informava as forças necessárias para manter um corpo nesse tipo movimento. Qualquer movimento circular na superfície da Terra seria

¹⁰¹¹ Veja a seção 5.2.

composto de um movimento “horizontal”, e uma força direcionada para o centro, condições que poderiam ser generalizadas para as próprias órbitas circulares dos planetas, colocando em xeque, dessa forma, a compreensão original da premissa “horizontal”, inicialmente assumida. Para usar as próprias regras de Newton, poderíamos dizer que os movimentos circulares planetários são efeitos semelhantes aos movimentos circulares na superfície da Terra, logo deve possuir a mesma causa¹⁰¹². Essa “causa” seria a composição de um movimento “horizontal” e uma força para o centro. Porém, para o caso do movimento dos planetas esse movimento “horizontal” não faz sentido, devendo, portanto, ser assumido como uma linha reta. Tudo indicaria que o movimento natural é em linha reta. Mas ainda assim a possibilidade da inércia circular não estaria complementamente afastada. Essa “linha reta”, eventualmente, ainda poderia ser uma pequena secção de uma enorme trajetória curvilínea, que evidentemente, teria a aparência de uma reta a partir de um ponto de referência determinado. Em última instância, as “linhas retas” das trajetórias no Universo, no final, ainda poderiam ser curvas. Nada garantiria o contrário. Galileu ainda poderia estar certo. É aqui que entra a segunda contribuição decisiva de Newton.

A segunda contribuição de Newton aos estudos dos impactos que considere ter sido decisiva para o estabelecimento definitivo da inércia retilínea está relacionado ao reconhecimento da validade da lei da conservação da quantidade de movimento – a lei da ação e reação – também para as *atrações*.

No experimento do ímã, no escólio das leis das leis do movimento, Newton mostrou que a validade da terceira lei do movimento também para as atrações fazia com que o centro de gravidade dos corpos submetidos a esse fenômeno permanecesse em repouso ou movimento uniforme, como qualquer corpo antes e após o impacto.¹⁰¹³ E uma vez que se admitisse (pelas considerações da seção 5.2.4) uma atração semelhante para os planetas, todos os corpos nas proximidades desses astros, quer orbitando ou movendo-se em direção ao seu centro, teriam o seu centro de gravidade em comum com o planeta, em repouso ou movimento uniforme. Em resumo, as considerações de Huygens sobre o movimento do centro de gravidade de um sistema de corpos não seriam afetadas pelos movimentos acelerados de alguns corpos em direção ao centro dos planetas. Além disso, com as regras oferecidas por Newton para os choques oblíquos na segunda lei do movimento, estaria estabelecido que o princípio de Huygens teria validade não apenas para choques frontais, mas igualmente para choques oblíquos de qualquer natureza. Portanto, adicionando as contribuições de Newton a

¹⁰¹² Regra 2, Livro III dos *Principia*.

¹⁰¹³ Veja a seção 5.2.4.

aquelas já estabelecidas por Huygens, não haveria mais qualquer restrição para o princípio da inércia ampliado do matemático holandês. Na ausência de forças externas, o centro de gravidade de qualquer sistema isolado de corpos – independente de *qualquer tipo* de colisão ou atração entre eles – continuará em repouso ou movimento uniforme em linha reta. E não haveria qualquer restrição para estender esse “sistema de corpos” para todos os corpos do sistema solar ou até mesmo do universo. O centro de gravidade de todos os corpos do universo está em repouso ou movimento uniforme em linha reta. Diante dessa universalização do princípio de Huygens, a “linha reta” aqui, que poderia representar a “linha horizontal” caso fosse assumido a inércia galilaica no ponto de partida, agora, não mais poderia constituir qualquer direção privilegiada, ou menos ainda qualquer órbita circular em particular. Seria um movimento genuinamente retilíneo. Haveria, afinal, pelo menos *um* movimento uniforme em linha reta no Universo, o que justificaria a presença dos demais.

Essa conclusão, não obstante, só poderia ser substantiada mediante a aceitação das atrações planetárias, o que ocorreu efetivamente somente após a elaboração da teoria da gravitação universal. Em síntese, foi com Newton que o princípio *empírico* da inércia retilínea foi definitivamente estabelecido. Mesmo que Newton tivesse partido da inércia galilaica, o estudo dos choques que resultou na segunda e terceira lei do movimento, em associação com a sua aplicação ao movimento circular e às atrações, levariam à uma conclusão de uma inércia retilínea¹⁰¹⁴. A intuição de Descartes, no final das contas, estaria certa.

5. Sobre o fundamento metafísico do princípio da inércia

Para encerrar esse apêndice convém se fazer uma última questão sobre as convicções de Newton acerca dos princípios mais elementares que fundamentam a lei da inércia. Como vimos, é possível defender que a lei da inércia retilínea tem fundamentos empíricos sólidos e que Newton tinha consciência desses fundamentos. Mas a constatação de que na natureza os corpos permanecem em repouso ou movimento uniforme em linha reta não impede que se

¹⁰¹⁴Newton demonstrou consciência disso, de certo modo, quando escreveu sobre as evidências da terceira lei nas atrações, no escólio às leis do movimento. Ele diz que se a ação e reação não fossem iguais nas atrações, o sistema dos dois corpos aceleraria indefinidamente, “o que é absurdo e violaria a primeira lei”. Essa afirmação contrafactual de Newton também poderia ser afirmada de outra forma: se não fosse o caso que o princípio da inércia (retilínea) é válido, então a lei da ação e reação nas atrações não deveria ser observada, e deveriam haver sistemas de corpos que acelerariam indefinidamente, o que é absurdo, e também não se observa. É possível mostrar que esses enunciados são válidos não somente para atrações, mas para colisões. Essas considerações conduzem a conclusão que não apenas a primeira e a segunda lei estão intimamente interligadas. A primeira e a terceira também estão.

pergunte sobre o *por quê* deles se comportarem dessa maneira. É precisamente nesse ponto que penso estar o desacordo entre Newton e Descartes.

Conforme afirmei mais acima, embora Descartes tenha constatado o princípio da inércia provavelmente pelas suas investigações empíricas, ele ofereceu uma explicação metafísica para a permanência dos corpos em repouso ou movimento uniforme em linha reta. O princípio da inércia decorre da “imutabilidade e simplicidade de Deus”. Essas qualidades divinas fazem com que o ser supremo mantenha a quantidade de movimento do Universo constante, então, um corpo, uma vez posto em movimento em linha reta, persistirá continuamente até que um obstáculo o interrompa. Um corpo deve permanecer em repouso ou movimento uniforme em linha reta porque se ele, por si só, alterasse esses estados, estaria alterando a quantidade de movimento total do Universo, o que não pode acontecer, pois se fosse o caso Deus não seria imutável e simples. Em síntese, os corpos permanecem em repouso ou movimento em linha reta porque a quantidade de movimento total do universo é constante. Essa seria a explicação de Descartes para o princípio da inércia. Mas Newton não aceita essa explicação cartesiana. Em vez de aceitar o princípio de Descartes, ou formular algum outro princípio metafísico equivalente, ele prefere explicar esse comportamento dos corpos a partir de uma *propriedade* fundamental da matéria.

Nas seções 5.1.4, 5.2.3 e 5.2.4 foi evidenciado que Newton explica a lei da conservação da quantidade de movimento dos corpos como consequência da terceira lei (i.e., da ação e reação). Mas a terceira lei, por sua vez, surge de um “poder de resistir” observado nos corpos e na matéria, conforme indica a definição 3. Contudo, sendo esse “poder” percebido em todos os corpos no alcance dos experimentos, ele poderia ser generalizado como uma propriedade de todos os corpos universalmente, como nos informa a Regra 3, do Livro III, que no momento vale a pena lembrar:

Regra 3. As qualidades dos corpos que não podem sofrer intensificação nem remissão e que se encontram em todos os corpos no alcance dos experimentos devem ser admitidas como qualidades de todos os corpos universalmente.¹⁰¹⁵

Sem dúvida, Newton entende o “poder de resistir” da matéria como uma propriedade ou uma qualidade dos corpos. Tanto que na explicação da Regra 3 ele o afirma explicitamente:

Percebemos que todos os corpos com os quais lidamos são impenetráveis e, portanto, concluímos que a impenetrabilidade é uma propriedade de todos os corpos universalmente. Que todos os corpos são móveis e perseveram em movimento ou em repouso por meio de certas forças (as quais chamamos de força de inércia) nós inferimos por encontrarmos essas propriedades em todos os corpos que nós temos

¹⁰¹⁵ Tradução minha, do latim.

visto. A extensão, dureza, impenetrabilidade, mobilidade, e a força da inércia do todo resulta da extensão, dureza, impenetrabilidade, mobilidade e força de inércia das partes; e, portanto, concluímos que mesmo as menores partículas de todos os corpos são também extensas, duras, impenetráveis, móveis e dotadas da sua própria força de inércia.¹⁰¹⁶

A *inércia* é uma propriedade da matéria assim como a dureza, a impenetrabilidade, a mobilidade, etc. E essa propriedade consiste num “poder [de todo os corpos] de perseverarem em movimento, ou em repouso”. Todavia, nesse ponto alguém poderia argumentar que o “poder de resistir” da matéria, observado por Newton sobretudo nos experimentos de colisões, não é exatamente a mesma coisa que a persistência dos corpos em manter o seu estado de repouso ou movimento, uma vez que aquele poder se manifestava somente durante a *interação entre dois corpos* e, assim, não poderia ser utilizado para justificar um princípio que se supõe a ausência de interação. Mas acerca disso convém lembrar a Regra 2, do Livro III: “(...) aos efeitos naturais da mesma espécie se deve atribuir, tanto quanto possível, as mesmas causas”.¹⁰¹⁷ Tanto a primeira lei do movimento (que fala sobre a *permanência* em repouso ou movimento na ausência de interação) quanto o “poder de resistir” dos corpos (que fala sobre a *resistência* à mudança de movimento durante a interação) são efeitos que se aplicam para toda a matéria, até as menores partes. Ambos são efeitos que são proporcionais à massa. Ambos são efeitos que ocorrem ao longo de uma linha reta. (No caso das colisões, a força de resistência ocorre precisamente na linha reta que contém a ação da colisão; no caso da primeira lei do movimento, a permanência do movimento ocorre também numa linha reta). Sendo assim, tanto a *resistência* à mudança de movimento da matéria, quanto a *permanência* em repouso ou movimento da matéria, são efeitos semelhantes que devem possuir causas semelhantes, a saber, uma propriedade da matéria que, ao mesmo tempo, dispõe os corpos a continuarem no seu estado de repouso ou movimento uniforme, e exerce uma resistência durante interações que os impelem à mudança desses estados em que se encontram. Para Newton, portanto, a primeira lei do movimento surge de uma propriedade primária da matéria, generalizada com o auxílio das Regras 2 e 3. Por isso, na Definição 3 ele pode relacionar, sem maiores problemas, a *resistência* à mudança dos corpos, por um lado, e a *permanência* em repouso e movimento em linha reta, por outro:

A vis insita, or força inata da matéria, é um poder de resistir por meio do qual todo corpo, do modo em que se encontra, continua no seu presente estado, quer seja repouso, quer seja movimento uniforme em linha reta. Essa força (...) em nada difere da inatividade da massa, mas na nossa maneira de concebê-la. Um corpo, da sua natureza inerte da matéria, não é tirado do seu estado de repouso e movimento sem

¹⁰¹⁶ CW, p.795.

¹⁰¹⁷ Tradução minha, do latim.

dificuldade. Acerca disso, a *vis ínsita* deve ser chamada por um nome mais significativo, a saber, inércia (*vis inertia*) ou força de inatividade.¹⁰¹⁸

Dessas últimas considerações é possível concluir que o apelido “lei da inércia”, que aqui temos usado indiscriminadamente para se referir à lei que afirma a permanência dos corpos em repouso ou em movimento uniforme em linha reta na ausência de interações, caberia propriamente para a primeira lei do movimento de Newton, mas não para a primeira e segunda leis da natureza de Descartes. Para Descartes, o fundamento da permanência dos corpos no seu estado é a conservação da quantidade de movimento do universo. Para Newton, o fundamento é uma propriedade ativa dos corpos de resistirem a qualquer mudança de estado. Uma propriedade que é chamada, ainda que paradoxalmente, de *vis inertia*, ou, simplesmente, *inércia*. Para Descartes, Huygens e outros, *inércia* significava simplesmente inatividade. Expressava a natureza inerte da matéria que não possui qualquer poder para agir ou mesmo manter, por si só, o seu movimento. Por isso, para Descartes, é preciso que Deus mantenha o movimento e a sua quantidade constante. Para Newton, no entanto, Deus não precisa intervir aí. A matéria possui essa propriedade inerente em si mesma.

Newton, portanto, procura manter-se fiel à sua filosofia experimental, e evita incluir considerações metafísica no seu sistema. No entanto, é verdade que esse intuito pode ser considerado como apenas disfarçadamente realizado por Newton. Porque alguém poderia defender que atribuir um “poder causal” para a matéria é, também, construir uma metafísica da natureza. Mesmo que essa metafísica esteja escondida atrás de uma “definição”.¹⁰¹⁹

¹⁰¹⁸ MC, p.2.

¹⁰¹⁹ Pode-se analisar os fundamentos empíricos da lei da inércia de Newton a partir da Regra 4. Antes de Copérnico, as experiências cotidianas mostravam que o movimento ocorria como resultado de uma força ou naturalmente (como no caso dos corpos graves). Pela indução, concluir-se-á que há dois tipos de movimento, sendo um deles gerado por uma força. Depois de Copérnico e com o desenvolvimento da astronomia, percebe-se, contudo, que não há corpo que está rigorosamente em repouso. Todos estão em movimento. Ocorre uma ampliação significativa no campo da experiência. Pela regra 4, as proposições tornam-se “mais exatas”, alterando a sua configuração até chegar no atual princípio da inércia.

APÊNDICE B – O LIVRO II DOS *PRINCIPIA*

O Livro II dos *Principia* é um texto que tem sido frequentemente ignorado pelos estudiosos da ciência. O renomado físico e historiador da ciência Clifford Truesdell observou sem embargo que esta é a “parte dos *Principia* que os historiadores e filósofos, aparentemente, arrancaram das suas cópias pessoais”.¹⁰²⁰ Várias são as possíveis razões para esse fenômeno. Primeiro, porque o próprio Newton recomendou ao leitor dos *Principia* que lesse as primeiras três seções do Livro I e saltasse diretamente para o Livro III. Evidentemente, essa recomendação visava evitar que o leitor desistisse da leitura antes de chegar no ponto principal, uma vez que o próprio Newton admitiu que as partes matemáticas dos dois primeiros livros poderiam ser áridas e entendiantes, principalmente para os leitores não versados no campo da matemática. No entanto, essa observação pode ter sido entendida pelos filósofos e historiadores como uma espécie de *pronunciamento oficial* do autor de que não havia nada de muito importante para ser considerado no Livro II. Em segundo lugar, o Livro II pode ter sido ignorado pelos estudiosos porque a maior parte do seu conteúdo aparenta ter pouca relação com o tema principal dos *Principia*. Sem contar com as últimas páginas que Newton de fato discorre sobre os vórtices, a maior parte desse livro, à primeira vista, tem pouca conexão com o restante da obra, parecendo mais uma coletânea de estudos aleatórios sobre o que hoje talvez chamássemos de “mecânica dos fluidos”. Certamente, essa aparente falta de conexão com o tema principal da obra contribui para o desinteresse por essas páginas.

Em terceiro lugar, o Livro II pode ter sido largamente ignorado, não apenas porque o tema dos seus estudos aparenta ter pouca relação com o restante da obra, mas porque nele Newton se aventurou num campo ainda não desbravado, sem uma sólida tradição de pesquisa, e desconhecido pela maioria dos seus contemporâneos. Somente cerca de um século depois, Bernoulli, d’Alembert, Euler e os seus sucessores desenvolveram o campo pioneiro introduzido pelo Livro II e, ainda assim, chegaram em conclusões que não favoreceram os estudos de Newton. Conforme declara Truesdell, o Livro II dos *Principia* é “quase totalmente original (...) e a maior parte dele é falso”.¹⁰²¹ Além disso, os estudos são altamente hipotéticos e muitas hipóteses são manifestamente bem distantes do que se observa na experiência. Essa

¹⁰²⁰ Truesdell, C. *Reactions of Late Baroque Mechanics to Success, Conjectures, Error, and Failure in Newton’s Principia*, apud. Cohen, 1999, p.162.

¹⁰²¹ Truesdell, C. *A Program toward Rediscovering the Rational Mechanics of the Age of Reason*, apud Cohen, 1999, p.162.

parte dos *Principia* seria, portanto, uma espécie de “tendão de Aquiles” da obra magna de Newton; de fato, deveria ser simplesmente esquecida.

Em quarto lugar, o Livro II pode ter sido largamente ignorado porque ele foi sistematicamente mal compreendido ao longo dos anos. A começar pelo seu tema. George Smith esclarece que, embora essa parte dos *Principia* tem sido frequentemente considerada como um trabalho de “mecânica dos fluidos”, ela deveria ser “mais precisamente descrita como um estudo sobre um tópico particular no interior dessa disciplina, qual seja, a resistência dos fluidos”. E boa parte das críticas desfavoráveis que têm sido levantadas ao Livro II surgem “de se considerar o seu tema como mecânica dos fluidos (no sentido de Euler, d’Alembert e seus sucessores) em vez de se considerar a resistência dos fluidos”.¹⁰²² Ao considerar o seu tema de modo mais preciso, logo se destacam várias contribuições significativas de Newton a esse campo específico, e algumas críticas perdem o seu sentido e relevância.¹⁰²³

Mas em quinto e último lugar, além da incompreensão acerca do tema do Livro II, acrescento também uma incompreensão sobre o *objetivo* desses estudos nos *Principia*. Os conteúdos abordados no Livro II, embora muitos deles originais, estavam estritamente ligados a temas de interesse na época.¹⁰²⁴ No entanto, a leitura que ofereço a esse livro é que ele consiste num compêndio de estudos complementares às investigações dos movimentos planetários e da gravidade, ou seja, diretamente ligados ao tema central dos *Principia*. Esses estudos teriam sido realizados principalmente com o objetivo específico de testar algumas possíveis hipóteses relacionadas direta ou indiretamente com o movimento planetário. Por conseguinte, esse livro seria parte fundamental do projeto dos *Principia*, uma vez que complementaria os fundamentos das posições de Newton a favor de um espaço interplanetário livre de resistência, e a favor da hipótese da atração dos planetas. O objetivo específico de Newton justificaria porque os estudos do livro se concentram na “resistência dos fluidos”, e não na tentativa de se fazer uma “mecânica dos fluidos”. Também justificaria o caráter altamente hipotético do livro, e a sua aparente despreocupação com a correspondência dessas hipóteses com a realidade; com efeito, o objetivo seria investigar especificamente se haveria alguma possibilidade, mesmo remota, de um meio resistente interplanetário ser eventualmente também responsável pelo movimento dos planetas em suas órbitas, mesmo que esse meio

¹⁰²² Smith, 1999.

¹⁰²³ Recomendo a leitura do artigo de Smith, 1999, se o leitor quiser se inteirar dessas contribuições. Aqui esse não será o meu foco principal.

¹⁰²⁴ Compare, por exemplo, os temas do Livro II com os temas investigados por Hooke (1705). O Livro II também contempla temas matemáticos trabados por Huygens e Wallis, relacionados a resistência dos fluidos. Veja Guicciardini, 1999.

tivesse propriedades que se afastassem daquelas que poderiam ser observadas nos fluidos conhecidos.

Realizados esses comentários iniciais podemos passar ao esboço do Livro II a partir da perspectiva apresentada no parágrafo anterior. Dessa perspectiva, as nove seções desse livro podem ser divididas, grosso modo, em duas grandes partes, de acordo com as hipóteses que se propõem a testar. A primeira parte seria composta das seções 1-6, nas quais se estaria apresentando uma coletânea de estudos sobre os fluidos *estáticos*, cujo principal objetivo – ou um dos principais objetivos – seria testar a hipótese da ocorrência de uma força centrípeta de causa desconhecida atuando nos planetas, porém com a existência simultânea de um meio estático resistente entre os planetas. Como veremos a seguir, provavelmente essa investigação foi ensejada pelo problema das irregularidades do movimento da Lua, aqui já exposto na apresentação da proposição 3 do Livro III.¹⁰²⁵ A segunda parte seria composta das seções 7-9, nas quais se estaria apresentando estudos sobre os fluidos *em movimento*. O objetivo principal dessas últimas seções seria testar propriamente a hipótese vibratória de Hooke e a hipótese cartesiana dos vórtices, provavelmente por ocasião das reflexões que se materializaram na proposição 5 do Livro III.¹⁰²⁶

Meio resistente estático

Sobre a primeira parte do Livro II, os estudos da seção 1 possivelmente são os únicos que já haviam sido elaborados antes do momento da composição final dos *Principia*. Eles foram publicados na forma de duas proposições no tratado *De Motu*, submetido à *Royal Society* em 1684. Newton procurou oferecer um tratamento matemático para o movimento dos corpos em meio resistentes supondo uma resistência proporcional à velocidade do corpo. Provavelmente Newton tinha em vista uma análise matemática da força de resistência do ar no movimento dos projéteis. Conforme Smith nos lembra, no *Discorsi* Galileu afirmou que “uma ciência da resistência dos fluidos jamais poderia ser construída porque muitos fatores díspares estavam envolvidos”.¹⁰²⁷ Aparentemente, Newton não se intimidou com as dificuldades envolvidas na construção dessa ciência e procurou evidenciar os primeiros passos para a sua efetivação. Possivelmente por essa razão os estudos dessa primeira seção parecem

¹⁰²⁵ Seção 10.3.

¹⁰²⁶ As reflexões referidas surgem na redação do Livro III na proposição 5, no entanto, é evidente que elas podem ter se originado antes da composição desse Livro. Na verdade, elas *realmente* se originaram antes disso. Numa das últimas versões do tratado *De Motu*, provavelmente escrito em 1685, Newton demonstra ter assumido a posição que incorporou posteriormente na proposição 5. Veja a seção 10.5.

¹⁰²⁷ Smith, 1999.

se relacionar mais como os objetivos do tratado *De Motu* do que com aqueles mais amplos dos *Principia*. O título completo da terceira versão do tratado *De Motu* (na classificação de Herivel) é *De Motu Sphaericorum Corporum in Fluidis (Sobre o Movimento de Corpos Esféricos em Fluidos)*.¹⁰²⁸ Essa versão do tratado é dividida em duas seções: “O movimento dos corpos em meios não resistentes” e “O movimento dos corpos em meios resistentes”. Newton deixa claro ao longo do tratado que ele assume que há um *meio* no espaço interplanetário, no entanto que esse *meio* oferece nenhuma ou pequeníssima resistência ao movimento dos corpos. Em contrapartida, próximo à superfície da Terra o ar oferece uma resistência significativamente maior e, portanto, na maior parte dos casos, não pode ser desprezada. O projeto do *De Motu*, por conseguinte, pretende investigar o movimento dos corpos nesses meios dois meios, um suposto e o outro evidenciado pela experiência direta.

Após o início da composição dos *Principia* é bem possível que Newton ainda estivesse caminhando nessa mesma direção. Ele deve ter percebido a necessidade de se aprofundar nos estudos sobre o movimento dos corpos no ar. Teria desenvolvido, então, os estudos das seções 2 e 3. Enquanto o objetivo da seção 1 era investigar as consequências matemáticas de um corpo se movendo num meio resistente em que a força de resistência fosse proporcional à velocidade do corpo ($F_{resis} \propto v$), o objetivo proposto para a seção 2 era investigar as consequências matemáticas quando essa força de resistência fosse proporcional ao quadrado da velocidade ($F_{resis} \propto v^2$). Já a seção 3 propôs uma investigação das consequências matemáticas de um corpo se movendo num meio resistente em que a força de resistência fosse parcialmente proporcional a velocidade e parcialmente proporcional ao quadrado da velocidade.

Essa última suposição de força de resistência que Newton oferece na seção 3 é bastante intrigante. É difícil imaginar o que Newton tem em mente. Mas o que parece certo que é nesse ponto Newton já está extrapolando os limites dos objetivos estritamente delineados pelo *De Motu*, qual sejam, de se investigar os movimentos dos corpos no ar. A simples leitura da seção 3 fornece uma forte impressão de que o objetivo não é mais puramente investigar as propriedades de um fluido conhecido. Ao que parece, está se investigando as *possibilidades matemáticas* de haver um meio resistente qualquer, mesmo desconhecido, em que seja permitido a um corpo descrever certos tipos de trajetórias. Talvez uma proposição bastante iluminadora nesse sentido seja a proposição 10 da seção 2, em que Newton propõe o seguinte problema:

¹⁰²⁸ Veja Herivel, 1965. Veja também o *MP*, vol. 7.

Proposição 10. Suponha uma força da gravidade uniforme tendendo diretamente em direção ao plano horizontal, e suponha que a resistência seja proporcional à densidade do meio e ao quadrado da velocidade conjuntamente; é requerido que se encontre, em cada lugar individual, a densidade do meio que faz com que o corpo se mova em qualquer trajetória curva, e também a velocidade do corpo, e a resistência do meio.¹⁰²⁹

Naturalmente, esse problema se trata de um puro exercício de mecânica racional. Um exercício no qual se procura encontrar as características de um meio resistente em que fosse possível aos corpos descreverem certas trajetórias, a despeito de questões relativas ao conhecimento da existência concreta de um tal meio, ou mesmo da plausibilidade da existência de um tal meio na natureza. Em suma, a natureza não está em primeiro plano aqui. São as *possibilidades matemáticas* que estão em questão. A esse respeito, no desenvolvimento da proposição 10, no corolário 2, Newton apresenta o “Exemplo 1”, no qual se requer que seja encontrada a densidade de um meio que faria um projétil, sob a ação da gravidade, mover-se num semicírculo. A conclusão da solução desse problema merece ser destacada:

Então, a desidade do meio seria $-\frac{a}{e}$. Mas a natureza não admite uma desidade negativa, ou seja, uma densidade que acelera o movimento dos corpos; e portanto não é possível que ocorra naturalmente que um corpo (...) descreva o quadrante PF de um círculo. Porque para esse efeito o corpo teria de ser acelerado por um meio impulsionador, e não contido por um meio resistente.¹⁰³⁰

Newton chega a conclusão que para um projétil se movendo sob a ação da gravidade num meio resistente descrever um semicírculo, em vez de *resistir* esse meio deveria *impulsionar* ou *acelerar* o corpo, o que evidentemente viola a suposição inicial, e se constitui num absurdo. Essa passagem mostra bem o espírito do empreendimento do Livro II na transição dos estudos do *De Motu* para os *Principia*. Investigar as *possibilidades matemáticas* de um suposto meio resistente, ainda que pouco identificado em suas características físicas contingentes. Essas características, com efeito, parecem ser o que menos importa. Os estudos se concentrariam numa exploração livre dos limites matemáticos dessa suposição.

Esses detalhes tem uma importância destacada nas discussões sobre o método na *Parte 4* desse trabalho. Presentemente, é suficiente ressaltar que na seção 3 aparentemente já se está em consideração a possibilidade matemática de uma órbita estável mesmo em um meio resistente, o que é objeto mais abertamente da seção 4.

Mesmo percebendo todo o potencial da hipótese de Hooke (assumindo um éter interplanetário com resistência nula ou desprezível), Newton logo se deparou com uma

¹⁰²⁹ CW, p.655.

¹⁰³⁰ Ibid., p.661.

violação clara da lei do inverso do quadrado para o caso da Lua. Na proposição 3 do Livro III foi determinado que para a órbita da Lua sofrer uma precessão, esse astro deveria estar submetido a uma força ligeiramente diferente do inverso quadrado. Em outros termos, ou a lei do inverso quadrado não seria válida, ou algum fator estaria causando uma distorção na órbita da Lua. Naturalmente, a “ação do Sol”, ou a *atração* do Sol, poderia ser uma das hipóteses explicativas para essa discrepância. Todavia, essa não era a única hipótese. Seria igualmente razoável supor que essa distorção na órbita da Lua decorreria precisamente de uma resistência do éter que poderia não ser tão desprezível quanto se supunha, ou mesmo que essa resistência poderia variar segundo alguma lei desconhecida, sendo por essa razão percebida mais intensamente pela Lua do que pelos satélites de Júpiter e Saturno, por exemplo. A adoção desse entendimento sobre os problemas enfrentados por Newton na investigação das irregularidades do movimento da Lua servem com uma possível chave para a compreensão das seções 4 e 5.

Uma possível tradução para o título da seção 4 é “o movimento orbital dos corpos em meios resistentes”.¹⁰³¹ Em um primeiro contato com o texto, o leitor pode ficar confuso tentando entender porque Newton aborda apenas corpos que descrevem órbitas espirais. Na proposição 15, por exemplo, Newton propõe um teorema que considera um corpo descrevendo uma espiral, submetido a uma força centrípeta proporcional ao quadrado da densidade do meio, supondo que essa densidade, por sua vez, varie com o inverso da distância a partir de um centro imóvel. É difícil conceber algum propósito para desenvolver um teorema tão arbitrário quanto esse. Entretanto, se partirmos do entendimento que ele está procurando resolver algum problema concreto relativo ao movimento dos planetas, é possível perceber algumas pistas. Logo na sequência da proposição 15 se percebe que ele está desenvolvendo um estudo paralelo ao movimento de um corpo que descreve uma órbita circular submetido a ação de uma força centrípeta proporcional ao quadrado da distância num meio não resistente.¹⁰³² Nesse momento é possível tentar imaginar um sentido para as elucubrações matemáticas de Newton.

Com alguma manipulação algébrica podemos perceber que se a força centrípeta é proporcional ao quadrado da densidade, e a densidade é proporcional ao inverso da distância a partir de um centro, então temos que a força centrípeta é proporcional ao inverso do quadrado da distância até esse centro. O resultado dessa manipulação indica que aparentemente o teorema que Newton apresenta na proposição 15 teria sido de fato formulado a partir de um

¹⁰³¹ Na tradução do Cohen: “The revolving motion of bodies in resisting mediums”.

¹⁰³² Veja, por exemplo, o cor. 1 e 4 da prop. 15.

problema mais concreto. Um problema acerca da órbita percorrida por um corpo sujeito a uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância a partir de um centro, mas imerso num meio resistente com densidade variável, de tal modo que essa densidade varie na razão do inverso da distância até o centro de força.

Esse problema se ajusta à hipótese do éter ter uma densidade variável numa razão qualquer, crescendo a medida que se aproxime dos centros de força, como da Terra ou do Sol.¹⁰³³ Isso seria razoável também em razão da ação da própria força centrípeta: ela atuaria igualmente nos corpúsculos que compõem o ar e o éter, que se acumulariam nas proximidades daqueles centros de força. Esse acúmulo de matéria nas proximidades dos centros de força poderia justificar uma força de resistência na Lua levemente maior que nos satélites de Júpiter ou Saturno, porém suficiente para gerar algumas irregularidades no seu movimento. Mas Newton logo teria percebido que sob qualquer condição, num meio resistente, um corpo se movendo sob ação de uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado descreverá inevitavelmente uma espiral. Mesmo submetido a uma pequeníssima resistência, a alteração do movimento inercial retilíneo dos planetas iria impedir que eles mantivessem uma órbita estável.

O leitor pode se perguntar porque Newton não teria informado os seus propósitos nesses estudos. A resposta seria simples. Ao se convencer que a hipótese era falsa, não haveria razão em incluir considerações a esse respeito. Esses estudos teriam servido principalmente para enfraquecer a sua crença da possibilidade de alguma outra explicação para as irregularidades do movimento da Lua, e igualmente para enfraquecer a sua crença num meio significativamente resistente no espaço interplanetário. Não obstante, Newton teria posteriormente organizado esses estudos no Livro II para publicá-los como livres exercícios de mecânica racional. Esses exercícios, por si só, já teriam o seu valor.

Os estudos da seção 5 também parecem admitir uma chave interpretativa semelhante à sugerida nos parágrafos anteriores. Nessa seção Newton oferece uma discussão sobre a força de pressão ou “compressão” nos fluidos estáticos.¹⁰³⁴ Ao longo da seção ele desenvolve, sem fazer referência direta, o antigo princípio da *impulsão* de Arquimedes (hoje conhecido como *empuxo*). Na formulação de Arquimedes esse princípio afirmava que todo corpo submerso num fluido estático estaria sujeito a uma força vertical igual ao peso do fluido deslocado. Newton analisa esse conhecido fenômeno presente nos corpos submerso em termos da sua

¹⁰³³ Hooke também supôs um éter com densidade variável. O calor do Sol, por exemplo, faria o éter ter uma densidade menor nas suas proximidades. Veja *Of Comets and Gravity*, em Hooke, 1705.

¹⁰³⁴ O título da seção 5 é “A densidade a compressão dos fluidos, e a hidrostática”, na tradução do Cohen.

noção de “força de compressão” num fluido. Nesse ponto o leitor dos *Principia* pode ficar igualmente intrigado, tentando imaginar qual a relação dessa investigação com o restante da obra. No entanto, mais ao final dessa seção surgem algumas pistas dessa relação. A primeira delas é uma explicação para a ideia de *levidade* dos corpos. A *levidade* era um conceito aristotélico precisamente complementar à antiga ideia de *gravidade*, sendo o primeiro conceito um resultado da tendência natural dos corpos *leves* para retornarem ao seu lugar natural em camadas mais afastadas do centro da Terra, e o segundo, uma tendência natural dos corpos *graves* em retornarem ao seu lugar natural no centro da Terra. Newton explica essa *força de levidade* dos corpos, em termos da força de compressão que há em qualquer fluido e, no caso presente, no ar. No corolário 6 da proposição 20 Newton apresenta as suas conclusões a esse respeito:

A gravidade dos corpos nos fluidos é, portanto, dupla: uma, verdadeira e absoluta; a outra, aparente, comum, e relativa. A gravidade absoluta é toda força com a qual um corpo tende para baixo; a gravidade relativa ou comum é o excesso da gravidade com a qual o corpo tende para baixo mais do que o fluido circundante (...). O peso como comumente concebido é nada mais do que o excesso do peso verdadeiro além do peso do ar. Os corpos comumente chamados de leves são aqueles menos pesados do que o ar circundante e, na medida em que cedem ao ar, que gravita mais, se movem para cima. Eles são, entretanto, apenas comparativamente leves, e não verdadeiramente, uma vez que descendem no vácuo.¹⁰³⁵

Admitindo que há uma força direcionada verticalmente para baixo – o peso dos corpos – e que há um meio que circunda os corpos na superfície – o ar – segue-se que os corpos menos pesados que o ar sofrerão uma força vertical para cima em virtude da pressão desse fluido.¹⁰³⁶

É evidente que as considerações anteriores fazem parte de um quadro mais amplo em que Newton está percorrendo as múltiplas variáveis envolvidas no esclarecimento das noções vinculadas à força da gravidade que atua nos corpos. A explicação da *força de levidade* é uma das tarefas relacionadas à construção desse quadro mais amplo. Nada obstante, há uma segunda pista acerca da conexão dessa seção com o contexto do movimento planetário que me parece ainda mais pertinente.

Logo nos dois corolários seguintes (cor. 7 e 8) os objetivos “mais amplos” de Newton parecem se manifestar. Ele afirma que “o que foi demonstrado concernente à gravidade é válido para qualquer outra força centrípeta”. Esses corolários afirmam que se um corpo estiver imerso num fluido estático nas proximidades de um planeta ele sofrerá uma *força centrífuga* em decorrência da força de compressão do fluido. Em outros termos, a *força*

¹⁰³⁵ CW, p.691.

¹⁰³⁶ O “peso” referido por Newton aqui é o “peso específico”, que está relacionado à densidade do corpo, e que ele introduziu anteriormente na seção.

centrípeta será combinada com uma “força estranha” oposta a ela. Ora, nos estudos sobre as irregularidades do movimento da Lua, Newton havia identificado que uma pequena “força estranha” adicionada a uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância seria capaz de gerar um movimento observado de precessão da órbita da Lua. Portanto, a *força de empuxo* de um meio nas proximidades da Terra poderia ser responsável pelas irregularidades no movimento da Lua. Evidentemente, ele não apresentou qualquer elaboração nesse sentido. No entanto, uma vez desenvolvidas as noções dessa seção, não seria difícil obter uma conclusão a esse respeito. Seria possível mostrar que a força centrífuga sofrida pela Lua em virtude do empuxo hidrostático do ar está para a sua força centrípeta em direção ao centro da Terra assim como a densidade da Lua está para a densidade do ar. Usando os dados atuais para a densidade da Lua e do ar podemos concluir que a *força de empuxo* está para a força centrípeta assim como 1 está para 2630. Isso significa que, ainda que o ar (com o mesmo peso específico que ele tem na superfície da Terra) chegasse até a Lua, ele não seria capaz de gerar o movimento dos *apsides* que se observa na órbita desse satélite. Muito provavelmente, não seria capaz de gerar qualquer alteração observável.¹⁰³⁷

A partir da chave interpretativa mencionada mais acima, portanto, é possível oferecer uma compreensão da conexão desses estudos de Newton com o restante da obra. Na investigação de hipóteses explicativas relacionadas às irregularidades do movimento da Lua, e a suposta resistência do éter, Newton teria ingressado em estudos que lhe renderam importantes investigações paralelas, algumas dotados de inequívoco valor particular, razão pela qual mereciam ser publicadas à despeito de não terem logrado êxito no suposto objetivo ao qual originalmente se propunham.

A última seção que se relaciona com a primeira parte da divisão sugerida para o Livro II é a seção 6, na qual, dentre outras coisas, Newton se propõe a uma tarefa de tentar mensurar a magnitude da resistência do ar. A relação dessa seção específica com tema principal dos *Principia* é mais óbvia. No escólio das leis do movimento, no qual Newton descreve os seus experimentos de colisão entre corpos usando pêndulos, e destaca o método utilizado “mensurar” a resistência do ar, para assim desconsiderá-la nas colisões. Na seção 6 do Livro II, Newton revela uma série de experimentos usando um pêndulo simples e a teoria do pêndulo cicloidal de Huygens na tentativa de determinar a força de resistência do ar. Deve haver poucas dúvidas de que esses estudos da seção 6, mesmo não sendo totalmente acabados,

¹⁰³⁷ Como foi mencionado na seção 10.3, para gerar um movimento de precessão de cerca de 3 graus por revolução seria necessário uma força estranha 178 vezes menor que a força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado da distância.

tiveram um papel importante na investigação que levou às conclusões de Newton sobre as leis das colisões entre os corpos. Além desses estudos sobre a resistência do ar, tudo indica que foram os estudos da seção 6 que o levaram à sua noção mais acabada da distinção entre peso e massa, sobretudo pela determinação precisa da proporcionalidade entre essas duas quantidades, com o auxílio de experimentos com pêndulos – um experimento que já havia sido sugerido por Hooke.¹⁰³⁸

É importante notar que, visto que uma grande parte dos experimentos de Newton sobre o movimento são realizados com corpos imersos no ar, para que ele pudesse aplicar esses resultados numa situação em que é suposto um vácuo, ou um éter não resistente, seria preciso minimamente desenvolver uma teoria sobre os meios resistentes. Em grande medida é isso o que parece ser um dos objetivos centrais das primeiras seis seções do Livro II. Desenvolver uma teoria sobre os meios resistentes. E isso, aparentemente, mais pela demanda exigida pela própria pesquisa do que pela necessidade de oferecer conclusões sobre esse assunto ao leitor.

Meio resistente em movimento

Na segunda parte do Livro II, nas seções 7-9, os estudos matemáticos apresentados seriam derivados dos esforços de Newton para testar a hipótese vibratória de Hooke, e a hipótese cartesiana dos vórtices, por ocasião das reflexões que culminaram na proposição 5 do Livro III. Trata-se de uma temática não mais relacionadas aos fluidos em repouso, mas aos fluidos em movimento. A seção 7 consiste mais no desenvolvimento de alguns estudos preliminares para encaminhar os testes das referidas hipóteses (nas seções 8 e 9), principalmente a hipótese dos vórtices. Essa seção é intitulada “o movimento dos fluidos e a resistência encontrada pelos projéteis”.

A seção 7 inicia evidenciando o resultado que a resistência que um corpo em movimento sofre de um fluido em repouso é igual a força que o mesmo corpo em repouso sofre do fluido em movimento, o princípio básico do atual “túnel de vento” utilizado para testes aerodinâmicos. A partir desse resultado ele estuda a resistência oferecida por corpos de formas arbitrárias, e chega no celebrado resultado do *sólido de mínima resistência*.¹⁰³⁹ Num escólio referente à última proposição dessa seção Newton apresenta uma impressionante sequência de 14 experimentos relacionados ao problema proposto pela proposição 40: “Encontrar a partir dos fenômenos a resistência de uma esfera se movendo em linha reta num

¹⁰³⁸ Veja *Of Comets and Gravity*, em Hooke, 1705.

¹⁰³⁹ Veja Cohen, 1999, p.191.

meio bastante fluido e comprimido”. Na descrição detalhada do experimento Newton esclarece que esse “meio bastante fluido e comprimido” é “água de chuva”. E a “esfera se movendo em linha reta” se trata de uma esfera em queda livre. Portanto, a proposta de Newton na proposição 40 é investigar empiricamente a resistência sofrida por uma esfera em queda livre na água. Os 14 experimentos do escólio acrescentam outras variações ao experimento proposto pela proposição 40, considerando a queda dos corpos também no ar e em mercúrio. Vale ressaltar a conclusão geral da seção, depois da análise dos 14 experimentos sobre a queda dos corpos nos fluidos:

Projéteis, é claro, provocam movimento nos fluidos ao atravessá-los, e esse movimento surge do excesso de pressão do fluido na frente do projétil em comparação com a pressão atrás, e não pode ser menor, em meios infinitamente fluidos, do que no ar, água, mercúrio na proporção da densidade da matéria de cada um. E esse excesso de pressão, na proporção da sua quantidade, não apenas produz movimento no fluido, mas também age no projétil a retardar o seu movimento; e portanto a resistência em cada fluido está como o movimento excitado no fluido pelo projétil, e ela não pode ser menor no mais sutil éter, na proporção da densidade do éter, do que é no ar, água, e mercúrio, na proporção das densidades desses fluidos.¹⁰⁴⁰

Com essas palavras Newton conclui o seu longo escólio à proposição 40 e encerra a seção 7. Sobre o fundamento dessa conclusão ele desenvolverá as seções 8 e 9.

A seção 8 do Livro II trata do “movimento propagado por meio de fluidos”. Nela Newton investiga o que hoje chamaríamos de *fenômenos ondulatórios*. Frequentemente o foco dos historiadores nessa seção recai sobre o erro de Newton na determinação da velocidade do som, corrigido por Laplace cerca de um século depois. Não é minha intenção considerar essa questão aqui. Conforme já foi mencionado, a leitura que ofereço para essa seção é que o seu objetivo primário seria testar a hipótese vibratória de Hooke. Não propriamente a hipótese precisa que Hooke formulou, mas qualquer hipótese que utilizasse um princípio semelhante, e que fosse minimamente possível do ponto de vista físico e matemático.

Conforme mencionado na seção 7.1, Hooke antecipou em grande medida o princípio da gravitação universal de Newton. Todavia, assim como os seus contemporâneos, ele julgava necessário a especificação do *mecanismo* ou do *modo de operação* desse poder para que se pudesse defender uma genuína explicação dos fenômenos envolvidos. Hooke desenvolveu, portanto, uma explicação da gravidade em termos de uma “teoria vibratória”.¹⁰⁴¹ No seu

¹⁰⁴⁰ CW, p.761.

¹⁰⁴¹ Centore, p.103.

Dicourse on the nature of Comets, lido em um encontro da *Royal Society* em outubro de 1682, o filósofo natural teve a oportunidade de apresentar uma teoria completa sobre a causa da gravidade diferente de todas as outras até então conhecidas. Após rejeitar todas as teorias anteriores sobre a causa da gravidade e apresentar uma coletânea de fenômenos relacionados com esse tema, Hooke afirmou que os dois grandes princípios universais da natureza eram a Luz e a Gravidade.¹⁰⁴² E ambos poderiam ser explicados por meio de “corpos vibratórios”. Na verdade, ele mostra como tanto a luz, quando a gravidade e o som poderiam ser explicados por meio de um único princípio relacionado à vibração dos corpos.

Especificamente sobre a gravidade, Hooke afirma que a gravidade da Terra “pode ser causada por um certo movimento das partes internas ou centrais da Terra”, e que esse “movimento interno e central deve ser causado, gerado e mantido pelo movimento de todas as partes intermediárias e externas do seu corpo (...)”. Ele oferece vários simples experimentos mecânicos que mostram como uma fonte vibratória pode gerar pulsos que por sua vez produzem um movimento de outros corpos em direção à fonte vibratória. “Esse pulso propagado”, afirma Hooke, “eu considero ser a causa da queda dos corpos em direção a Terra”.¹⁰⁴³ Por fim ele conclui com uma descrição detalhada do mecanismo:

Suponha, então, que no globo da Terra tal movimento, que por uma questão de distinção chamarei de Movimento Globular, por meio do qual todas as partes tem uma Vibração em direção e em afastamento do centro, ou de expansão e contração; e que este movimento de vibração é muito curto e rápido, como o é em todos os corpos muito curtos e compactos; que esse movimento de vibração comunique ou produza um movimento numa certa parte do éter, o qual está nos interstícios dessas partes sólidas vibratórias; tal movimento comunicado causa uma vibração nesse fluido intersticial em todas as direções para o centro e afastado-se dele, em linhas radiais a partir do mesmo. Pela vibração radial desse meio extremamente fluido e dessa matéria extremamente densa, não apenas todas as partes da Terra são carregadas ou forçadas em direção ao centro, mas esse movimento continua pelo éter que permeia o ar e outros tipos de fluidos, causando também neles uma tendência em direção ao centro; e muito mais em qualquer outro corpo sensível, que está posicionado em qualquer lugar no ar, ou acima dele, mesmo a uma vasta distância (...).¹⁰⁴⁴

Hooke forneceu, portanto, um *mecanismo* para a causa da gravidade. Conforme afirma Centore, na explicação do curador não havia necessidade de postulação de qualquer tipo de “atração”, mesmo no sentido de “uma ação magnética ou algum tipo de apetite animístico”. Essa linguagem poderia ter um valor metafórico no discurso coloquial mas não tinha qualquer sentido científico. “A causa – a real, concreta, causa física – é nada mais do que uma série de

¹⁰⁴² Hooke, 1705, p.175.

¹⁰⁴³ Ibid., p.185.

¹⁰⁴⁴ Ibid., p. 184.

rápidas vibrações iniciando dos corpos densos e sendo comunicadas ao éter”.¹⁰⁴⁵ A gravidade é originada a partir de um “corpo vibratório” imerso no éter.¹⁰⁴⁶

Diante dessas observações sobre a hipótese vibratória de Hooke é interessante notar que logo no início da seção 8 do Livro II dos *Principia* (na prop. 43), Newton se propõe a examinar os efeitos produzidos por um suposto “corpo vibratório” imerso num “meio elástico” e num “meio não elástico”.

Proposição 43. Todo corpo vibratório num meio elástico propagará o movimento de pulsos em linha reta em todas as direções, mas em meios não elásticos produzirá um movimento circular.¹⁰⁴⁷

A questão que aparentemente norteia a proposição de Newton poderia assim ser resumida: caso houvesse um “corpo vibratório” imerso num fluido, quais seriam os efeitos ondulatórios produzidos? A resposta oferecida está no corpo da proposição: em meios elásticos serão gerados pulsos que se moverão em linha reta em todas as direções; em meios não elásticos se produzirá “um movimento circular”.

Também nessa seção o leitor poderia ficar intrigado tentando imaginar a finalidade dessas suposições de corpos vibratórios em “meios elásticos” e não “não elásticos”. Como já foi mencionado, em vários momentos do Livro II ele parece estar lidando com hipóteses totalmente arbitrárias.¹⁰⁴⁸ Mas assumindo que o seu objetivo seja testar a hipótese de Hooke, ou qualquer outra possibilidade de uma fonte vibratória gerar uma força centrípeta ou um movimento orbital, algumas das suposições de Newton nessa seção podem fazer mais sentido. Por exemplo, na primeira proposição da seção (prop.41) ele investiga a possibilidade da “pressão” ser propagada ao longo de “linhas retas” num fluido. Ele conclui que a única possibilidade seria se as partículas que compõem o fluido permanecessem em linha reta. Mas na proposição seguinte ele mostra que “todos os movimentos propagados por um fluido divergem de um caminho em linha reta”. Então, ao que tudo indica a hipótese vibratória de Hooke parece ser improvável. No entanto, Newton aparentemente procura alguma possibilidade matemática de um corpo vibratório imerso num fluido gerar algum tipo de movimento que possa justificar as órbitas planetárias. Isso seria possível numa circunstância em que operasse um “fluido não elástico”, ou talvez melhor dizendo, numa circunstância em que o éter fosse um “fluido não elástico”.

¹⁰⁴⁵ Centore, p.104.

¹⁰⁴⁶ Hooke também usou a expressão “corpo vibratório” (*vibrating body*). Hooke, 1705, p.9.

¹⁰⁴⁷ CW, p.765.

¹⁰⁴⁸ Cohen (1999, p.185) afirma que em *History of the Inductive Sciences from the Earliest to the Present time*, Whewell lembra que Bernoulli admitiu não ser capaz de entender a seção 8 do Livro II.

Newton, no entanto, não prossegue desenvolvendo corolários sobre esse caso. O corolário único que oferece a essa seção de fato sugere que ele está rejeitando alguma ideia, porém não fica muito claro qual seria. Ele afirma: “Portanto, é uma ilusão acreditar que a agitação das partes da chama conduz à propagação de uma pressão ao longo de linhas retas através de um meio circundante. Uma pressão desse tipo deve ser derivada não apenas da agitação das partes da chama, mas da dilatação do todo”. Não fui capaz de encontrar qualquer esclarecimento anterior de Newton acerca da “chama” que ele se refere nesse corolário. Todavia, fica claro que a preocupação de Newton está relacionada com as condições para a propagação da pressão ao longo de um certo meio.

Embora seja difícil ter uma ideia mais certa acerca das verdadeiras intenções de Newton com os estudos dessa seção, parece bastante verossímil que a sua intenção esteja ao menos parcialmente relacionada com a hipótese de que a vibração de um corpo poderia ser responsável pela causa da gravidade. Desse ponto de vista, as investigações da seção sobre os fenômenos ondulatórios teriam eliminado também essa possibilidade, pois se houvesse qualquer indício da geração de uma força em direção ao corpo vibratório, como Hooke supôs, seria altamente improvável que Newton não a tivesse associado com a gravidade, principalmente num tratado cujo tema central é exatamente esse fenômeno. Considero aqui, portanto, que ao menos parte dos estudos dessa seção tenham surgido do objetivo de testar a hipótese vibratória de Hooke. Apesar que essa intenção possa não ter sido explícita nessa seção, não é o caso da seção 9. Declaradamente o objetivo da seção 9 do Livro II é investigar matematicamente a hipótese dos vórtices de Descartes.

O Livro II encerra com a seção intitulada “o movimento circular dos fluidos”. Newton introduz duas situações em que um vórtice poderia ser produzido. Primeiro, pela rotação uniforme, em torno do seu eixo, de um longo cilindro sólido imerso num fluido infinito, e a segunda, pela rotação uniforme de uma esfera nesse mesmo fluido. Na primeira situação Newton demonstra que os tempos periódicos das partes do fluido que entram em revolução em virtude da rotação do cilindro seriam proporcionais à distância a partir do eixo do cilindro. Na segunda situação, mais afeita a hipótese de Descartes, ele demonstra que os tempos periódicos das partes do fluido seriam proporcionais ao quadrado da distância até o centro da esfera. Essa conclusão é afirmada no corolário 2 da proposição 52:

Se uma esfera, num fluido infinito e homogêneo em repouso, revolve com movimento uniforme em torno de um eixo em determinada posição, ela comunicará um movimento ao fluido como aquele de um vórtice, e esse movimento será propagado pouco a pouco sem limite, e esse movimento não cessará de ser acelerado

em cada parte do fluido até que os tempos periódicos de cada uma dessas partes esteja para o quadrado das distâncias a partir do centro da esfera.¹⁰⁴⁹

Após determinar os tempos periódicos das partes de um fluido posto em movimento pela rotação de uma esfera, Newton acrescenta várias considerações e ressalvas sobre as possibilidades de um tal movimento em 11 corolários. Vale a pena mencionar sucintamente algumas dessas ressalvas.

Em primeiro lugar, mesmo constatando a possibilidade matemática de uma esfera em rotação gerar um vórtice, ainda assim deveria haver alguma outra causa para as partículas se manterem num movimento circular, em razão da diferença da força centrífuga no trânsito da eclíptica para os polos. Em segundo lugar, uma vez que o meio é resistente, deveria haver algum “princípio ativo” para a esfera continuar girando. Se esse princípio ativo cessasse, sendo tudo deixado sob as “leis da mecânica”, o movimento da esfera enfraqueceria pouco a pouco, e o vórtice “estaria por fim completamente em repouso” (cor. 4). Em terceiro lugar, no caso de duas esferas gerando dois vórtices que interferem um no outro, as esferas deveriam rescidir entre si, a não ser se fossem estrangidas por alguma força (cor. 5). Em quarto lugar, as partículas dos fluidos em movimento circular deveriam rescidir do centro. A única possibilidade de uma esfera em rotação gerar um vórtice estável seria se o fluido estivesse delimitado por um recipiente esférico (cor. 7). E em quinto lugar, Newton destaca que todas as suposições dessa proposição foram feitas com base na hipótese de que a resistência do fluido que surge da fricção seria proporcional a velocidade com a qual as partes do fluido seriam separadas umas das outras, todavia ele sabia que essa situação era bastante improvável, ou seja, que essa proporção deveria ser numa razão menor que da velocidade.

Mesmo ignorando todas essas dificuldades adicionais, ainda assim ele não conseguiu encontrar uma forma, mesmo remota, em que fosse possível conciliar o movimento de revolução dos fluidos nos vórtices tanto com a lei das áreas de Kepler quanto a sua lei dos períodos. No escólio à proposição 52, Newton explicita o seu intento de testar a hipótese cartesiana e a incompatibilidade com a lei dos períodos:

Nessa proposição eu tentei investigar as propriedades dos vórtices com o objetivo de testar se os fenômenos celestes poderiam ser explicados de qualquer maneira por meio de vórtices. Pois é um fenômeno que os tempos periódicos dos planetas secundários que revolvem em torno de Júpiter estão na razão da potência de $3/2$ da distância a partir do centro de Júpiter; e a mesma regra se aplica para os planetas que revolvem em torno do Sol (...) E desse modo, se aqueles planetas são carregados por

¹⁰⁴⁹ CW, p.783.

meio de vórtices revolvendo em torno de Júpiter e do Sol, os vórtices também teriam que revolver de acordo com a mesma lei. Mas os tempos periódicos das partes dos vórtices se mostraram na razão do quadrado das distâncias a partir do centro do movimento e essa razão não pode ser decrescida ou reduzida à potência $3/2$, a não ser que ou a matéria do vórtice seja mais fluida do que é a partir do centro, ou a que a resistência surgindo (...) das partes do fluido seja aumentada numa razão maior do que a razão na qual a velocidade é aumentada. No entanto, nenhuma das duas [opções] parece razoável.¹⁰⁵⁰

E no escólio à proposição 53, Newton oferece o seu argumento mencionando a incompatibilidade com o fenômeno da lei das áreas:

Porque os planetas que – de acordo com a hipótese copernicana – se movem em torno do Sol, revolvem em elipses tendo o foco no Sol, e com raios descritos até o Sol descrevem áreas proporcionais aos tempos. Mas as partes de um vórtice não podem revolver com um tal movimento.¹⁰⁵¹

Na sequência desse escólio final Newton explica que pela lei das áreas um planeta deve se mover mais lentamente no afélio e mais rapidamente no periélio. No entanto, pelas “leis mecânicas” dos vórtices estabelecidas, imaginado um vórtice que se aproximasse das órbitas planetárias, o fluido se moveria mais rapidamente no afélio e mais lentamente no periélio, precisamente o oposto do que se observa pelos fenômenos, conforme Newton também evidencia pela menção dos movimentos astronômicos de Marte e Vênus. “Portanto”, declara Newton enfaticamente, “a hipótese dos vórtices de maneira alguma pode ser reconciliada com os fenômenos astronômicos, e serve menos para clarificar os movimentos celestes do que para obscurecê-los”. Com essa contundente declaração Newton termina a sua argumentação sobre os vórtices e também os seus estudos sobre o Livro II.

Embora o próprio Huygens, após a leitura dos *Principia*, tenha declarado que “os vórtices [foram] destruídos por Newton”¹⁰⁵², alguns comentadores têm levantado críticas quanto ao alegado sucesso na refutação newtoniana do sistema de Descartes. Neményi, por exemplo, destacou que, dentre várias razões, a conclusão do escólio final do Livro II não é convincente porque Newton usou “a equação de continuidade (conservação da massa do fluido) de um modo que é admissível somente num fluxo estritamente bidimensional (plano)”.¹⁰⁵³ Apesar de não ser possível ingressar nos detalhes da análise de Neményi aqui, é

¹⁰⁵⁰ Ibid, p.787.

¹⁰⁵¹ Ibid, p.789.

¹⁰⁵² Huygens, *Varia astronomica*, in *Ouvres Completes*, vol. XXI, p. 437-439, apud Koyré, 1965, p.117. Veja também Cohen, 1999, p.164.

¹⁰⁵³ Neményi, 1962, p.73-74. Veja também Cohen, 1999, p.188.

importante considerar a que a rejeição dos vórtices defendida por Newton está fundada em muito mais do que as razões apontadas nos dois escólios finais. Não se deve esquecer do método utilizado por Newton ao longo de todo Livro II: testar as consequências e possibilidades matemáticas de uma hipótese. Newton concluiu que sob nenhuma condição imaginada seria possível conciliar matematicamente a hipótese dos vórtices com os fenômenos astronômicos. No entanto, mesmo que ele tivesse cometido alguns erros e se viesse a demonstrar que essa hipótese não se constitui estritamente numa impossibilidade matemática em relação aos fenômenos de Kepler, ainda assim ela continuaria sendo extremamente improvável do ponto de vista físico, tendo em vista todas as precárias suposições que foram assumidas apenas para tentar salvar essa hipótese. Não se pode esquecer que diante das conclusões matemáticas obtidas nos dois últimos escólios, Newton sumariamente ignorou todas aquelas improváveis suposições. Westfall mencionou um desses pontos ignorados na conclusão do matemático: “os vórtices que carregam os planetas e satélites” nas suas respectivas órbitas simplesmente “não podem ser auto-sustentados”.¹⁰⁵⁴ Embora não perfeita, e talvez não definitiva, a crítica de Newton aos vórtices de Descartes, como Huygens percebeu, foi avassaladora.

¹⁰⁵⁴ Veja Cohen, 1999, p.187.

APÊNDICE C – A HIPÓTESE DA ATRAÇÃO INTERPLANETÁRIA

Conforme foi argumentado nas seções 10.5.2, Newton considerou a hipótese da atração magnética como uma das possíveis causas da gravidade. Essa hipótese provavelmente o levou à investigação dos fenômenos magnéticos, permitindo que ele obtivesse várias conclusões acerca desses fenômenos: (1) que os fenômenos magnéticos ocorrem entre *corpos*; (2) que ocorrem entre corpos com certas propriedades; (3) que sempre produzem ações mútuas, de maneira semelhante às colisões e percussões entre corpos; e (4) que a mutualidade dessas ações opera de maneira distinta da sua operação nas colisões e percussões. Diante dessas conclusões Newton deve ter percebido que seria perfeitamente possível testar a hipótese da atração magnética entre os planetas, primeiro, estabelecendo as características dos fenômenos magnéticos enunciadas acima como condições matemáticas dos movimento de corpos a partir das quais se deduziriam consequências; e, segundo, examinando em que medida essas consequências matemáticas poderia ser conciliadas com os fenômenos de Kepler; ou seja, em que medida as condições matemáticas estabelecidas poderiam gerar movimentos orbitais que obedecessem a lei das áreas e a lei dos períodos. É principalmente esse teste que a seção 11 do Livro I leva a cabo.

Das quatro condições retiradas dos experimentos com os fenômenos magnéticos listadas no parágrafo anterior, Newton já sabia que, caso a gravidade dos planetas tivesse origem numa atração magnética (ou coisa semelhante), não poderiam haver centros de força “imóveis”, como suposto na hipótese de Hooke, uma vez que a atração magnética é sempre entre corpos, e o corpo atrativo também sofre uma força de reação proveniente do corpo atraído. Além disso, ele sabia que sob essa hipótese todos os planetas do sistema solar deveriam ser atraídos mutuamente. Esse aumento de complexidade decorrente dessa suposição tornava improvável a concordância matemática entre a hipótese magnética e os fenômenos de Kepler, a menos, é claro, que essa hipótese fosse verdadeira. Na seção 11, portanto, Newton desenvolve as consequências matemáticas da hipótese da atração entre os planetas com o objetivo de coloca-la à prova. Vale a pena citar o parágrafo de abertura da seção, ainda que os objetivos supostos de testar a hipótese magnética estejam nele dissimulados:

Até esse ponto estive estabelecendo os movimentos dos corpos atraídos em direção ao um centro imóvel; entretanto, dificilmente uma tal situação existe no mundo natural. Porque as atrações são sempre direcionadas para corpos, e – pela terceira lei – as ações dos corpos atrativos e atraídos são sempre mútuas e iguais; de maneira que se há dois corpos, nem o corpo atrativo nem o corpo atraído pode estar em repouso, mas ambos (pelo corolário 4 das leis), sujeitos à atração mútua, revolvem em torno do centro de gravidade comum; e se há mais do que dois corpos que, ou são atraídos por um único corpo atrativo ou todos se atraem entre si, esses corpos devem se mover em relação um ao outro de um modo tal que o centro de gravidade esteja ou em repouso ou se movendo uniformemente em linha reta. Por essa razão, estabelecerei agora os movimentos dos corpos que atraem um ao outro, considerando as forças centrípetas como atrações, embora talvez – se falarmos na linguagem da física – elas devam mais propriamente serem chamadas de impulsos. Mas aqui estamos interessados com a matemática; e portanto, deixando de lado qualquer debate concernente a física, estou usando uma linguagem familiar de modo que eu seja mais facilmente compreendido pelos leitores matemáticos.¹⁰⁵⁵

Essa passagem representa um bom resumo do que Newton desenvolverá ao longo da seção. Vale a pena fazer algumas observações sobre ela. Em primeiro lugar, lendo cuidadosamente o trecho acima fica difícil negar que os estudos propostos tenham mesmo como pano de fundo uma hipótese para a causa da gravidade, no caso, uma força de atração semelhante ao magnetismo. Isso se percebe logo no início do texto, quando se afirma que “as atrações são sempre direcionadas para corpos”, e que as ações são “mútuas e iguais” e nenhum dos corpos “pode estar em repouso”, não havendo, por essa razão, um centro realmente “imóvel”. Não deve haver dúvida de que Newton tem em mente aqui as experiências com os corpos magnéticos.

Em segundo lugar, poderíamos nos perguntar: como Newton efetuará a sua análise matemática nessa situação muito mais complexa? Como ele desenvolveria um tratamento matemático para dois ou mais corpos se atraindo mutuamente ao mesmo tempo em que se movem? A passagem de abertura adianta o principal recurso que Newton utilizou: o corolário 4 das leis do movimento. Para lograr êxito no seu intento, Newton tomou emprestado um princípio formulado inicialmente por Huygens. No Apêndice A chamei esse princípio de “princípio da inércia ampliado de Huygens”. Num sistema isolado de corpos o movimento do “centro de gravidade” permanece em repouso ou movimento uniforme em linha reta. Afirma enunciado do corolário:

Corolário 4. O centro de gravidade comum de dois ou mais corpos não altera o seu estado seja de movimento ou de repouso como resultado das ações dos corpos uns sobre os outros. E, portanto, o centro de gravidade comum de todos os corpos agindo uns sobre os outros (excluindo ações externas e impedimentos) está ou em repouso ou em movimento uniforme em linha reta.¹⁰⁵⁶

¹⁰⁵⁵ CW, p.561.

¹⁰⁵⁶ Ibid, p.421.

Esse corolário declara basicamente a conservação da quantidade de movimento de um sistema de corpos. Huygens havia formulado esse princípio para o caso de vários corpos colidindo entre si. Ao confirmar a validação da terceira lei também para as atrações, Newton estendeu esse resultado igualmente para qualquer tipo de interação entre os corpos, quer impulsivas ou atrativas. Mais adiante voltaremos a esse corolário.

Em terceiro lugar, será útil fazer uma observação sobre as últimas frases da passagem de abertura. Newton afirma que o seu objetivo é estabelecer o movimento dos corpos “considerando as forças centrípetas como atrações (...)”. Essa frase, antes de tudo, reforça a tese de que nessa seção ele está testando a hipótese da atração magnética como causa da gravidade. A força centrípeta não é mais considerada como uma força, qualquer que seja a origem, em direção a um centro. É considerada como uma *atração entre corpos*. No entanto, a continuação da frase de Newton introduz algumas dificuldades conceituais. Ele afirma que o seu objetivo é estabelecer “o movimento dos corpos que atraem um ao outro, considerando as forças centrípetas como atrações, embora talvez – se falarmos na linguagem da física – elas devam mais propriamente serem chamadas de impulsos”.

Para compreender melhor as dificuldades conceituais presentes nessa última sentença, o leitor deve lembrar que embora Newton tenha provavelmente desenvolvido os estudos que resultaram nessa seção a partir do problema físico da causa da gravidade, na composição final dos *Principia* ele preferiu manter todos os desenvolvimentos matemáticos num mesmo livro (o Livro I), a despeito de algumas distorções interpretativas que isso poderia gerar. Ao introduzir essa seção antes dos desenvolvimentos do Livro II e III, naturalmente não faria sentido escrever sobre os problemas que efetivamente motivaram elaboração dessa seção. Portanto, em vez de escrever *considerando a gravidade como ação atrativa semelhante ao magnetismo* ele precisa escrever “considerando as forças centrípetas como atrações (...)”. No entanto, como o próprio termo “atração” se refere a uma noção física, ou melhor, já está comprometida com certos pressupostos físicos, ele precisa dissimular o seu discurso, afirmando que embora se proponha a considerar “as forças centrípetas como atrações”, talvez elas devessem ser mais propriamente chamadas de “impulsos”, caso fossemos falar “na linguagem da física”.

Ora, não é difícil perceber que há uma grande ambiguidade conceitual no uso dos termos aqui. Primeiro, tanto “atração” quanto “impulso” são termos com conotação física, não matemática, conforme foi mostrado na seção 10.5.2. “Atração” não é um termo matemático e “impulso” um termo físico. O termo matemático equivalente ao “impulso” seria simplesmente “força”, e no caso da “atração”, poderia ser “força centrípeta”. Em segundo lugar, se as

“atrações” deveriam ser mais propriamente chamadas de “impulsos”, na “linguagem da física”, porque ele não evitou toda a confusão e usou simplesmente “impulso” desde o início? Seria realmente a “atração” um termo mais familiar, ou seria um termo que apenas geraria mais confusão? Parece-me que ele não usou o termo mais adequado à “linguagem da física” desde o início simplesmente porque, para ele, “atração” e “impulso” não são ações equivalentes. O fato é que Newton criou algumas dificuldades para si mesmo quando resolveu apresentar todos os desenvolvimentos matemáticos concentrados num único livro. Uma das dificuldades evidentes é que ele não poderia discutir abertamente cada situação ou problema físico que estava sendo investigado ou testado. Outra dificuldade é que ele ainda não havia descartado para o leitor a possibilidade da força centrípeta ser gerada pelo impulso de um meio. Isso foi feito apenas no final do Livro II. Por essa razão destaco a palavra “talvez” que Newton usa na sentença acima. Ele afirma que “talvez”, na “linguagem da física” as atrações possam ser mais propriamente chamadas de “impulsos”. A essa altura ele sabe bem sabe que não é o caso. Mas pelas suas escolhas de organização dos *Principia* ele não pode adiantar a questão.¹⁰⁵⁷

De qualquer forma, o que me parece estar claro aqui é que Newton está testando a hipótese gravidade como consequência de algum tipo ação atrativa semelhante aos fenômenos magnéticos. Será possível que um fenômeno de atração mútua interplanetária possa levar a movimentos que concordam ou, ao menos, assemelham-se aos fenômenos de Kepler? Como se mostrará, os estudos da seção 11 revelam que sim.

¹⁰⁵⁷ É claro que Newton também sabia que a noção de atração não era bem vista à época, pois sugeria um recurso a uma qualidade oculta aristotélica. Certamente isso também o motivou a ser cuidadoso com o seu uso aqui. Alguns comentadores defendem que Newton já estava comprometido com uma noção de ação à distância e utilizou a sua abordagem metodológica de trabalhar primeiro apenas no nível matemático para evitar as críticas que a adoção dessa noção poderia provocar. Não acredito que esse seria o ponto. Newton não construiu e adotou uma metodologia de análise puramente matemática para se esquivar de algumas questões inconvenientes; com efeito, ele *se aproveitou* do seu método de análise puramente matemático para se esquivar dessas questões, o que é uma situação bem diversa. Como se mostra no capítulo 16, o método de análise matemática de Newton permite que ele explore as possibilidades matemáticas de várias situações supostas antes de se defrontar com a própria possibilidade de ocorrência dessas situações no mundo físico. Algumas vezes esse método de análise pode até sugerir a existência de uma entidade a qual não temos acesso empírico. Supor a existência de uma atração entre corpos é uma situação matematicamente possível. Se há situação semelhante na realidade é outra questão. Como já disse, penso que Newton acreditava numa ação atrativa distinta da impulsiva. Contudo, à luz do seu método de investigação matemática ele não precisava considerar a questão da existência física no primeiro momento, apenas as suas possibilidades matemáticas. Newton pode ter usado o seu método como mero subterfúgio algumas vezes? É bem possível. Mas ele não construiu e adotou esse método para esse propósito.

Proposições

A seção 11 do Livro I é composta por doze proposições (prop. 57 a 69). A proposição 57 abre a sequência estabelecendo que “dois corpos que atraem um ao outro descrevem figuras similares em torno do seu centro de gravidade comum, e também um em relação ao outro”.¹⁰⁵⁸ Para melhor compreender essa e as demais proposições será necessário retomar novamente o tema do corolário 4 das leis do movimento, qual seja, o tema do centro de gravidade de um sistema de corpos agindo uns sobre os outros.

Arquimedes foi o primeiro a introduzir a ideia de “centro de gravidade”. Nas suas investigações sobre as balanças ele considerou o ponto de equilíbrio de um sistema de dois corpos pesados numa balança como o centro de gravidade desse sistema. Quanto maior era o peso de um dos polos da balança, mais o ponto de equilíbrio, ou o centro de gravidade, se deslocava em direção ao corpo mais pesado.

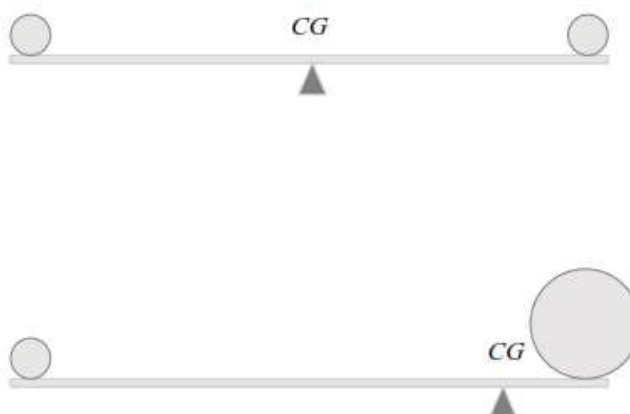


Figura 115 – Centro de gravidade numa balança.
Fonte: o autor.

Huygens aplicou a ideia de Arquimedes, de centro de gravidade, nos seus estudos sobre as colisões entre os corpos. Ele percebeu que se dois corpos com iguais quantidades de movimento se chocam frontalmente, o centro de gravidade do sistema permanece em repouso e sem alteração.¹⁰⁵⁹

¹⁰⁵⁸ CW, p.561.

¹⁰⁵⁹ Huygens, 1977.

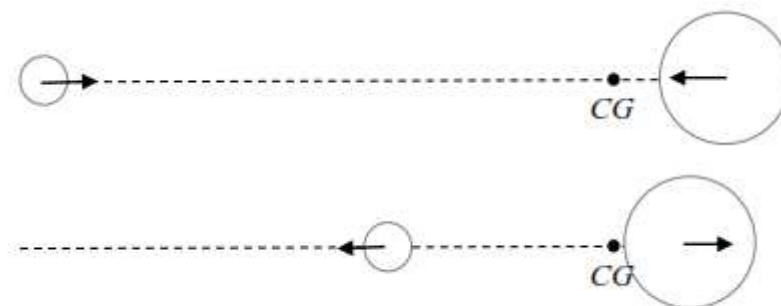


Figura 116 – Centro de gravidade de duas esferas colidindo.
Fonte: o autor.

De modo semelhante, ele percebeu que se um corpo se choca com outro em inicialmente repouso, a velocidade e direção do movimento do centro de gravidade permanece constante depois do impacto. De maneira geral, em qualquer colisão entre corpos, com qualquer número de corpos num sistema isolado, o centro de gravidade do sistema estará em sempre em repouso ou em movimento uniforme em linha reta. Esse é o enunciado que chamei de “princípio da inércia ampliado de Huygens”. Newton ampliou esse princípio para as atrações, ou melhor, para as interações relacionadas aos fenômenos magnéticos atrativos. Uma vez que a terceira lei do movimento é válida também para atrações, observa-se a mesma situação. Se um ímã atrai algum outro corpo, em virtude das ações atrativas serem mútuas, o corpo atraído perceberá uma reação de mesma intensidade. Ambos tenderão a se aproximar sob ação de uma força contínua igual, que produzirá uma igual mudança na quantidade de movimento nos dois corpos (acelerações iguais), um em direção ao outro. O centro de gravidade dos dois corpos permanecerá, portanto, em repouso.

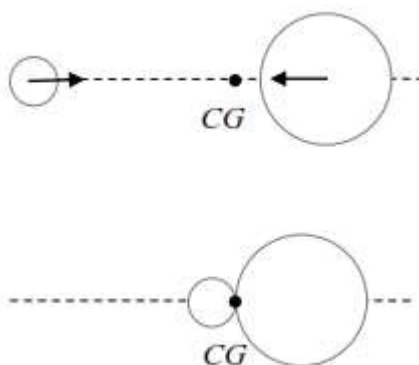


Figura 117 – Durante a colisão de dois corpos o centro a posição do centro de gravidade permanece em repouso.
Fonte: o autor.

Conforme Newton explicou no escólio das leis do movimento, se um dos corpos sofresse uma força maior, o centro de gravidade não permaneceria em repouso, e o sistema dos dois corpos

que se atraem, unidos, aceleraria indefinidamente, o que é absurdo e contrariaria a primeira lei do movimento. Portanto, o resultado de Huygens é igualmente válido para as atrações.

A proposição 57, no entanto, afirma que dois corpos que se atraem mutuamente também “descrevem figuras similares em torno do seu centro de gravidade comum, e também um em relação ao outro”. Esse resultado não está contido no corolário 4. Para tornar mais clara essa proposição apresentarei quatro casos preliminares, em ordem crescente de complexidade, antes entrar nos casos propriamente da proposição 57.

Primeiro caso. Considere dois corpos, A e B , de massa iguais e unitárias. Se o corpo A atrair B com uma força contínua e constante, ambos os corpos descreverão figuras similares em torno do centro de gravidade comum (no ponto médio entre as suas posições). Evidentemente essas “figuras similares” serão segmentos de reta de igual comprimento.

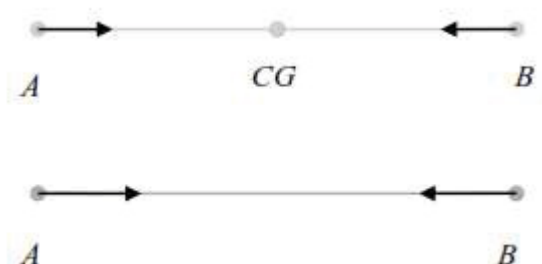


Figura 118 – Dois corpos de massas unitárias.
Fonte: o autor

Além disso, é possível mostrar que a reta descrita por um dos corpos em relação ao outro (ou seja, considerando a mesma situação do ponto de referência de apenas um dos corpos, admitindo que o outro esteja em repouso) é igualmente proporcional às retas descritas na figura anterior uma vez que o espaço total AB seria descrito no mesmo intervalo de tempo em que cada um dos corpos percorreria a distância da sua posição até o centro de gravidade. Em outras palavras, o deslocamento do corpo A até o centro de gravidade é semelhante ao deslocamento do corpo A até B supondo que o corpo B esteja em repouso e A se desloque com uma aceleração que correspondente a soma das acelerações dos dois corpos individuais.

Segundo caso. Considere dois corpos, A e B , agora com *massas diferentes*, sendo que o corpo A atrai B com uma força (motriz) contínua e constante. Da mesma forma que no caso de massas unitárias eles descreverão “figuras similares” em torno do centro de gravidade comum. Desta feita as figuras não serão segmentos de reta necessariamente iguais, porém *proporcionais*, uma vez que serão construídos no mesmo intervalo de tempo. É possível

mostrar que para qualquer distância entre os corpos os segmentos de retas produzidos guardarão uma proporção constante entre si.

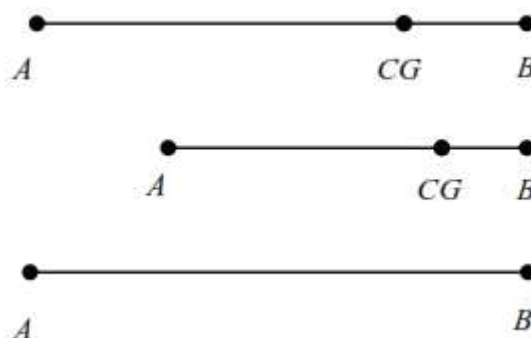


Figura 119 – Dois corpos de massas diferentes.
Fonte: o autor.

Além disso, é possível mostrar que a reta descrita por um dos corpos em relação ao outro é igualmente proporcional às retas descritas de cada corpo até o centro de gravidade. Porque a aceleração de um corpo em relação ao outro é igual à soma das acelerações dos corpos individuais.

Terceiro caso. Considere os mesmos corpos A e B novamente com massas iguais e unitárias. Sob as mesmas condições de atração dos casos anteriores, imagine que sejam colocados em movimento inercial de modo que possuam ambos a mesma velocidade angular no sentido anti-horário. É possível mostrar que os dois corpos descreverão órbitas circulares iguais, com mesmo tempo periódico. Além disso, a órbita de um em relação ao outro será também circular, e o tempo periódico igual.

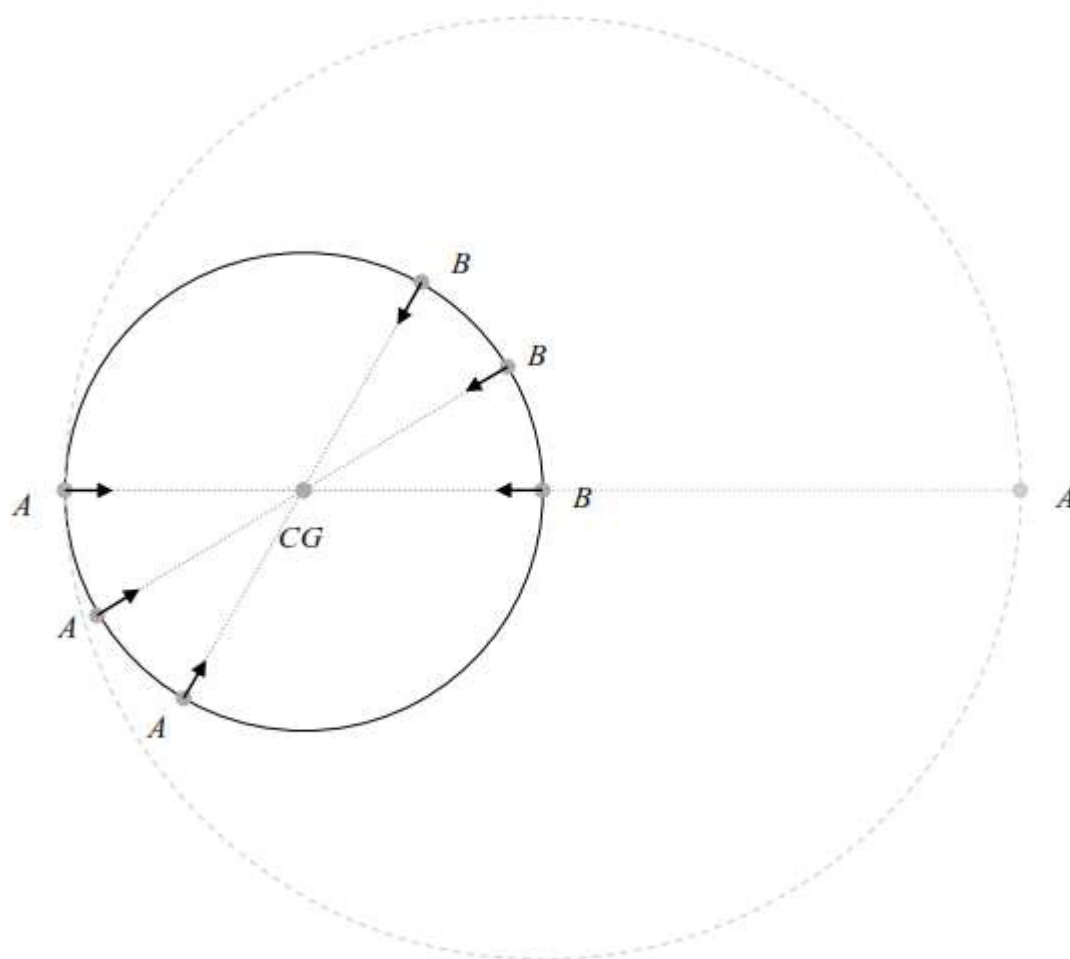


Figura 120 – Dois corpos de massas iguais descrevendo órbitas circulares em torno do centro de gravidade.
Fonte: o autor.

Não é difícil perceber que os corpos sempre estarão submetidos a acelerações iguais em direção ao centro de gravidade comum que coincide com o centro dos círculos descritos. Desse modo, as condições aqui estabelecidas são equivalentes a cada corpo ser atraído individualmente por uma força constante em direção um centro de força imóvel coincidindo com o centro de gravidade comum do sistema.

Quarto caso. Considere que os corpos A e B, com *massas distintas*, sob as mesmas condições do caso anterior. É possível mostrar que eles corpos descreverão da mesma forma órbitas circulares em torno do centro de gravidade comum, e também um em relação ao outro, com iguais tempos periódicos.

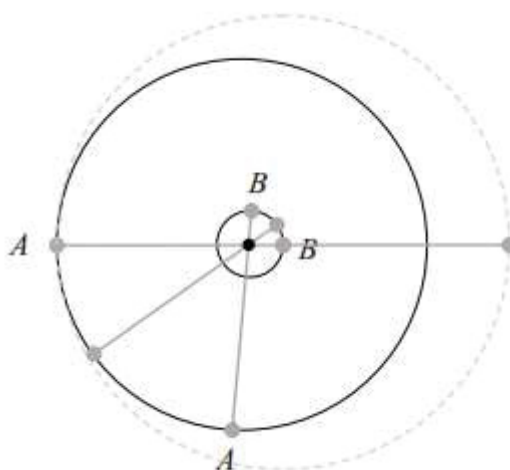


Figura 121 – Dois corpos de massas diferentes.
Fonte: o autor.

É possível mostrar que todos os casos anteriores são igualmente válidos para qualquer situação de atração, seja A atraindo B , seja B atraindo A , ou seja A e B atraindo-se mutuamente. Agora já estamos em condições de abordar os casos considerados por Newton nas proposições 57 e 58.

A proposição 57 diz que dois corpos que se atraem mutuamente também “descrevem figuras similares em torno do seu centro de gravidade comum, e também um em relação ao outro”. Esse teorema já ficou evidenciado pelos últimos dois casos apresentados. A proposição 58, por sua vez, introduz a mesma situação da proposição 57, porém acrescentando a condição “com qualquer força que seja”, isto é, com qualquer lei de força que se imagine. Dos três corolários que complementam essa proposição, nos dois primeiros são considerados os dois exemplos de leis de forças que já haviam sido estudados nos *Principia*: uma força proporcional à distância; e uma força uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância. Embora Newton apresente somente casos de massas distintas, será útil considerarmos ainda mais uma vez o caso simplificado de massas iguais unitárias.

Quinto caso. Considere dois corpos se atraindo mutuamente com uma força proporcional a distância entre eles. Pela prop. 4 e prop. 10 do Livro I (ou situação 7, 8 da tab. 6) os corpos poderão descrever círculos ou elipses concêntricas, e figuras similares em relação um ao outro, com iguais tempos periódicos.

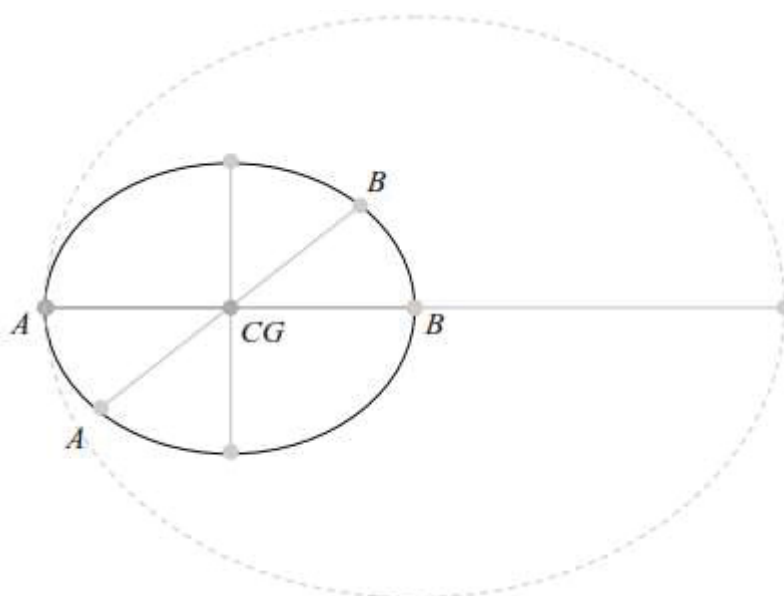


Figura 122 – Dois corpos de massas iguais sob ação de uma força de atração proporcional à distância.
Fonte: o autor.

Caso a força de atração de A sobre B seja proporcional ao inverso do quadrado da distância, pelas prop. 11, 12 e 13 do Livro I, os corpos descreverão qualquer uma das cônicas com o centro de gravidade comum coincidindo com o foco das cônicas. Considerando somente as órbitas fechadas, os corpos descreverão círculos ou elipses, com o centro de gravidade comum coincidindo com o centro dos círculos ou com o foco das elipses, e figuras similares em relação um ao outro, com iguais tempos periódicos.

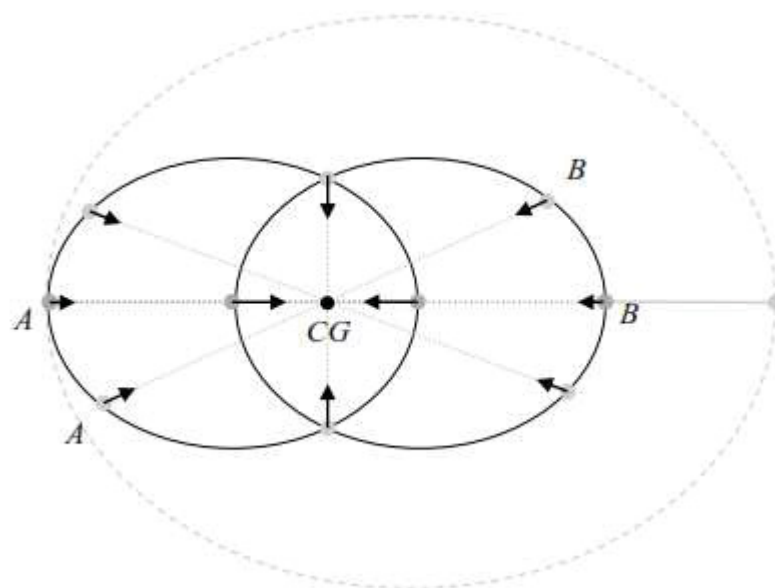
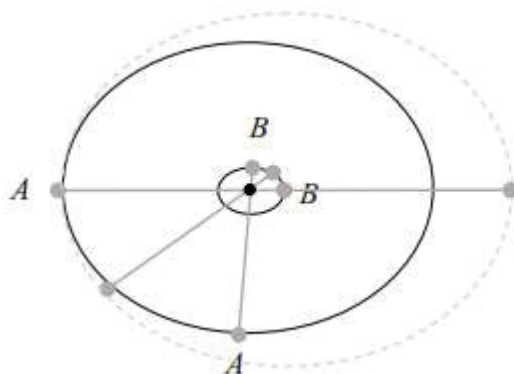


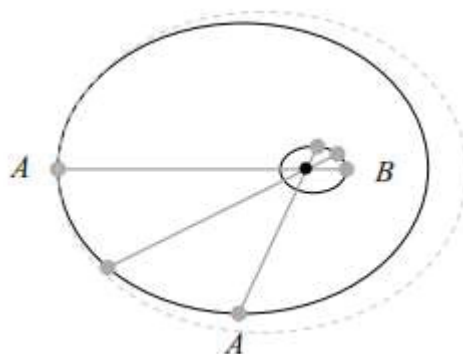
Figura 123 – Dois corpos de massas iguais sob ação de uma força de atração proporcional ao quadrado da distância. Fonte: o autor.

Sexto caso. Considerando os corpos A e B sob as mesmas condições do caso anterior, porém agora com *massas diferentes*, os resultados se manterão os mesmos em relação ao novo centro de gravidade comum do sistema.

(i) Força proporcional a distância:



ii) Força proporcional ao inverso do quadrado da distância:



Os dois primeiros corolários da proposição 58 permite concluir que se dois corpos exercessem uma força atrativa entre si cuja a variação fosse na razão do inverso do quadrado da distância entre eles, e se ao mesmo tempo estivessem com um determinado movimento inercial numa direção diferente da força de atração, num mesmo sentido angular (por exemplo, anti-horário), os corpos não apenas poderiam descrever uma órbita fechada, como as suas órbitas seriam circulares ou elípticas com o centro de gravidade dos dois corpos coincidindo com o centro do círculo, ou com o foco da elipse. Além disso, caso se considerasse o movimento dos corpos um em relação ao outro, essa órbita seria circular ou elíptica, com um dos corpos posicionado no centro do círculo ou no foco da elipse. E conversamente, se dois corpos descrevem uma órbita circular ou elíptica em torno do centro de gravidade com o centro de gravidade posicionado sobre o centro do círculo ou sobre o foco

da elipse, ou da mesma forma um em relação ao outro, então os corpos estão necessariamente se atraem com forças proporcionais ao inverso do quadrado da distância entre eles.

O corolário 3 afirma a consequência imediata dos resultados anteriores. “Dois corpos quaisquer revolvendo em órbitas em torno do centro de gravidade comum descrevem áreas proporcionais aos tempos, por raios traçados até esse centro, e igualmente até um ao outro”.¹⁰⁶⁰ Trata-se, evidentemente, da lei das áreas.

Do que foi exposto nos parágrafos anteriores se conclui que, num sistema de dois corpos que se atraem com uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância, os fenômenos de Kepler se observam com exatidão. Caso um dos corpos eventualmente seja significativamente maior que o outro, o centro de gravidade comum dos corpos desviará muito pouco do centro do corpo maior, e o menor descreverá uma órbita circular em ou elíptica em torno do maior que obedece aproximadamente a lei das áreas em relação ao centro do maior. Com efeito, dependendo do tamanho do corpo maior, a situação será muito semelhante a atração por um centro imóvel, uma vez que o movimento do corpo maior será menor do que qualquer quantidade perceptível. Esse seria o caso dos satélites de Júpiter e Saturno em torno desses planetas, e o caso dos planetas primários em torno do Sol. No caso da Terra em relação Sol ou vice-versa, no entanto, percebemos que é indiferente considerarmos o movimento corpos em torno do centro de gravidade ou de um dos corpos em relação ao outro. Descreverá uma trajetória semelhante com tempos periódicos iguais obedecendo a lei das áreas. Os fenômenos astronômicos do movimento do Sol em torno da Terra, ou da Terra em torno do Sol, portanto, também se ajustam às consequências matemáticas da hipótese da atração.

O problema com a análise de Newton até aqui é que ela estudou os movimentos descritos por um sistema de apenas dois corpos isolados. Evidentemente, no Sistema Solar os planetas não estão isolados. Sob a hipótese da atração, todos os planetas deveriam atrair uns aos outros. A complexidade da realidade seria, portanto, muito maior do que esses estudos iniciais. Newton demonstrou plena consciência da complexidade desse problema. Na última versão do *De Motu*, no escólio do Teorema 4, ele admitiu que “considerar todas essas causas do movimento e definir esses movimentos por leis exatas que permitam um cálculo conveniente, a menos que eu esteja enganado, excederia a força da inteligência humana”.¹⁰⁶¹ Não obstante o pessimismo de Newton em ser possível considerar *de maneira exata* todas essas interações mútuas entre os planetas, nos *Principia* ele foi capaz de oferecer alguns

¹⁰⁶⁰ CW, p.563.

¹⁰⁶¹ Newton, 1965, p.301.

estudos que foram ao menos suficientes para avaliar se os fenômenos de Kepler poderiam ser salvos sob essa condição muito mais complexa. Esses estudos são oferecidos nas proposições 65 e 66.

No “Caso 1” da proposição 65, Newton afirma: “Suponha que vários corpos menores revolvam em torno de um muito maior a várias distâncias a partir dele, e que as forças absolutas proporcionais a esses corpos [i.e., massas] tendam a todos e cada um deles”.¹⁰⁶² Naturalmente, o caso suposto é dos planetas primários em torno do Sol. A conclusão da análise de Newton é que, se um dos corpos é muito maior que os outros (ou seja, tem uma massa ou quantidade de matéria muito maior), o centro desse corpo maior jamais se desviará muito do centro de gravidade comum do sistema e os corpos menores revolverão muito aproximadamente em elipses em torno do corpo maior. Além disso, as ações de cada um dos corpos menores sobre o outro serão “menores do que qualquer valor assinalável” e assim a distorção nas suas órbitas também será “menor do que qualquer valor assinalável”. Portanto, apenas de Newton não ser capaz de calcular exatamente todas as interações mútuas entre os planetas ele é capaz de perceber que no caso dos planetas primários em torno do Sol, devido as dimensões do Sol em relação aos planetas, qualquer distorção nas órbitas ou desvio do centro de gravidade comum do centro do Sol seria muito pequeno e, provavelmente, menor do que qualquer quantidade perceptível.

Mas e no caso dos satélites de Júpiter e Saturno? Não é possível dizer que a atração do Sol sobre eles é menor e desprezível. Porque eles manteriam suas órbitas perfeitamente circulares, sem qualquer distorção, em torno desses planetas? Newton considera esse problema no “Caso 2”. Ele afirma: “Imaginemos agora um sistema de corpos menores revolvendo do modo há pouco descrito em torno de um corpo muito maior (...) e ao mesmo tempo instados para a mesma direção pela força de um corpo muito maior [que todos], situado a uma grande distância”.¹⁰⁶³ Nesse caso, Newton explica que o sistema dos corpos menores revolvendo em torno do maior serão atraídos com iguais forças acelerativas em direção ao corpo muito maior; e como este último corpo está a uma grande distância muito maior do que as distâncias dos corpos menores até o corpo a partir do qual revolvem, as forças acelerativas, além de iguais, serão muito aproximadamente paralelas, não provocando qualquer alteração assinalável na posição dos corpos do sistema e, conseqüentemente, na revolução desses corpos em torno do maior. Melhor dizendo, as inclinações das forças acelerativas em direção

¹⁰⁶² CW, p.568.

¹⁰⁶³ Ibid.

ao corpo maior muito distante serão “menores do que quaisquer valores assinaláveis”, portanto, as distorções das órbitas da mesma forma o serão.

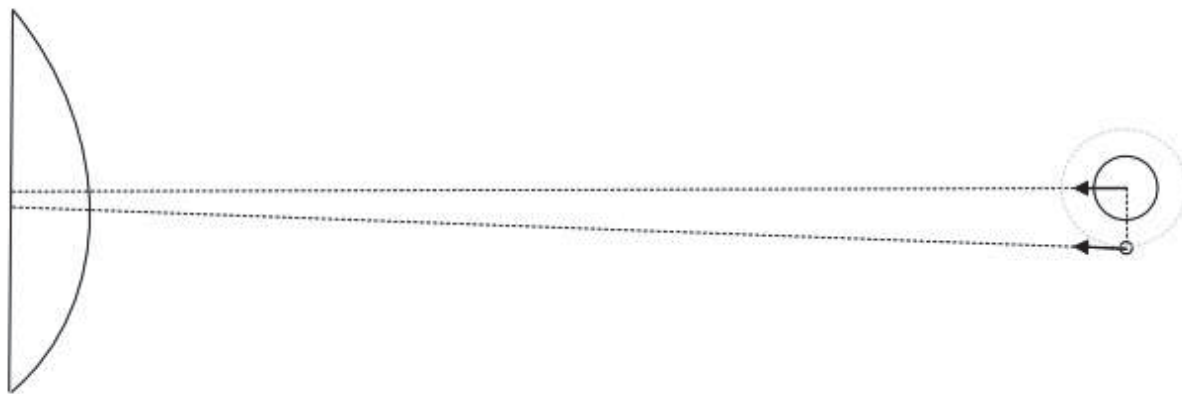


Figura 124 – Distorção desprezível nas órbitas dos satélites de Júpiter e Saturno.
Fonte: o autor.

As explicações para o “Caso 2”, no entanto, não pode ser estendida para a situação do satélite terrestre. No corolário 1 à proposição 65 Newton afirma que

quanto mais o corpo maior se aproxima do sistema de dois ou mais corpos, mais os movimentos das partes do sistema com respeito um ao outro serão perturbados, porque a inclinação das linhas a partir desse corpo maior até as partes do sistema o corpo maior são agora maiores entre si, e a desigualdade das proporções é, de igual modo, maior.¹⁰⁶⁴

Evidentemente, esse é o caso do sistema composto pela Terra, Lua e o Sol. A perturbação, conforme Newton também esclarece no corolário 2, não é maior apenas porque as inclinações se alteram, mas porque a força é proporcional ao inverso do quadrado da distância. A proporção duplicada em relação a distância faz com que a força aumente significativamente conforme a distância diminui, contribuindo também para o aumento da distorção da órbita. Assim, no caso particular da Lua a órbita seria sensivelmente perturbada pela perturbação do Sol. Ora, isso não é necessariamente um problema para a hipótese da atração. Pelo contrário. Como já foi evidenciado, uma distorção da órbita da Lua é exatamente o que se detecta pelas observações astronômicas. Mas é claro que o objetivo de Newton passa a ser investigar a magnitude dessa distorção para compará-la posteriormente com a distorção observada no satélite da Terra. Esse seria o terceiro caso em análise. Pela extensão dessa última análise em relação às anteriores, e pela sua importância, Newton a considera numa proposição em separado. A proposição 66 do Livro I dos *Principia* apresenta, portanto, o

¹⁰⁶⁴ CW, p.569.

famoso problema que ficou conhecido como “problema dos três corpos” que sem dúvida consumiu os maiores esforços de Newton à época da composição do seu tratado, e ainda os esforços de muitos dos seus sucessores no século seguinte.¹⁰⁶⁵

O “problema dos três corpos”, de maneira mais geral, consiste na tentativa de determinar de maneira mais exata possível os movimentos de três corpos massivos cujas orbitas são perturbadas entre si pela ação de campos gravitacionais. Na sua forma original dos *Principia*, o problema consiste na tentativa de determinar os movimentos de três corpos com configurações semelhantes ao sistema composto pela Terra, Lua e Sol. Embora Newton jamais tenha conseguido determinar de maneira totalmente precisa tais movimentos, na proposição 66 ele apresenta uma conclusão que se adequa suficientemente aos seus interesses de investigar a hipótese da atração interplanetárias e as suas consequências.

Especificamente, duas consequências me interessam aqui. A primeira é sobre a magnitude da atração do Sol sobre a Lua em comparação com a atração da Terra. Como foi apresentado na seção 10.3, esse dado é importante para confirmar a lei do inverso quadrado para o caso da Lua na proposição 3 do Livro III.

A segunda consequência que me interessa é aquela que é expressa no próprio enunciado da proposição. Dados três corpos com configurações semelhantes a Terra, Lua e Sol, que se atraem mutuamente, o “corpo intermediário” (que representa a Terra), descreverá em torno do corpo maior (que representa o Sol), por raios traçados a partir do seu centro, áreas mais proporcionais aos tempos, e uma trajetória mais próxima da forma de uma elipse caso fosse considerado atraído pelos corpos menores e não totalmente em repouso. Em outras palavras, admitindo-se a Terra movendo-se em torno do Sol, a ocorrência da lei das áreas e de uma trajetória elíptica da Terra em torno do Sol seria menos exata considerando-se o Sol em repouso e não sendo atraído pela Terra e a Lua, do que seria o caso se ele fosse considerado como atraído por esses corpos menores. A intenção de Newton aqui é clara. A natureza é composta por leis exatas que são expressas por meio das regularidades dos fenômenos. Se numa situação suposta *A* as regularidades da natureza são expressas de maneira mais exata que numa situação suposta *B*, então a situação *A* está mais próxima da realidade absoluta que a situação *B*, a despeito do que podem informar enganosamente os nossos sentidos. No caso presente, admitindo-se que a Terra revolvesse em torno de um Sol imóvel, as regularidades

¹⁰⁶⁵ O “problema dos três corpos” foi estudado por d’Alembert, Euler, entre outros. Em 1761 d’Alembert declarou que a expressão técnica para esse problema específico surgiu em 1747.

percebidas seriam menos exatas do que seriam caso se considere um Sol com um pequeno movimento gerada pelas forças de atração da Terra e Lua.¹⁰⁶⁶

A proposição 67 e 68 supõem a situação aproximadamente inversa. Considerando-se o Sol girando em torno da Terra e da Lua, a órbita desse corpo maior seria mais próxima de uma elipse que obedece a lei das áreas se ele girasse em torno do centro de gravidade comum dos dois corpos menores (Terra e Lua), do que se essa órbita fosse considerada em torno do centro do corpo intermediário (da Terra) em repouso.

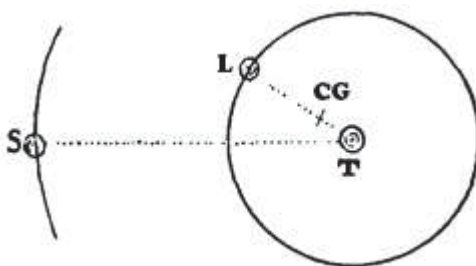


Figura 125 – Centro de gravidade do sistema Terra, Lua e Sol.
Fonte: *Principia* [Mote-Cajori].

A conclusão dessas últimas três proposições é evidente. Mesmo no caso mais complexo do sistema Terra, Lua e Sol, em que a perturbação da atração de um terceiro corpo não é desprezível nos movimentos resultantes, as regularidades de Kepler do movimento do Sol em relação ao centro da Terra, ou da Terra em relação ao centro do Sol, são obtidas *aproximadamente*, e de modo bastante razoável. Por outro lado, as consequências matemáticas da hipótese inicial da atração sugerem a possibilidade de avançar além dos fenômenos de Kepler; ou seja, sugere uma revisão nos próprios fenômenos. Isso porque as regularidades percebidas por meio de observações astronômicas e sistematizada por Kepler poderiam eventualmente ser concebidas de maneira *mais exata* caso se alterassem ligeiramente alguns pontos de referência dessa sistematização.¹⁰⁶⁷

Com relação ao movimento da Lua já sabemos que as suas alterações não podem ser ignoradas. Mas Newton procurou mostrar na proposição 66 que a atração do Sol sobre a Lua

¹⁰⁶⁶ Esse é um caso no qual a matemática nos ajuda a superar as limitações dos nossos sentidos ou dos dados empíricos.

¹⁰⁶⁷ E não haveria nada inusitado nisso. Seria mesmo de se esperar que uma hipótese, sendo verdadeira, levasse a resultados teóricos sobre os fenômenos mais exatos que os dados experimentais, algo que Harper (2011) chama de “fenômenos mediados pela teoria”. O resultado extremamente preciso do espaço percorrido de queda de um corpo na superfície em um segundo, obtido por Huygens com o auxílio do seu pêndulo, seria um exemplo emblemático de um “fenômeno mediado por teoria”. Esse seria um dos objetivos centrais da ciência: usar a teoria para obter dados mais precisos do mundo. De outra maneira, depois de um certo nível de concordância com os fenômenos, e de aceitação, a hipótese pode passar inclusive a regular os fenômenos e torna-los mais exatos.

produziria uma “força estranha” cerca de 178 vezes menor que a atração da Terra e, portanto, pela prop.45 do Livro I, geraria um movimento de precessão dos apsides de aproximadamente 3 graus por revolução, exatamente o que se observa nos fenômenos.¹⁰⁶⁸ A conclusão é que a hipótese da atração interplanetária não apenas é compatível com fenômenos de Kepler, mas fornece explicação para outros fenômenos de causas desconhecidas, como o movimento de precessão da Lua. Além do movimento de precessão da Lua outros fenômenos de causas desconhecidas recebem uma potencial explicação: o movimento das marés e a precessão dos equinócios.

Nos corolários 18 a 21 da proposição 66, Newton analisa a possível explicação para as marés. No corolário 18 ele afirma: “Imaginemos muitos corpos fluidos se movendo em torno de T [Terra] a iguais distâncias dele [i.e, na superfície] de acordo com mesma lei pela qual um corpo P [*Planeta*, ou Lua] revolve em torno do mesmo corpo T (...)”.¹⁰⁶⁹ E no corolário 19 ele continua: “imagine agora um globo T, que consiste de uma matéria não fluida (...) que contém um canal cavado em torno de toda a circunferência que contenha água; e imagine esse novo globo a revolver uniformemente em torno do seu eixo (...)”. “Essa água”, conclui Newton, “sendo alternadamente acelerada e retardada (como no corolário anterior), se moverá mais rapidamente na sizígia e mais lentamente nas quadraturas do que a própria superfície do globo, e assim avançará e retrocederá [*will ebb and flow*] no canal exatamente como o mar faz”.¹⁰⁷⁰

A hipótese da atração interplanetária, portanto, pode oferecer uma explicação para o movimento das marés. No corolário 22, Newton segue investigando uma possível influência dessa atração até mesmo para eixo de rotação do planeta, o que forneceria igualmente uma explicação para conhecido fenômeno da precessão dos equinócios, cuja causa até então era desconhecida.¹⁰⁷¹

A seção 11 do Livro ainda apresenta duas proposições que aqui não foram mencionadas (a prop. 63 e 69) e que possuem uma importância singular. No entanto, essas proposições foram apresentadas em locais mais convenientes nesse trabalho.¹⁰⁷² Para concluir esse apêndice será suficiente considerarmos o escólio final que Newton oferece ao final da seção 11. Esse escólio fornece preciosas pistas sobre os objetivos de Newton nessa seção e sobre o procedimento metodológico adotado.

¹⁰⁶⁸ Veja as seções 10.2 e 10.3.

¹⁰⁶⁹ CW, p.581.

¹⁰⁷⁰ Ibid, p.582.

¹⁰⁷¹ Naturalmente, ele não cita esse fenômeno no corolário; prossegue efetualmente a sua análise matemática genérica.

¹⁰⁷² Algumas dessas proposições foram apresentadas nas seções 10.3.1 e 10.5.4.

Escólio Final

Após a apresentação da proposição 69, Newton oferece um escólio conclusivo sobre toda a seção. Uma vez que esse escólio contém relevantes considerações sobre a abordagem metodológica utilizada nos *Principia* será de grande proveito citá-lo integralmente. Começemos cotejando o primeiro dos três parágrafos:¹⁰⁷³

Por meio dessas proposições nós fomos direcionados para a analogia entre as forças centrípetas e os corpos centrais para os quais essas forças tendem. Porque é razoável que forças direcionadas para corpos dependam da natureza e da quantidade de matéria de tais corpos, como ocorre no caso dos corpos magnéticos. E sempre que casos desse tipo ocorrem, a atração dos corpos deve ser apropriadamente atribuída à soma das forças das suas partículas individuais.¹⁰⁷⁴

Newton afirma que “dessas proposições nós somos direcionados para uma analogia entre as forças centrípetas e os corpos centrais”. Mas porque seríamos “direcionados” para essa analogia? Ora, porque todas as proposições anteriores confirmaram a hipótese inicial dos movimentos planetários serem causados por uma atração interplanetária ao menos semelhante à atração entre os corpos magnéticos. E, sendo isso verdade, é natural que ele continue a sua investigação nessa direção. O que mais poderia ser investigado a partir dessa analogia entre uma força de atração interplanetária e a força de atração magnética?¹⁰⁷⁵ Primeiro, a relação entre a força de atração e a massa dos corpos. “Porque é razoável” diz Newton, que assim como nos corpos magnéticos essas forças “dependam da natureza e da quantidade de matéria de tais corpos”. Segundo, deve ser investigado a possibilidade dessas forças surgirem da soma das forças exercidas pelas partículas individuais dos corpos. Uma vez que a força magnética é uma qualidade de corpos de certa natureza, é razoável supor por indução que as partículas dos corpos tenham essa mesma natureza.¹⁰⁷⁶ De fato, esses dois temas serão objeto de investigações subsequentes, mostrando como os estudos anteriores convenceram Newton da adequação dessa hipótese na explicação dos movimentos planetários.

A hipótese de uma atração magnética interplanetária (ou, ao menos, uma atração análoga ao magnetismo) suscita, naturalmente, uma questão sobre o *mecanismo* de ação dessa

¹⁰⁷³ O escólio da seção 11 tem apenas um parágrafo no original. Na tradução de Cohen, ele aparece em três parágrafos.

¹⁰⁷⁴ CW, p.588.

¹⁰⁷⁵ Ou, talvez, sem meias palavras: o que mais poderia ser investigado a partir da hipótese de que a causa da gravidade seja uma atração de natureza magnética?

¹⁰⁷⁶ Veja a Regra 3 na seção 12.1.

força. Assumir que a causa da gravidade e, conseqüentemente, dos movimentos orbitais dos planetas seja uma atração magnética ou, uma atração análoga ao magnetismo, não implica necessariamente que Newton estivesse se comprometendo com algum tipo de “ação à distância” sem qualquer intermediação.¹⁰⁷⁷ No segundo parágrafo do escólio essa questão fica clara:

Eu uso a palavra “atração” aqui num sentido genérico para uma tendência, qualquer que seja, dos corpos para aproximarem-se um do outro, quer essa tendência ocorra com um resultado da ação dos corpos sendo puxados um em direção ao outro, ou agindo um sobre o outro, por meio de espíritos emitidos, ou quer essa tendência surja da ação do éter ou do ar ou de qualquer meio que seja – corpóreo ou incorpóreo – de qualquer maneira impelindo os corpos que neles flutuam.

Essa talvez seja a melhor delineação da noção de *atração* que Newton oferece nos *Principia*. Ele considera nessa passagem duas possibilidades mais genéricas para a causa desse fenômeno. Primeiro, a atração entre dois corpos (seja a atração magnética ou outra análoga a ela) poderia eventualmente ocorrer por meio de “espíritos emitidos” ou, talvez melhor dizendo, pela “emissão de espíritos”. Embora seja difícil delimitar com precisão o que Newton quer dizer com essa expressão, é bastante provável que esteja relacionada a uma ideia bastante difundida na Europa medieval que admitia a existência de “tênuas e hipotéticas substâncias que formavam uma ponte entre o corpo e a alma, permitindo que a sua interação fosse melhor compreendida”.¹⁰⁷⁸ Vários filósofos recorriam à essas substâncias para explicar certas interações entre corpos na natureza.¹⁰⁷⁹ A segunda possibilidade considerada é a ação de algum meio, “éter”, “ar”, ou ainda qualquer outro desconhecido, seja “corpóreo ou incorpóreo”.

Nesse ponto é importante notar que a possibilidade da existência de um meio que justifique a atração entre os corpos não se confunde com a suposição de um meio responsável pelos movimentos planetários tal como os vórtices de Descartes testados no Livro II, por exemplo.¹⁰⁸⁰ No Livro II, Newton supôs a possibilidade do movimento planetário ser explicado por um meio que *empurra* os corpos ou por meio das forças de resistência da viscosidade dos fluidos, ou por meio da força de pressão. Em outras palavras, no Livro II Newton considerou a hipótese de um meio que gera um “impulso” no corpo, o que produz uma força de reação no próprio meio. Não é o caso aqui. Newton supõe de que haja algum

¹⁰⁷⁷ Veja mais sobre isso na seção 12.2.

¹⁰⁷⁸ Moshenska, 2014, p. 184-185.

¹⁰⁷⁹ Francis Bacon, por exemplo, se utilizou desse recurso no *Novo Organum*. Ao considerar as explicações fornecidas para a causa da gravidade, Hooke considerou e descartou esse tipo de explicação. Ver Hooke (1705) *Of Comets and Gravity*, p.176-185.

¹⁰⁸⁰ Veja o apêndice D.

meio que justifique “a ação dos corpos sendo impelidos *um em direção ao outro*”, ou que justifique os corpos “agindo um sobre o outro”, ou ainda a *atração mútua* dos dois corpos entre si. Que tipo de meio poderia gerar um fenômeno como esse? É precisamente essa a questão. E é muito difícil saber. Por isso mesmo ele não se limita aos meios conhecidos, ou mesmo ao suposto éter, mas considera “qualquer meio que seja – corpóreo ou incorpóreo (...)”. Caso seja um *meio* que provoca esse fenômeno da atração, é possível que esse meio tenha características diferentes de todas aquelas que imaginamos. Esse meio não atuaria *empurrando* os corpos; atuaria *pullando* dois corpos, um em direção ao outro.

A abrangência das possibilidades que Newton sugere nessa passagem é bastante extensa. É tão extensa que podemos concluir seguramente o que ele está dizendo sobre o mecanismo de ação desses fenômenos atrativos é que não tem a mínima ideia do que seja. Não obstante, ele parece convicto não apenas de que existe um tal fenômeno que se assemelha a uma “atração”, mas que ele é diverso do fenômeno do “impulso” gerado por um meio.¹⁰⁸¹ É por essa razão que ele insiste em enfatizar a sua abordagem metodológica. Uma ação, ou “atração”, semelhante ao magnetismo é uma coisa; a *causa* do magnetismo, ou dessa ação atrativa, é outra. Ele pode perfeitamente continuar investigando os *efeitos* e as consequências matemáticas dessa hipótese e postergar as considerações sobre a sua causa física ou mecânica para um momento mais adiante. É nesse sentido que ele conclui esse parágrafo afirmando que usa o termo “atração” no mesmo “sentido genérico” que emprega o termo “impulso”, considerando “não as espécies de forças e as suas qualidades físicas, mas as suas quantidades e proporções matemáticas”. Assim procedendo ele não precisa ficar paralisado por não ter a mínima ideia do que seja o mecanismo de ação ou a “causa física” da atração. Do mesmo modo que na investigação sobre as leis do movimento ele considerou somente a “quantidade matemática” do efeito do “impulso” sofrido por um corpo (ignorando o corpo causador do impulso), o que ele chamou de “força motriz impressa”, aqui também ele considera somente a “quantidade matemática” do efeito da “atração” sofrida por dois corpos (ignorando o agente causador dessa atração).

Essas últimas considerações sobre o sentido do termo “atração” abre espaço para um comentário geral de Newton sobre o seu procedimento metodológico, inserido no terceiro e último parágrafo do escólio. Trata-se da conhecida passagem que encerra a seção 11.

¹⁰⁸¹ Veja também sobre isso a seção 12.2.

Na matemática são investigadas as quantidades e proporções das forças que se seguem de quaisquer condições que são supostas. Em seguida, quando descemos para a física, essas proporções devem ser comparadas com os fenômenos, para que se encontre quais condições de força correspondem [*competant*] a cada tipo de corpos atrativos. E, então, finalmente, será possível argumentar de modo mais seguro concernente às espécies, causas, e proporções físicas dessas forças.

Newton informa três passos do seu procedimento aqui. O primeiro passo é proceder uma investigação matemática da situação. Mais especificamente, investigar “as quantidades e proporções das forças que se seguem de quaisquer condições questão supostas”. Em outros termos, investigar as *consequências matemáticas* de certas hipóteses, ou de certas condições supostas. Começa-se, portanto, com uma investigação matemática da situação. Como essa investigação é desenvolvida exatamente? A partir do levantamento de uma hipótese e do estabelecimento de condições matemáticas. Essa seção pode servir como exemplo. Newton partiu de uma hipótese: o movimento dos planetas é gerado por uma força de atração entre os planetas semelhante à atração entre corpos magnéticos num meio sem resistência. Partindo dessa hipótese ele investigou algumas características dos fenômenos magnéticos e estabeleceu como condições matemáticas da sua análise. Por exemplo, uma das condições matemáticas seria a operação peculiar da terceira lei do movimento entre dois corpos sujeitos à atração magnética. Outra condição seria a validade da primeira lei do movimento num meio sem resistência. Outra condição é que os corpos sejam capazes de se mover em órbitas estáveis. E assim por diante. Então, a partir dessas condições estabelecidas se investiga “as quantidade e proporções matemáticas das forças que se seguem [dessas condições] (...)”. No caso, vimos que dessas condições estabelecidas se seguem pelo menos duas proporções matemáticas de forças: uma força proporcional à distância entre os corpos, e uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância (prop. 58). A primeira produz duas órbitas elípticas concêntricas; a segunda produz duas órbitas elípticas com o centro de gravidade comum sobre o foco das elipses. Está concluído o primeiro passo.

O segundo passo do procedimento de Newton é “descer à física” e comparar essas proporções com os fenômenos. Aqui é importante perceber que, embora se fale de “descer à física”, em certo sentido ainda estamos num plano matemático da análise. Isso porque os fenômenos referidos são fenômenos matematizados. Por exemplo, o astrônomo procura expressar matematicamente as regularidades que observa no movimento dos astros. Ele procura “subir à matemática”, por assim dizer. No entanto visa expressar matematicamente aquilo que mais fielmente possível observa como regularidades na natureza. Então quando Newton fala em “descer à física” ele está falando em comparar as consequências matemáticas

obtidas das suas hipóteses assumidas com os fenômenos matematizados que procuram descrever com o máximo de precisão as regularidades da natureza. No presente caso, comparou-se as proporções de forças obtidas ($F \propto D$ e $F \propto 1/D^2$) com os fenômenos de Kepler (lei dos períodos e lei das áreas). Constatou-se, evidentemente, uma correspondência dos fenômenos com a lei de força $F \propto 1/D^2$. Estaria concluído o segundo passo do procedimento: descer à física e comparar as proporções obtidas com os fenômenos, “para que se encontre quais condições de força correspondem a cada tipo de corpos atrativos”. Os planetas seriam um “tipo de corpo atrativo” que exercem uma atração proporcional ao inverso do quadrado da distância. O mesmo procedimento explicado poderia ser empreendido para investigar as proporções das forças que atuam em outros “tipos de corpos atrativos”, como eventualmente os corpos elétricos.

O terceiro e último passo seria propriamente a argumentação sobre as causas físicas dos fenômenos: o objetivo final de todo o procedimento. Em vez de especular diretamente sobre a causa de um fenômeno físico gerando debates infundáveis entre os filósofos, Newton propõe esse método. Primeiro se procede uma investigação estritamente matemática da situação. Matematiza-se rigorosamente as regularidades observadas na natureza. Ou seja: se estabelecem os *fenômenos*. Em seguida, investiga-se as hipóteses explicativas que são compatíveis matematicamente com esses fenômenos, isto é, investiga-se as causas supostas que possuem proporções matemáticas das quais os fenômenos podem ser deduzidos. E somente após esse processo de investigação matemática deve-se argumentar sobre a causa de um fenômeno físico. Esse seria um “modo mais seguro” de argumentar sobre as causas de um fenômeno. Ao chegar nessa etapa, no mínimo já se teriam eliminado todas as hipóteses que não seriam conciliáveis matematicamente com os fenômenos. daquelas que são compatíveis seria possível avaliar o nível de compatibilidade de cada uma, e adaptá-las incluindo novos elementos que produzam exatamente os resultados que se desejam. Realizado esse processo, será possível firmar realmente os dois pés na física e refletir sobre a causa física dos fenômenos.

Mas essa reflexão não pode ser conclusiva antes de se esgotar todas as investigações matemáticas possíveis. É isso que se mostrou basicamente na seção 11. Após a determinação de uma hipótese que se adequava com grande precisão aos fenômenos, Newton antecipou uma especulação sobre a causa mecânica da atração entre dois corpos. No entanto, ele mesmo informou que não era o momento. Ainda haviam investigações matemáticas a serem feitas. A relação entre a força de atração e a massa dos corpos, e a possibilidade da força de atração ser o resultado da atração de cada partícula individual. É por essa razão que a seção 11 termina

com um encaminhamento para as investigações matemáticas futuras: “Vejam, portanto, com quais forças os corpos esféricos, consistindo de partículas que atraem do modo que aqui foi estabelecido, devem agir uns sobre os outros; e que tipo de movimentos resultam dessas forças”.

Trata-se da investigação sobre uma hipótese complementar. Que a atração exercida pelos corpos surge da atração de cada partícula. Seria possível testar as consequências matemáticas dessa hipótese para o caso de corpos de forma regular, como os corpos esféricos. Essa investigação poderia adicionar informações sobre a possível causa mecânica da força atrativa dos corpos. Especificamente, sobre a possível causa mecânica da gravidade. Com esse último escólio Newton encerra a seção 11 do Livro I.

APÊNDICE D – A DEFINIÇÃO DE QUANTIDADE DE MATÉRIA DOS *PRINCIPIA*

A definição de “massa” ou “quantidade de matéria” dos *Principia* geralmente tem sido considerada pelos comentadores como uma das contribuições originais de Newton na sua obra magna. Conforme Cohen ressalta, antes dos *Principia*, a “quantidade de matéria” era geralmente associada com o “peso estático” numa balança, como era a prática de Galileu, ou com alguma propriedade que se aproxima do que hoje entendemos por “volume”, como era o caso da “extensão” de Descartes, ou dos “moles” de Kepler.¹⁰⁸² Essa diversidade de abordagens gerava não raras vezes ambiguidades e confusões. Nos *Principia*, esse problema teria sido de uma vez por todas resolvido. Tanto o *volume* quanto o *peso* dos corpos seriam manifestações de uma propriedade ainda mais elementar: a *massa*. Assim, a utilização de conceitos vagos e confusos como “peso”, “extensão”, “moles”, as vezes referindo-se a mesma coisa, as vezes não, seria substituída por um conceito preciso, livre de ambiguidades, que tornaria possível um avanço significativo nos estudos da mecânica.

Mas a formulação desse conceito seria realmente uma contribuição *de Newton*? Ao que tudo indica, ele não forneceu contribuições significativas à noção de *matéria* dos modernos. E tampouco à noção de *quantidade de matéria*, uma vez que sem muito esforço é possível perceber que ela já estava abundantemente presente nos escritos de Boyle e Hooke.¹⁰⁸³ Que contribuição original, então, Newton teria oferecido? Certamente não seria na *formulação* do conceito. Alguém poderia defender que a sua contribuição teria sido no oferecimento de uma primeira *definição formal* do conceito. A *noção* de quantidade de matéria já estava relativamente difundida na prática da filosofia natural do século XVII, mas não havia uma formalização desse conceito, o que certamente dificultava as análises e diálogos entre os filósofos naturais. Sem dúvida, essa é uma contribuição que tem um papel importante. A pesquisa ganha um impulso quando um conceito é formalizado precisamente. Mas, ainda assim, poderíamos nos perguntar se a *formalização* seria tão importante a ponto de se aclamar o nome que a realizou. Seria a *formalização* de um conceito mais importante que a sua *formulação*? Talvez até poderia ser, caso a *formalização* de um certo conceito fosse um problema de extrema dificuldade. Mas seria esse o caso da quantidade de matéria? Acredito que dificilmente. Penso que se a única contribuição de Newton ao conceito de quantidade de

¹⁰⁸² Cohen, 1999, p.86.

¹⁰⁸³ Veja Hooke, 1705; e Boyle, 1772. O termo “massa” também já aparece nos estudos de Arquimedes. Veja “The sand-reckoner” em Archimedes, 1897.

matéria foi oferecer-lhe uma definição formal, então a sua contribuição tem sido superestimada.

Diante das reflexões do parágrafo anterior, creio ser pertinente se perguntar se haveria alguma outra contribuição de Newton ao conceito de quantidade de matéria *além* da referida *definição formal*. E caso haja, perguntar-se qual seria, exatamente, essa contribuição. Nesse apêndice pretendo refletir sobre essa questão. Especificamente, pretendo argumentar que (1) essa noção de quantidade de matéria já era amplamente difundida entre os modernos, e que sua a mera *definição formal* poderia ser feita sem grande esforço a partir dos pressupostos da filosofia mecânica; e (2) que ainda assim Newton ofereceu mais do que uma *definição formal* para esse conceito. Pretendo mostrar que Newton ofereceu um novo horizonte de aplicações e de precisão para essa já conhecida noção dos modernos, de modo que podemos entender que ele realmente fez contribuições significativas e originais a esse conceito, contribuições que culminaram na sua definição, e que estão presentes nos seus comentários. Paralelamente a esses objetivos, abordarei também a questão da possível “circularidade” dessa definição.

Nos *Principia*, a definição de quantidade de matéria aparece como a *Definição 1*, logo no início da obra: “A quantidade de matéria é a medida da matéria que surge da sua densidade e volume conjuntamente”.¹⁰⁸⁴ Em outros termos, a quantidade de matéria é o produto da densidade de um corpo pelo seu volume. Em símbolos:

$$m = d \cdot V$$

Nos últimos anos essa definição foi submetida ao escrutínio de vários filósofos e cientistas. Uma das críticas mais contundentes foi do eminente físico e filósofo austríaco Ernst Mach, que a acusou de circularidade.¹⁰⁸⁵ Newton teria definido a massa de um corpo em termos da sua densidade. No entanto, a densidade é reconhecidamente definida em termos da massa; a definição de Newton seria, portanto, circular. Não é difícil perceber que a análise de Mach está equivocada. Ele impôs anacronicamente uma definição de densidade muito distante da época dos *Principia*. No séc. XVII, a densidade não era obtida por meio da massa e o volume de um corpo, assim como fazemos hoje. Até porque, conforme já foi dito, o conceito de massa só foi formalmente definido a partir dos *Principia*. Conforme Cohen nos mostra, provavelmente o conceito de densidade de Newton estava muito mais relacionado com os

¹⁰⁸⁴ CW, p.403.

¹⁰⁸⁵ Mach, 1919. Veja também Cohen, 1999, p.99.

experimentos de Boyle sobre a compressão dos gases.¹⁰⁸⁶ Mas eu acrescentaria que, ainda antes disso, a noção de densidade dos modernos estava relacionada com os estudos e experimentos de Arquimedes. Mais especificamente, estou convencido que tanto a noção de *densidade* quanto a noção de *quantidade de matéria* surgiram da reinterpretação dos estudos de Arquimedes à luz dos princípios da nova filosofia mecânica emergente e, em particular, dos experimentos de Boyle. A seguir procuro oferecer um breve esboço dessa reinterpretação realizada pelos modernos contra o pano de fundo de alguns conceitos e resultados da filosofia aristotélica e arquimediana. Acredito que esse esboço ajudará tanto a esclarecer a questão da não-circularidade da definição de massa de Newton, quanto a isolar a sua contribuição original a esse conceito.

Como é de amplo conhecimento dos historiadores da filosofia, Aristóteles construiu um sofisticado sistema cosmológico que visava explicar praticamente a totalidade da realidade e dos fenômenos naturais. Esse sistema, no entanto, não foi construído arbitrariamente, mas a partir do que informavam tanto a experiência cotidiana quanto outras mais elaboradas. Certamente Aristóteles avançou para além da experiência em sua filosofia, todavia o que ressaltado é que ele não a ignorou. Sem dúvida, um dos seus objetivos era explicar os fenômenos que se observavam na experiência cotidiana. No que toca especificamente aos fenômenos relacionados ao movimento dos corpos, não nos seria difícil imaginar algumas das experiências que certamente foram levadas em conta na teorização de Aristóteles. Penso que seria um exercício bastante proveitoso para a presente discussão tentar reconstruir brevemente alguns dos enunciados relativos a essas experiências, ainda que de maneira especulativa.

No que se refere às experiências e conhecimentos cotidianos relacionados ao movimento dos corpos, é razoável supor que, mesmo na antiguidade, alguém poderia formular os seguintes enunciados consensuais:

1. Os corpos têm duas qualidades básicas, facilmente detectáveis pela experiência: *tamanho e peso*.
2. O *peso* é uma qualidade que está relacionada à dificuldade de erguer ou mover um corpo. Há corpos que oferecem maior dificuldade para serem movidos; há corpos que oferecem menor dificuldade para serem movidos.
3. O *tamanho* é uma qualidade que está relacionada ao espaço ocupado por um corpo.
4. Quanto maior o tamanho do corpo, maior é o seu peso.

¹⁰⁸⁶ Veja Cohen, 1999, p.89.

5. Corpos de naturezas diferentes (madeira, água, ouro, etc), e mesmo tamanho, tem pesos diferentes.
6. Uma força é capaz de gerar movimento num corpo. A velocidade desse movimento gerado por uma força é tanto maior quanto maior for a força; e é tanto menor quanto maior for o peso do corpo.
7. Há corpos que, deixados por si só, se movem em direção ao centro da Terra. Esse movimento não é gerado por qualquer força aparente, e nem é tanto menor quanto maior o peso do corpo. Portanto, esse movimento parece não obedecer às mesmas regras do movimento gerado por uma força.
8. Há corpos que, deixados por si só, se movem se afastando do centro da Terra. Esse movimento também não é gerado por qualquer força aparente, e também parece não obedecer às regras do movimento gerado por uma força.
9. Há, portanto, dois tipos de movimentos que obedecem a regras distintas e próprias: o movimento gerado por uma força, e o movimento natural de queda dos corpos para o centro da Terra, e de ascensão se afastando do centro da Terra.

Esses enunciados corresponderiam a algumas das experiências cotidianas relacionadas aos movimentos dos corpos que Aristóteles possivelmente levou em consideração para formular as suas explicações e interpretações.¹⁰⁸⁷ Apresento, agora, também de modo bastante resumido e simplificado, a interpretação aristotélica já acabada para essas experiências cotidianas, dentro do escopo do seu sistema cosmológico:

1. Toda a realidade pode ser caracterizada pelos princípios da matéria e forma.
2. Todos os corpos são feitos de matéria que, por sua vez, é constituída de quatro elementos, terra, água, ar e fogo, em diferentes proporções.
3. Cada elemento tem o seu lugar natural no cosmo. O lugar natural do primeiro é o centro da Terra, no centro do Universo, do segundo é uma esfera concêntrica afastada da superfície da Terra, e dos demais, esferas sucessivamente mais afastadas que a anterior.

¹⁰⁸⁷ Procurei formular os enunciados da maneira mais espontânea possível, tentando reproduzir as ideias e termos que poderiam ser usados na época. Mas não seria o caso de se aplicar um rigor demasiado à análise da verossimilhança desses enunciados. O meu objetivo aqui é mais heurístico.

4. Cada corpo tende a se mover espontaneamente para o seu local natural no centro da Terra ou para camadas superiores se afastando do centro da Terra de acordo com os elementos que mais abundam na sua constituição.
5. Os corpos que possuem maior proporção de elemento “terra” é um corpo “grave” ou “pesado”, pois tenderá espontaneamente para baixo, para o centro da Terra. Os corpos que possuem menor proporção de elemento “terra” em relação aos outros elementos é um corpo “leve”, pois tenderá para cima, afastando-se do centro da Terra. Os elementos que compõem a matéria podem ser distinguidos, portanto, pela abundância de elementos “graves” e “leves”.
6. Em corpos pesados de mesmo tamanho, quanto maior a proporção de elemento graves maior será peso.
7. Os movimentos podem ser divididos em “naturais” e “violentos”. O movimento natural é a tendência espontânea dos corpos em retornar ao local natural. O movimento violento é aquele gerado por uma força.
8. A velocidade do “movimento violento” de um corpo é tanto maior quanto maior for a força que o lançou, e tanto menor quanto maior for o peso do corpo, ou, de outro modo, tanto menor quanto maior a quantidade de elementos graves presentes nele.
9. Corpos mais pesados caem em direção ao solo mais rapidamente que os menos pesados, uma vez que possuem mais elementos graves na sua constituição e, portanto, possuem maior tendência para retornar ao seu local natural no centro da Terra.

As duas sequencias de proposições acima resumem as experiências cotidianas e os conceitos da filosofia aristotélica que as explicam. Ambas as sequências formam o pano de fundo contra o qual projetarei os estudos de Arquimedes e as ideias dos modernos sobre a densidade e quantidade de matéria. No que se refere aos estudos de Arquimedes, ele comparou o peso dos corpos graves em balanças estáticas e os associou com os seus respectivos volumes. Duas conclusões elementares surgem desses experimentos. Primeiro, que dois corpos de tamanhos iguais podem ter, de fato, pesos muito distintos; e segundo, que para corpos de mesma natureza (ouro, prata, água, etc), o peso é proporcional ao volume. Embora já se pudesse desconfiar dessas duas conclusões a partir das experiências cotidianas, com o uso de balanças Arquimedes não deixou margens para dúvidas. Em particular, o segundo resultado de Arquimedes era de especial interesse. Ele permitia comparar a proporção entre o peso de dois corpos para um mesmo volume. Por exemplo, numa balança em equilíbrio o volume de ouro numa extremidade está para o volume de prata na outra assim

como 1 está para 1,9. Como o peso é proporcional ao volume para um corpo de mesma natureza, pode-se dizer que a mesma proporção se observa entre os pesos da prata e do ouro para o mesmo volume. Ou seja, o peso do ouro está para o peso da prata assim como 1,9 está para 1. A mesma comparação pode ser aplicada utilizando várias outras espécies de corpos. Por exemplo, comparando o volume de ouro com o volume de água numa balança em equilíbrio é possível concluir que eles estão entre si assim como 1 está para 19. Fazendo o mesmo procedimento com a prata é possível que concluir que o seu volume estará para o mesmo peso de água assim como 1 está para 10. E assim por diante.

É claro que essas proporções constantes se observam entre corpos da mesma natureza se constituem naquilo que hoje chamamos de *densidade* dos corpos e, por essa razão, Arquimedes geralmente é considerado o primeiro formulador dessa ideia. Todavia é muito temerário admitir que o filósofo grego realmente estivesse pensando nos mesmos termos que hoje pensamos. Com efeito, não fui capaz de achar qualquer evidência de que assim ele o tenha feito. Da mesma forma, não fui capaz de encontrar qualquer interpretação física que Arquimedes tenha feito desses resultados.¹⁰⁸⁸ No entanto, um exercício interessante seria pensar como essas proporções constantes entre pesos e volumes encontradas por Arquimedes poderiam ser interpretadas à luz da filosofia aristotélica.

Como foi apresentado logo acima, na filosofia aristotélica os corpos pesados eram compostos por uma maior quantidade de *elementos graves*, ou de *matéria grave*. Uma vez que para quaisquer amostras de corpos da mesma natureza o peso é proporcional ao volume, então isso significa que a mesma proporção de matéria grave se mantém em cada amostra, independente do tamanho da amostra. A relação de 1 para 1,9 entre os volumes do ouro e da prata numa balança em equilíbrio indica também a proporção entre a quantidade dos elementos graves na prata e no ouro; qualquer que seja a quantidade desses elementos nos dois corpos eles estarão entre si como 1 está para 1,9. Do mesmo modo, a relação de 1 para 10 entre o peso da água e da prata indica a proporção entre a quantidade dos elementos graves na água e na prata. Essas proporções, por conseguinte, indicariam no máximo uma espécie de *densidade da matéria grave* nos corpos, ou seja, a proporção da concentração de elementos graves em corpos de determinada natureza. Essa proporção seria constante em corpos da mesma natureza.

É claro que Arquimedes não usou a expressão “densidade de matéria grave”. Ele chamou a referida proporção constante de “gravidade específica” dos corpos, que poderia ser

¹⁰⁸⁸ Eu pesquisei sobretudo na coletânea de Heath, 1897.

entendida como a proporção específica com a qual cada corpo pesado gravita para o centro da Terra.¹⁰⁸⁹ Entretanto, volto a dizer, interpretada à luz dos conceitos da filosofia aristotélica essa proporção bem poderia ser considerada a densidade relativa dos elementos graves entre corpos de natureza distinta. Chamando *peso* de P , *volume* de V , e a *gravidade específica* ou *densidade relativa da matéria grave* de d_g , os resultados de Arquimedes para os corpos de *mesma natureza* poderiam ser assim resumidos:

$$P \propto V$$

$$e$$

$$d_g \propto \frac{P}{V}$$

Mas como o peso dos corpos é proporcional à *quantidade de matéria grave* na sua composição (m_g), então a última proporção também pode ser escrita como:

$$d_g \propto \frac{m_g}{V}$$

$$ou$$

$$m_g \propto d_g V$$

A densidade da matéria grave é a quantidade dos elementos graves num corpo por unidade de volume ou, de outro modo, a quantidade de matéria grave é proporcional ao produto da densidade dos elementos graves pelo volume do corpo. Essa noção de densidade e de quantidade de matéria, contudo, não são correspondentes a aquelas que Newton lança mão na sua primeira definição dos *Principia*. Mas são possivelmente essas noções que constituem o alicerce a partir do qual os modernos procederão as suas reinterpretações.

Como se sabe, na modernidade a filosofia aristotélica perdeu espaço perante a filosofia mecânica de Descartes, Boyle e muitos outros. Uma das mais significativas transformações conceituais empreendidas nessa filosofia em relação ao aristotelismo foi no próprio conceito de matéria. Boa parte dos filósofos naturais da época adotou, grosso modo, alguma versão do atomismo. Os quatro elementos aristotélicos foram rejeitados. A matéria passou a ser entendida como composta por partículas ou corpúsculos mínimos e *iguais*. A matéria também

¹⁰⁸⁹ Ele usa essa expressão em “On floating bodies”. Veja Archimedes, 1897.

seria *extensa*, ou seja, teria a propriedade de ocupar espaço.¹⁰⁹⁰ E todos os fenômenos naturais deveriam ser explicados em termos de matéria e movimento.¹⁰⁹¹ É possível perceber que essas novas concepções introduzidas pela filosofia mecânica já provocam uma reformulação importante na interpretação dos experimentos de Arquimedes. Uma vez que não há distinção entre os elementos da matéria, dois corpos com o *mesmo volume* numa balança apenas podem ter pesos diferentes em razão da própria *quantidade de matéria* desses corpos. O maior peso de um dos corpos indica que ele possui uma maior quantidade de matéria. Essa interpretação implica, evidentemente, que há *espaços vazios* entre as partículas de matéria (pois para um mesmo volume haveria diferentes quantidades de matéria). Mas para não admitir um vácuo, alguém poderia defender também que há um segundo tipo de matéria bem distinto do primeiro, muito mais sutil, não perceptível, que permeia livremente os espaços entre as partículas que compõem os corpos. Aparentemente Boyle defendeu a primeira posição; Descartes, a segunda. O antigo “éter” ocuparia o papel dessa matéria sutil. De todo modo, como o éter permearia todo o espaço e todas as coisas, o seu peso não seria percebido, apenas aquele das partículas de matéria.

Assim, na análise moderna dos experimentos de Arquimedes, dois corpos podem possuir o mesmo volume e ainda assim pesos diferentes porque em um deles as partículas de matéria estão mais concentradas do que no outro, acumulando, assim, mais quantidade de matéria no mesmo volume. Os experimentos de Boyle com os gases ofereciam suporte adicional para essa visão. Em seus experimentos com ar, gases e outros materiais ele constatou que uma dada quantidade de matéria poderia ser comprimida e expandida. Em outros termos, um certo corpo que antes ocupava determinado espaço pode, em algumas circunstâncias, ocupar um espaço menor.¹⁰⁹² Nesses casos, os corpúsculos de matéria no corpo ficariam mais concentrados em razão do menor espaço ocupado forçadamente por eles. Em seus estados naturais, portanto, os corpos de mesma natureza teriam uma concentração constante de matéria corpuscular ou, dito de outra maneira, as quantidades de matéria entre amostras de tamanhos diferentes estariam entre si numa proporção constante. Portanto, deve haver poucas dúvidas que dos experimentos de Boyle e Arquimedes, os filósofos naturais do séc. XVII – como Hooke, Descartes, Newton, o próprio Boyle, entre outros – entenderam que

¹⁰⁹⁰ A primeira frase corresponde a uma ideia mais explicitamente defendida por Boyle. A segunda, por Descartes. Embora Boyle e Descartes diverjam em outros aspectos do mecanicismo, essas duas ideias parecem conciliáveis.

¹⁰⁹¹ Não ignoro que havia uma rica variação de concepções entre os modernos. Aqui tento destacar apenas as concepções dominantes ligadas a filosofia mecânica.

¹⁰⁹² No comentário à Definição 1 o próprio Newton menciona alguns exemplos desses experimentos, como se mostrará logo mais.

uma das diferenças fundamentais entre o ouro e a prata era que os corpúsculos de matéria no ouro estavam mais concentrados ou comprimidos que na prata. E que para cada corpo de natureza específica havia uma concentração específica de matéria. Os modernos chamaram essa concentração de “densidade”.¹⁰⁹³

Desse modo, a *densidade de matéria* (d) dos corpos poderia ser expressa matematicamente de maneira semelhante a que expressamos a *densidade da matéria grave* (d_g) mais acima:

$$d \propto \frac{P}{V},$$

onde P é o peso do corpo numa balança estática e V é o seu volume. Naturalmente, o peso dos corpos na balança só pode ser determinado em relação a outro corpo. Por conseguinte, essa densidade só pode ser determinada de modo relativo. Por exemplo, para dois corpos, A e B, de naturezas diferentes, numa balança em equilíbrio, a densidade relativa pode ser determinada por:

$$\frac{d_A}{d_B} = \frac{P_A/V_A}{P_B/V_B}$$

ou

$$\frac{d_A}{d_B} = \frac{P_A}{P_B} = \frac{V_B}{V_A}.$$

A densidade relativa de matéria entre os corpos A e B está para a razão direta dos seus pesos numa balança e para a razão inversa dos seus volumes. Mas o peso de um corpo específico é proporcional à sua quantidade de matéria¹⁰⁹⁴, então também temos que:

$$d \propto \frac{m}{V}$$

¹⁰⁹³ A densidade já era um conceito usado tanto por Hooke quanto por Boyle, pelo menos.

¹⁰⁹⁴ Quando se tem dois corpos de naturezas diferentes e volumes exatamente iguais numa balança eles têm pesos diferentes. Logo, o peso depende da quantidade de matéria. Para corpos de mesma natureza o peso é proporcional ao volume. Mas como a matéria é extensão, a quantidade de matéria é proporcional ao volume. Logo, em corpos de mesma natureza a matéria é proporcional também proporcional ao peso dos corpos. Conclusão: o peso é proporcional à quantidade de matéria.

ou

$$m \propto dV$$

A quantidade de matéria é dada pela densidade de matéria do corpo tomada conjuntamente com o seu volume. Precisamente a definição apresentada por Newton nos *Principia*.

É fácil perceber aqui que a quantidade de matéria (m) não é uma quantidade que é determinada diretamente. O peso e o volume é que são empiricamente determináveis. A densidade é determinada a partir dessas duas quantidades. Portanto, a *quantidade de matéria* é uma invenção dos modernos. É a interpretação dos experimentos de Arquimedes a partir da suposição (derivada da filosofia mecânica e dos experimentos de Boyle) que todos os corpos são formados de corpúsculos únicos de matéria. O peso de uma amostra surge – e é proporcional – à quantidade de matéria que há na amostra. Para amostras de *mesma natureza*, no entanto, a quantidade de matéria é proporcional também ao volume. Logo, para corpos de mesma natureza, vale a relação:

$$m \propto P \propto V$$

A quantidade de matéria é proporcional tanto ao peso quanto ao volume dos corpos.

Contudo, insisto, a massa não é uma quantidade primária (empiricamente falando); o peso e o volume é que são. É provável que por essa razão Galileo, Descartes, Huygens entre outros, preferiam usar como parâmetro de *medida* da matéria o *volume* ou o *peso* dos corpos. Mas no caso específico de se usar o *volume* como parâmetro há o inconveniente de ter sempre que esclarecer sempre o “material” preciso dos corpos considerados. Naquela época isso nem sempre deveria ser simples. No caso de se usar o *peso* como parâmetro há outro inconveniente que mais adiante ficará claro. Newton, por conseguinte, preferiu trabalhar com uma quantidade secundária, a *quantidade de matéria*.¹⁰⁹⁵

De tudo o que foi exposto até aqui deve ter ficado claro que a definição newtoniana de quantidade de matéria em termos de densidade e volume não é circular. A densidade era definida em termos de quantidades primárias, no caso, o peso relativo de um corpo aferido numa balança estática e o seu volume. Além disso, o seu conceito estava bem estabelecido entre os modernos como a concentração da quantidade de matéria num determinado espaço

¹⁰⁹⁵ Perceba que a massa é uma quantidade secundária, digamos, na “ordem do conhecimento”, mas na “ordem das coisas” é uma quantidade primária.

ocupado por um corpo. Em certas circunstâncias essa concetração poderia ser aumentada ou diminuída pela compressão ou expansão dos corpos. Esse contexto fica claro pelo comentário de Newton após o enunciado da Definição 1.

Se a densidade do ar é duplicada num espaço que também é duplicado, haverá quatro vezes mais ar; e haverá seis vezes mais ar se o espaço for triplicado. O caso será o mesmo para a neve e pós condensados por compressão ou liquifação, e também para todos os corpos que são condensados de vários modos por quaisquer causas que sejam. Presentemente, não estou levando em consideração qualquer meio, se houver algum, que livremente permeia os interstícios entre as partes dos corpos [i.e., o suposto éter]. Além disso, em qualquer situação que eu use o termo “corpo” ou “massa” nas páginas seguintes eu me refiro a essa quantidade. Ela pode ser conhecida pelo peso de cada corpo, pois é proporcional ao peso, como se mostrará a seguir por meio de experimentos com pêndulos realizados de maneira acuradíssima.¹⁰⁹⁶

Da primeira frase da passagem percebemos que caso uma amostra de ar fosse submetida a um processo de compressão de modo que a sua densidade fosse duplicada (ou seja, seu volume fosse reduzido pela metade), e essa mesma amostra fosse comparada com outra natural (i.e., não comprimida), então, se a primeira amostra tiver o dobro do volume da segunda ela necessariamente terá – uma vez que já tinha o dobro da densidade – quatro vezes mais quantidade de matéria. Se eventualmente essa primeira amostra tivesse o triplo do volume, a sua quantidade de matéria seria seis vezes maior e assim por diante. Embora se trate de uma mera ilustração de aplicação da definição, os exemplos escolhidos por Newton revelam exatamente o contexto que apresentei dos experimentos de Boyle. E esses exemplos sugestivos continuam na sequência. A compreensão da neve e de variados tipos de *pó* também revelam que a matéria pode permanecer num estado de maior ou menor concentração de partículas. Paralelamente a esses exemplos também estão subentendidos os experimentos de Arquimedes. Newton admite, ainda que discretamente, que a massa não é uma quantidade determinada diretamente. Ele afirma que ela “pode ser conhecida pelo peso de cada corpo”. Além disso, chama essa quantidade pelo termo arquimediano de “massa”. Restam poucas dúvidas, portanto, que a noção newtoniana de “densidade” está bem estabelecida nesse contexto e assim a sua definição de massa não pode ser considerada circular.

Por outro lado, as reflexões dos parágrafos anteriores reforçam a desconfiança de que não há nada muito original na definição de Newton. Ele simplesmente teria formalizado a definição de um conceito que apenas não havia sido formalizado antes pela sua manifesta obviedade entre os modernos. De fato, esse seria o caso se não fosse o último comentário de Newton na definição. Ele afirma: “pois [a quantidade de matéria] é proporcional ao peso,

¹⁰⁹⁶ CW, p.403.

como se motrará a seguir por meio de experimentos com pêndulos realizados de maneira acuradíssima”.¹⁰⁹⁷ Essa última frase de muda tudo de figura.

Os “experimentos com pêndulos” que Newton se refere são os experimentos realizados para medir a aceleração da queda dos corpos graves. Os estudos de Galileu haviam mostrado que, diferentemente do que havia ensinado Aristóteles, os corpos caem em direção à Terra de alturas iguais em tempos iguais, ou seja, caem com iguais acelerações. Essa conclusão do matemático italiano recebeu um robusto apoio experimental pela invenção do pêndulo de Huygens, que permitiu determinar com uma precisão surpreendente o espaço percorrido por um corpo em queda. A igualdade dos períodos de oscilação do pêndulo durante longos intervalos indicava uma equivalência nos tempos de queda para corpos diferentes. Os corpos mais pesados oscilavam com mesmo período que os mais leves. Poranto, todos os corpos se moviam em direção à Terra rigorosamente com a mesma aceleração.¹⁰⁹⁸ Todavia, a questão que se deve fazer é a seguinte: o que exatamente esses experimentos sobre a aceleração da queda dos corpos teriam a ver com a proporcionalidade entre a quantidade de matéria de um corpo e o seu peso numa balança estática? Que relação haveria entre as duas coisas? Enquanto o peso do corpo observado numa balança estática aumenta proporcionalmente com a quantidade de matéria do corpo (como já foi evidenciado), os estudos de Galileu revelam aparentemente coisa bem distinta: que a aceleração do movimento descendente dos corpos *independe* completamente da sua quantidade de matéria. Como, então, esses experimentos com pêndulos poderiam revelar a proporcionalidade entre o peso e a massa? É precisamente nesse ponto que entram as contribuições originais de Newton.

A filosofia mecânica dos modernos levou a outras reformulações importantes além daquelas que foram apresentadas brevemente mais acima. Valerá a pena nesse momento reunir essas novas reformulações com as já citadas anteriormente para tornar mais claro as contribuições de Newton que serão comentadas na sequência. Eis a interpretação dos modernos para as experiências cotidianas relacionadas com o movimento dos corpos:¹⁰⁹⁹

1. Todos os fenômenos naturais podem ser reduzidos a matéria e movimento.
2. Todos os corpos são compostos de matéria. A matéria é composta de partículas ou corpúsculos iguais, e não por quatro elementos distintos.

¹⁰⁹⁷ CW, p.404.

¹⁰⁹⁸ Veja mais sobre isso na seção 10.4.1.

¹⁰⁹⁹ Refiro-me às experiências cotidianas listadas mais acima, que supostamente serviram de apoio para a interpretação aristotélica da natureza.

3. Portanto, o que provoca tanto a *gravidade* e quanto a *levidade* dos corpos é não a proporção de elementos leves e pesados, cada qual com uma tendência espontânea de se mover para o lugar natural, mas é a densidade de partículas de matéria.¹¹⁰⁰
4. Portanto, não há diferença entre “movimento natural” e “movimento violento”. Há apenas um único tipo de movimento, gerado pelas mesmas causas.
5. A causa de todo movimento é uma força.¹¹⁰¹ Essa força se manifesta pelo impulso gerado pelo contato de um corpo sobre outro.
6. Portanto, o “peso” (o antigo movimento “natural” dos corpos para o centro da Terra) não passa do efeito de uma força de origem desconhecida que produz o movimento descendente dos corpos.

Do último ponto elencado acima observa-se de imediato que o conceito de “peso”, para os modernos, passa a ter uma conotação distinta dos antigos. Não se trata mais de uma *qualidade* dos corpos que surge do tipo de matéria que mais abunda na sua constituição. À luz da filosofia mecânica o “peso” passa a ser entendido como o *efeito de uma força*. O movimento descendente dos corpos deve ser gerado, como qualquer outro movimento, pela ação de uma força. Não seria sem razão, portanto, que a expressão “força da gravidade” se torna usual nesse período, mesmo antes dos *Principia*. Na filosofia aristotélica uma expressão tal como “força da gravidade” seria um contrassenso. A “gravidade” é uma qualidade dos corpos; é um movimento *espontâneo*, precisamente o oposto do movimento “violento” ou “forçado”, que ocorre pela ação de uma força. Já para os modernos ela se torna uma expressão comum, posto que uma vez derrubadas as distinções aristotélicas, a ação de uma “força” passa a ser exatamente o que caracteriza o movimento descendente dos corpos. Ora, essa reformulação coloca em relevo a questão da relação entre o “peso” de um corpo medido numa balança estática (ou seja, a força que ele exerce na balança) e a força que gera movimento dos corpos.

Não é difícil perceber que ao se demolir a distinção entre “movimento natural” e “movimento violento”, bem como a atribuição de causas diferentes entre esses dois tipos de movimento, surge a necessidade de explicar como a *força estática* numa balança está relacionada com a força que gera o movimento dos corpos (a *força motriz*). A essa altura, não

¹¹⁰⁰ Quando a densidade de matéria de um corpo é maior que a densidade de um meio fluido no qual está imerso, ele descenderá no fluido pois este cederá devido a maior gravidade desse corpo. Quando a situação for inversa o corpo emergirá, pois sendo a gravidade do fluido acima do corpo maior que a gravidade do próprio corpo ele tomará o seu lugar, impulsionando o corpo sucessivamente para uma camada superior. Tanto Boyle quanto Newton explicaram dessa maneira o fenômeno da *levidade*. Veja o apêndice B.

¹¹⁰¹ Aqui ainda estou desconsiderando a inclusão do princípio da inércia após Descartes.

deveria haver dúvida que para os modernos essas duas forças estavam relacionadas. Restava saber exatamente como. Mas para compreender essa relação seria preciso primeiro investigar minuciosamente as leis envolvidas no antigo “movimento violento” dos corpos para, depois, associar os resultados com a força estática na balança. Acredito que esse foi um dos principais projetos de investigação do séc. XVI e XVII, que envolveu as mentes mais brilhantes da época na tentativa de desvelar as leis que regem as colisões entre os corpos. Ao meu ver, o principal objetivo desses estudos era a formulação de um parâmetro para determinar a *força motriz* em analogia com a *força estática* dos corpos numa balança, de modo que se pudesse explicar a partir de uma única causa tanto o movimento dos corpos em colisão, quanto o movimento de queda dos corpos pesados, e as forças com as quais eles excitam uma balança em equilíbrio. Afinal, todos esses fenômenos deveriam ser explicados por meio de causas semelhantes, que obedecessem às mesmas regras.

Como foi mencionado na seção 5.2.2 e 5.2.3, Descartes e Huygens aparentemente desistiram do projeto de encontrar a relação exata entre a força estática na balança e a força motriz e, embora Wallis e Wren não tenham desistido, não foram totalmente bem-sucedidos na formulação e na compreensão da referida relação. Newton, por sua vez, foi capaz concretizar esse projeto. De fato, ele conseguiu determinar precisamente as regras das colisões entre os corpos e empreender uma formulação para força motriz equivalente a força estática numa balança, subsumindo esses campos sob um único princípio explicativo.

Como se sabe, Arquimedes desenvolveu o princípio da alavanca, e a partir desse princípio investigou o comportamento dos corpos em balanças estáticas, chegando a algumas conclusões. Ele concluiu que dados dois corpos de *mesma espécie (material)* e volumes diferentes, A e B, numa balança em equilíbrio pela alteração da posição do ponto de apoio da balança, o produto dos seus pesos (ou, mais precisamente, *volumes*) com as respectivas distâncias até o ponto de apoio (ou o centro de gravidade) será sempre igual.

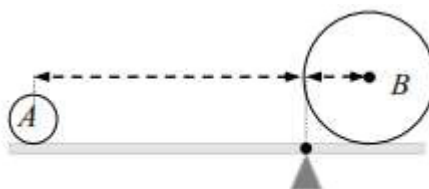


Figura 126 – Estudos de Arquimedes sobre o centro de gravidade em balanças estáticas
Fonte: o autor

Ou seja, sendo s_A e s_B as distâncias do corpo A até o centro de gravidade e do corpo B até o mesmo ponto respectivamente, então:

$$V_A s_A = V_B s_B$$

O que naturalmente pode ser escrito também como:

$$P_A s_A = P_B s_B$$

Uma vez que são corpos da mesma espécie e, portanto, o volume é proporcional ao peso. Essa é uma das conclusões fundamentais dos estudos de Arquimedes em *Sobre o equilíbrio dos planos*.¹¹⁰²

Pois bem, com os estudos de Newton que culminaram nas leis movimento tornou-se possível relacionar esses resultados de Arquimedes sobre os corpos em balanças estáticas com a força motriz. Por exemplo, considere dois corpos, A e B , de mesmo material e volumes diferentes colidindo frontalmente um contra o outro. Newton percebeu que, após o impacto, o produto do volume dos corpos pela sua respectiva mudança de velocidade era igual (terceira lei do movimento). Agora, dispondo esses *mesmos corpos* numa balança em equilíbrio, pela alteração da posição do ponto de apoio da balança (i.e, do centro de gravidade), pelos resultados de Arquimedes já sabemos que o produto do volume dos corpos pela distância até o centro de gravidade também será igual.

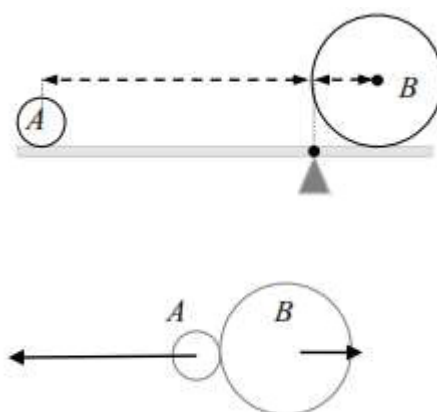


Figura 127 – Comparação entre dois corpos numa balança estática e colidindo frontalmente
Fonte: o autor

¹¹⁰² Archimedes, 1897b.

Assim, nessa situação é possível concluir que a distância do corpo A até o centro de gravidade numa balança estática estará para a distância do corpo B até o mesmo centro, assim como a mudança de velocidade do corpo A estará para a mudança de velocidade do corpo B , numa situação em que ambos colidem frontalmente.

$$\frac{V_A \Delta v_A}{V_A s_A} = \frac{V_B \Delta v_B}{V_B s_B}$$

e

$$\frac{\Delta v_A}{s_A} = \frac{\Delta v_B}{s_B}$$

Mas como trata-se de dois corpos de mesma espécie, e para os modernos a quantidade de matéria é proporcional ao volume, podemos também escrever as proporções acima como:

$$\frac{\Delta m_A v_A}{s_A m_A} = \frac{\Delta m_B v_B}{s_B m_B}$$

Ora, isso é o mesmo que dizer que a *força motriz* entre dois corpos A e B colidindo é proporcional à *força estática* entre esses mesmos corpos numa balança. Pois pela segunda lei do movimento a força que o corpo A exerce sobre B numa colisão é proporcional a $\Delta m_B v_B$; e pela terceira lei o corpo A recebe uma força de reação de B igual que é proporcional a $\Delta m_A v_A$. Já na balança estática, o “peso” do corpo B (a força que o corpo B pressiona a balança) é proporcional a $s_A m_A$, e o “peso” do corpo A (a força que o corpo A pressiona a balança) é proporcional a $s_B m_B$, sendo também essas duas forças iguais. Em símbolos:

$$\frac{F_{mot A}}{F_{est A}} = \frac{F_{mot B}}{F_{est B}}$$

Onde F_{mot} é a força motriz e F_{est} é a força estática numa balança. Portanto:

$$F_{est} \propto F_{mot}$$

A força motriz gerada pela colisão entre dois corpos está para a força estática entre eles numa balança em equilíbrio.

Estabelecida a conexão entre a força estática numa balança e a força motriz é possível agora introduzir relação dessas forças com a *gravidade*, ou melhor, com a queda dos corpos. Uma vez que o movimento descendente dos corpos pesados seria, na verdade, o efeito motriz de uma força aplicada sobre eles, essa força é proporcional à mudança de velocidade desses corpos durante a queda, ou seja, é proporcional a Δmv . Entrando em colisão com qualquer outro corpo no percurso, o primeiro corpo produzirá no segundo uma força também proporcional à primeira, cuja proporção também poderá ser medida pelo Δmv do segundo corpo. No entanto, se esse segundo corpo estiver acoplado a uma balança, os corpos poderão ficar em equilíbrio, e as relações entre eles, estabelecidas pelas distâncias do ponto de apoio da balança. Portanto, a força que gera o movimento de queda dos corpos é também proporcional à força estática na balança. Ambas as situações representam efeitos correspondentes da mesma força que gera o movimento de queda dos corpos. A proporção dessa força pode ser obtida relativamente a partir de dois corpos numa balança, a partir de dois corpos colidindo, ou a partir dos corpos em queda livre. Consequentemente, a proporcionalidade entre essa força (o “peso” dos corpos) e a quantidade de matéria pode ser aferida por qualquer dos três modos sugeridos, e por procedimentos experimentais distintos. É precisamente essa unificação da força estática e da força motriz que torna possível a Newton usar o pêndulo para determinar a proporcionalidade entre peso e massa.

Se chamarmos mais convenientemente, a força que gera o movimento de queda dos corpos em direção à Terra de *força da gravidade* (F_G), teremos que essa força é proporcional à força motriz desse corpo na colisão com outro, e também proporcional à força estática desse corpo numa balança.

$$F_{est} \propto F_{mot} \propto F_G \quad [89]$$

Mas, da mesma forma, pela segunda lei do movimento, a *força da gravidade* que atua num corpo em queda livre é também proporcional ao efeito motriz gerado no próprio corpo (Δmv):

$$F_G \propto \Delta mv$$

E, portanto,

$$\Delta v \propto \frac{F_G}{m}$$

A proporção acima informa que se Δv fosse constante para todo qualquer corpo, teríamos que a força que gera a queda dos corpos (a força da gravidade F_G) é proporcional à massa dos próprios corpos. Um resultado que dificilmente seria esperado, se não fosse o caso de realmente se observar. Com efeito, esse foi precisamente a conclusão que Galileu chegou, como se sabe, e que depois foi confirmada com surpreendente precisão pelos experimentos utilizando o pêndulo de Huygens. Disso decorre que a força da gravidade é realmente proporcional à massa dos corpos. E como a *força estática na balança*, pela proporção [89], é proporcional à *força da gravidade*, segue-se que é possível aferir a proporcionalidade entre o peso (força estática na balança) e a quantidade de matéria dos corpos por meio de experimentos utilizando o pêndulo de Huygens. É nisso que se concentra a observação final de Newton no seu comentário à Definição 1: “pois [a quantidade de matéria] é proporcional ao peso, como se motrará a seguir por meio de experimentos com pêndulos realizados de maneira acuradíssima”.

É conveniente ressaltar nesse ponto que o termo “peso”, aqui, para o leitor do séc. XVII, poderia ser entendido tanto uma referência à *gravidade* dos corpos, ou seja, à sua tendência de mover-se em direção ao centro da Terra (no sentido aristotélico), quanto o efeito da *força da gravidade* (i.e., a força que gera a queda dos corpos), quanto ainda a *força estática* que esse corpo pressiona uma balança. Ao que tudo indica Newton estava referindo-se à *força estática* na balança, pois era a única maneira conhecida (antes dos *Principia*) de se *medir* empiricamente o peso (relativo) dos corpos, de modo a tornar possível a proposta de usar o peso como meio de aferição de suas quantidades de matéria dos corpos. Mas não é difícil perceber a confusão conceitual que havia entre os modernos aqui. Uma verdadeira polissemia relacionada ao termo “peso”. Acredito que foi essa uma das razões que levou Newton a trabalhar com o conceito de “massa”, mesmo não sendo esta uma quantidade *primária*, do ponto de vista empírico.

Não é demais lembrar que um dos objetivos centrais dos *Principia* era investigar a *força que gera a queda dos corpos*, isto é, a *força da gravidade*. E pela segunda lei do movimento, a mudança da velocidade de um corpo sob a ação de uma força é inversamente proporcional à sua massa. Caso Newton fosse usar o parâmetro mais comum à época, teria que dizer que a mudança de velocidade de um corpo sob a ação de uma força é inversamente proporcional ao seu “peso”. No entanto, se o movimento que se propõe à investigar é o próprio movimento de queda dos corpos, gerado pela *força da gravidade*, concluiremos que o movimento acelerado de queda de um corpo é inversamente proporcional ao seu peso; e,

portanto, alguém entenderia essa afirmação como algo semelhante a: “o peso do corpo é inversamente proporcional ao seu peso”, um completo absurdo. Por essa razão, creio eu, Newton evitou usar como parâmetro da quantidade diretamente determinável “peso” (força estática numa balança) e, em vez disso, usou a quantidade indireta “massa”, que eliminaria grande parte dessas armadilhas conceituais.

Do que foi exposto ao longo desse apêndice é possível concluir, primeiro, porque a definição de quantidade de matéria dos *Principia* não é circular. A densidade dos corpos era determinada desde Arquimedes com base na força estática que um corpo excita uma balança e o seu volume, e não com base na sua massa. Mas em segundo lugar, é possível concluir que Newton realmente ofereceu contribuições originais e significativas para o conceito de quantidade de matéria. Embora a noção de quantidade de matéria tenha sido cunhada pelos modernos, e sua simples formalização não implicava em nada muito complexo, foi somente após a elaboração das leis do movimento e da consequente relação exata entre o peso (força motriz descendente) e o peso (força estática numa balança) que foi possível determinar com extraordinária precisão a proporcionalidade entre o peso e a quantidade de matéria de um corpo. Essa proporcionalidade já havia sido estabelecida por Arquimedes, mas apenas por meio de experimentos rudimentares utilizando balanças. Com a sua unificação, Newton foi capaz de submeter as conclusões do matemático grego aos muito mais sofisticados e precisos experimentos com pêndulos. Além disso, ele construiu diferentes caminhos experimentais para testar essa proporcionalidade; caminhos que convergiram para os mesmos resultados. Somente após os *Principia*, portanto, se pôde dizer de uma vez e por todas, que a quantidade de matéria dos corpos é realmente proporcional ao seu peso; e tanto ao peso entendido como movimento de queda em direção à terra, quanto ao peso como a força aplicada numa balança, pois, afinal, ambos são proporcionais. Somente após os *Principia* se pôde apresentar sem margem para dúvidas a célebre Definição 1:

$$m = d \cdot V$$

APÊNDICE E – VERSÃO ALTERNATIVA DO ESCÓLIO DAS DEFINIÇÕES¹¹⁰³

O Escólio das Definições é um dos textos mais celebrados dos *Principia*. Porém, um dos textos também mais difíceis e incompreendidos. Uma das dificuldades que pode surgir na compreensão do Escólio das Definições consiste em que, a partir de uma certa altura, Newton parece atribuir aos “movimentos verdadeiros” um sentido distinto daquele inicialmente definido. No início, o “movimento verdadeiro” é definido como sinônimo de “movimento absoluto”. Em vários momentos ele se refere ao “verdadeiro e absoluto movimento”.¹¹⁰⁴ O movimento verdadeiro seria, portanto, a mudança de posição de um corpo de um lugar absoluto para outro.¹¹⁰⁵ No entanto, nitidamente me parece que o método que Newton ofereceu para distinguir o “movimento verdadeiro” do “relativo” serve apenas para distinguir um movimento *acelerado* de outro que não está acelerado ou – como diríamos hoje – um referencial acelerado de outro que não está acelerado.¹¹⁰⁶ E embora possamos conceder que o escólio das definições está distinguindo um *movimento acelerado verdadeiro* de um *movimento acelerado aparente*, o que fica evidente é que o “movimento verdadeiro” aqui não se trata do “movimento absoluto” definido no início do escólio, que é a mudança de um lugar absoluto para outro. Certamente podemos conhecer o verdadeiro movimento acelerado pelas suas “causas” e “efeitos” (ou *pseudo-forças*, como diríamos hoje), mas isso não nos dá condições de conhecer efetivamente o movimento absoluto. Basta lembrar do exemplo dos dois navios (discutido aqui na seção 11.1). É possível determinar qual navio está com movimento acelerado. E até mesmo o valor dessa aceleração. No entanto, se a Terra se move, nem o navio em repouso está em repouso absoluto, nem a determinação da aceleração desse navio nos fornece o seu movimento absoluto, que é composto também com o movimento da Terra.

Em virtude dessa problemática envolvendo os “movimentos verdadeiros” e “movimentos absolutos” no Escólio das Definições, ofereço nessa seção uma versão alternativa do escólio que sintetiza os seus conteúdos, procurando, ao mesmo tempo, ressaltar a coerência da estratégia de Newton em determinar os movimentos verdadeiros, e evitar as dificuldades levantadas nos parágrafos anteriores. Abaixo segue a síntese do mesmo escólio apresentado de uma maneira alternativa.

¹¹⁰³ Para melhor compreensão, antes de ler esse apêndice deve ser lido a seção 11.1.

¹¹⁰⁴ Veja, por exemplo, a discussão do ponto 4 do Escólio das Definições. CW, p.409.

¹¹⁰⁵ CW, p.409.

¹¹⁰⁶ Refiro-me a conhecida distinção atual entre referencial inercial e não inercial.

Região do Espaço. Uma região do espaço é uma parte do espaço definida por um conjunto de corpos de referência que mantêm posições relativas fixas entre si. Uma determinada região do espaço pode conter várias microregiões, e pode ser parte de uma macroregião. Cada microregião pode conter outras microregiões, e cada macroregião pode ser parte de outras macroregiões.

Espaço Absoluto. O espaço absoluto, ou simplesmente espaço, é a mais ampla região que contém todas as outras. De face, as únicas referências que podem servir para delimitar esse espaço são pontos nas suas próprias fronteiras. Esses pontos mantêm posições relativas fixas entre si, e é provável que não sejam sensíveis.

Repouso e Movimento. Repouso é a de permanência de um corpo na mesma posição em relação ao conjunto de corpos (ou pontos) que definem uma região. Movimento é a mudança na posição de um corpo em relação ao conjunto de corpos (ou ponto) que definem uma região. *Repouso absoluto* é a permanência de um corpo na mesma posição em relação ao conjunto de pontos que define a região do espaço absoluto. *Repouso relativo* é a permanência de um corpo na mesma posição em relação ao conjunto de corpos que define uma região particular do espaço. *Movimento absoluto* é a mudança na posição de um corpo em relação ao conjunto de pontos que define a região do espaço absoluto. *Movimento relativo* é a mudança na posição de um corpo em relação ao conjunto de corpos que define uma região particular do espaço.

Movimento de uma região do espaço. Se o conjunto de corpos que definem uma região estiver em movimento em relação ao conjunto de corpos que definem a macroregião que a contém, então essa região estará em movimento em relação a sua macroregião. A única região que está necessariamente em repouso absoluto é o próprio espaço absoluto. Todas as demais regiões podem estar em movimento.

Determinação do movimento absoluto. O movimento absoluto pode ser determinado pelo movimento relativo de um corpo numa microregião particular combinado com o movimento da própria microregião onde se encontra, combinado com o movimento da região que a contém, combinado com o movimento da macroregião que contém a região, e assim sucessivamente até chegar na última macroregião do espaço (como no exemplo do navio).

$$M_{abs} = M + M_{r1} + M_{r2} + M_{r3} + \dots$$

onde M é o movimento relativo do corpo numa determinada microregião, M_{r1} é o movimento relativo própria microregião, M_{r2} é o movimento relativo da região que contém a microregião, M_{r3} é o movimento da macroregião que contém a região anterior, e assim por diante.

Movimentos verdadeiros e aparentes. Do que foi estabelecido até aqui é possível perceber que para determinar um certo movimento numa região particular do espaço é preciso conhecer pelo menos dois pontos de referência (ou *corpos* de referência) que delimitam aquela região. Qualquer corpo em repouso em relação a esses pontos está verdadeiramente em repouso em relação a essa região; qualquer corpo em movimento em relação a esse ponto está verdadeiramente em movimento em relação a essa região. E as velocidades, direções, trajetórias dos movimentos também devem ser aferidas com base nos corpos de referência dessa região. Contudo, em algumas ocasiões é possível que se adote equivocadamente um ponto de referência diverso daqueles que definem a região, e nesse caso estaremos diante de um *movimento aparente*. Naturalmente, isso pode ocorrer quando ainda não se estabeleceram os pontos de referência, aqueles corpos que estão em repouso entre si na região. Mas alguém poderia argumentar que se os corpos de referência não foram estabelecidos, então nem mesmo uma região do espaço foi ainda definida. Isso é verdade. A região do espaço pode eventualmente ainda não ter sido *definida*, mas isso não impede que ela tenha sido *concebida*, ou ao menos precariamente *delimitada*. Aparentemente, qualquer conjunto de corpos que é percebido como um todo coeso, ainda que não se perceba de imediato quais corpos estão em repouso entre si, já é *concebido* como uma região do espaço. Essa região apenas é perfeitamente definida quando se estabelecem os pontos fixos de referência. Antes do estabelecimento desses pontos, os movimentos podem até ser considerados, porém são considerados como movimentos *aparentes*, ou *indeterminados*, em relação a essa região delimitada. A determinação dos pontos de referência permite a definição plena dessa região e, conseqüentemente, o estabelecimento dos movimentos verdadeiros em relação a essa região do espaço.

Regiões atípicas. Uma região atípica do espaço é uma região que não possui qualquer corpo que mantenha uma posição relativa fixa com outro. Essa região é concebida apesar da ausência da referida condição porque um conjunto de corpos, por qualquer causa que seja, mantêm-se relativamente coesos, guardando uma posição média relativa constante entre eles. As regiões atípicas apresentam uma grande dificuldade – ou até impossibilidade – para o estabelecimento dos *movimentos verdadeiros* pela ausência de um ponto de referência fixo para região. Nenhum corpo pode ser usado como ponto de referência para a região. Com efeito, qualquer corpo que se admita como referência irá simplesmente reduzir essa região do

espaço já previamente concebida à uma microregião particular. O sistema solar é um exemplo de uma *região atípica*, uma vez que não há qualquer corpo celeste que guarde uma mesma posição relativa com outro. Ainda assim se concebe esse conjunto de corpos como uma região do espaço, precisamente porque eles se mantêm coesos e com uma posição média relativa constante. Entretanto, precisamente por ser uma região atípica o problema da determinação dos verdadeiros movimentos planetários atravessou séculos de observações astronômicas sem solução e foi mesmo considerado por muitos como insolúvel. Qualquer corpo de referência que se adote não oferecerá mais do que novos *movimentos aparentes*.

Determinação do ponto referência em regiões atípicas. Com os estudos de Christiaan Huygens no séc. XVII o problema da determinação dos movimentos verdadeiros nas regiões atípicas começou a ser resolvido. É possível estabelecer um ponto de referência fixo para as regiões atípicas delimitadas por um conjunto de *corpos pesados* pelo princípio do *centro de gravidade*. O centro de gravidade de um conjunto de corpos pesados em repouso entre si também estará em repouso em relação a esses corpos. Portanto, o centro de gravidade de um conjunto de corpos pesados pode ser admitido como um adequado ponto de referência fixo para uma dada região. Esse resultado é válido mesmo se os corpos pesados estiverem em movimento entre si, e mesmo agindo uns sobre os outros. Huygens mostrou qualquer conjunto corpos pesados, independente de seus movimentos, agindo entre si ou não, manterão sempre distâncias proporcionais do centro de gravidade, de modo que esse centro sempre estará em repouso ou movimento uniforme. Assim, se por acaso houver um conjunto de corpos pesados em movimentos aleatórios confinados numa determinada região, o centro de gravidade desses corpos estará em repouso em relação a essa região e poderá constituir um adequado ponto de referência para defini-la, mesmo que não haja qualquer corpo em repouso em relação a essa região.

O caso do Sistema Solar. O princípio de Huygens encontra uma dificuldade para ser aplicado genericamente, como no caso do Sistema Solar. O centro de gravidade é um conceito relativo a *corpos pesados*, e o peso – até a época de Huygens – era considerado um predicado dos *corpos terrestres*. Planetas não eram corpos que se poderiam medir seus pesos numa balança. E nem sequer fazia sentido falar em peso acerca dos planetas. Portanto, à primeira vista o princípio do centro de gravidade em nada tinha utilidade para a determinação de um ponto de referencia fixo para o Sistema Solar. Mas ao menos sinalizava para a possibilidade da determinação teórica desse ponto de referência. Kepler já havia sugerido essa possibilidade. Encontrando-se a causa dos movimentos planetários poderia ser possível determinar os verdadeiros movimentos dos planetas, embora ele provavelmente estivesse

somente pensando na definição entre a Terra ou o Sol como centros em repouso no universo. De todo modo, Newton investigou a causa dos movimentos planetários e percebeu inicialmente que esses movimentos tinham uma peculiaridade: eram movimentos *acelerados*.

Movimento acelerado absoluto e relativo (ou mudança de movimento absoluta e relativa). Mudança de movimento absoluta é a mudança seja na quantidade ou na direção do movimento de um corpo em relação ao espaço absoluto. Mudança de movimento relativa é a mudança seja na quantidade ou na direção do movimento de um corpo em relação a uma região do espaço. Toda mudança de movimento absoluta de um corpo pode ser detectada pelo aparecimento de forças sem causas aparentes. A mudança de movimento absoluta também pode ser perfeitamente determinada em sua quantidade e direção pela investigação dessas forças. Em suma, todo o movimento acelerado pode ser conhecido de modo *absoluto*. A partir desse princípio, Newton determinou os corpos celestes que estavam *verdadeiramente* em movimento circular e determinou as forças necessárias para mantê-los nesses movimentos. Então pôde chegar nas causas dos movimentos planetários.

Determinação do ponto de referência fixo do Sistema Solar. Newton concluiu que a causa dos movimentos planetários é a mesma causa que gera o peso dos corpos na Terra e, portanto, o peso não é um predicado apenas dos corpos terrestres mas de todos os corpos do universo. Os planetas também são pesados entre si, e esse peso pode ser perfeitamente determinado pelos movimentos acelerados que apresentam, que podem ser conhecidos de forma absoluta. O princípio do centro de gravidade de Huygens, portanto, pôde ser ampliado e aplicado para o Sistema Solar. Qualquer conjunto de corpos acelerados um em direção aos outros definem um centro de gravidade cuja posição é fixa em relação à região do espaço delimitada por eles. Disso se segue que conhecendo a aceleração dos corpos que os mantém numa posição relativa aproximadamente constante entre si, é possível determinar um ponto fixo de referência desse espaço pelo método do centro de gravidade. É possível, portanto, determinar um ponto de referência fixo de qualquer região do espaço, típica ou atípica, e consequentemente é possível determinar um ponto fixo de referência para o Sistema Solar.

Determinação do espaço absoluto. Do parágrafo anterior se segue que é possível determinar o espaço absoluto. Pela ampliação que Newton introduziu no princípio do centro de gravidade de Huygens, percebe-se que seria possível até mesmo determinar um ponto de referência fixo em relação a todos os corpos do universo. Bastaria que se determinasse o centro de gravidade desse conjunto de corpos. Esse centro de gravidade estaria necessariamente em repouso, pois se assim não estivesse o próprio espaço absoluto estaria em movimento. E estando esse ponto em repouso absoluto se teria também determinado um

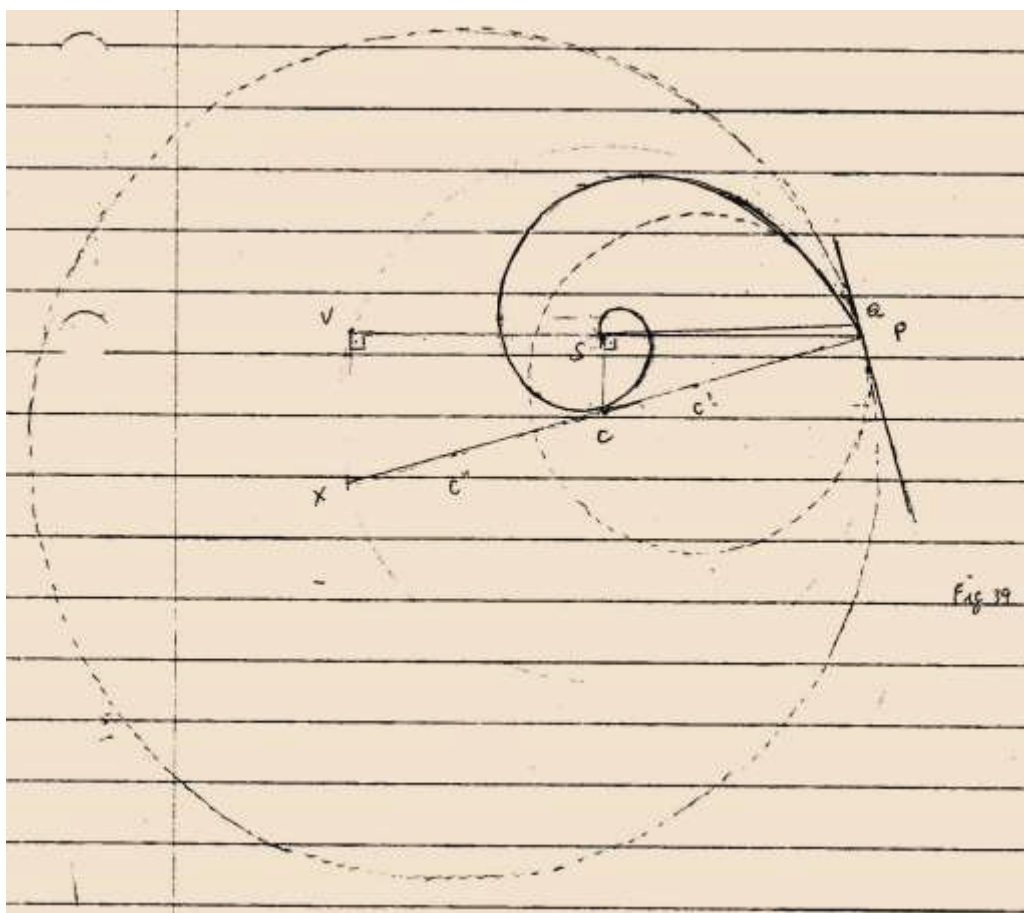
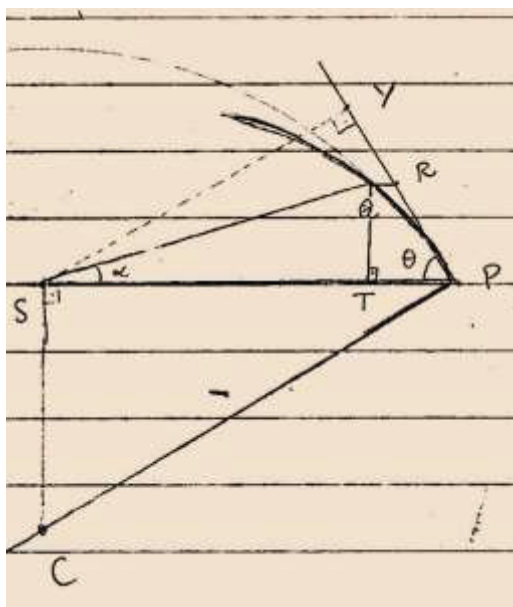
ponto do espaço absoluto. O método da determinação do centro de gravidade, portanto, permite determinar não apenas os movimentos verdadeiros em relação a qualquer região do espaço, típica ou atípica, mas também os movimentos absolutos em relação ao espaço absoluto. É claro que conhecer todos os corpos do universo é algo extremamente improvável. Mas o caso aqui é mostrar que esse método oferece a possibilidade de determinação do espaço absoluto que não depende de uma percepção sensível do mesmo. Se o universo se resume ao Sistema Solar, encontrar o centro de gravidade desse sistema de corpos é encontrar um ponto imóvel do espaço absoluto. Se o universo não se resume no Sistema Solar, trata-se de um ponto imóvel de uma determinada região do espaço absoluto. Mas mesmo que os movimentos estabelecidos a partir desse ponto de referência sejam *relativos*, devem ser considerados *verdadeiros*, pois, como foi mostrado mais acima, fazem parte dos *movimentos absolutos*. A cada nova ampliação do campo da experiência, localizando essa região do espaço numa região mais ampla, pode-se sempre acrescentar um novo movimento relativo ao anterior e assim sucessivamente avançar em direção aos movimentos absolutos. Portanto, o problema dos movimentos verdadeiros do Sistema Solar se resumem na determinação do ponto fixo de referência desse sistema. Segundo o Escólio das Definições, o objetivo dos *Principia* era precisamente mostrar como era possível encontrar o ponto imóvel do espaço a partir da determinação das causas dos movimentos planetários. Por isso esse escólio encerra com os dizeres:

No que se segue, uma explicação completa será fornecida de como determinar os verdadeiros movimentos a partir das suas causas, efeitos e aparências diferentes, e, conversamente, como determinar pelos movimentos, quer verdadeiros ou aparentes, as suas causas e efeitos. Porque esse foi o propósito para o qual eu compus o presente tratado.

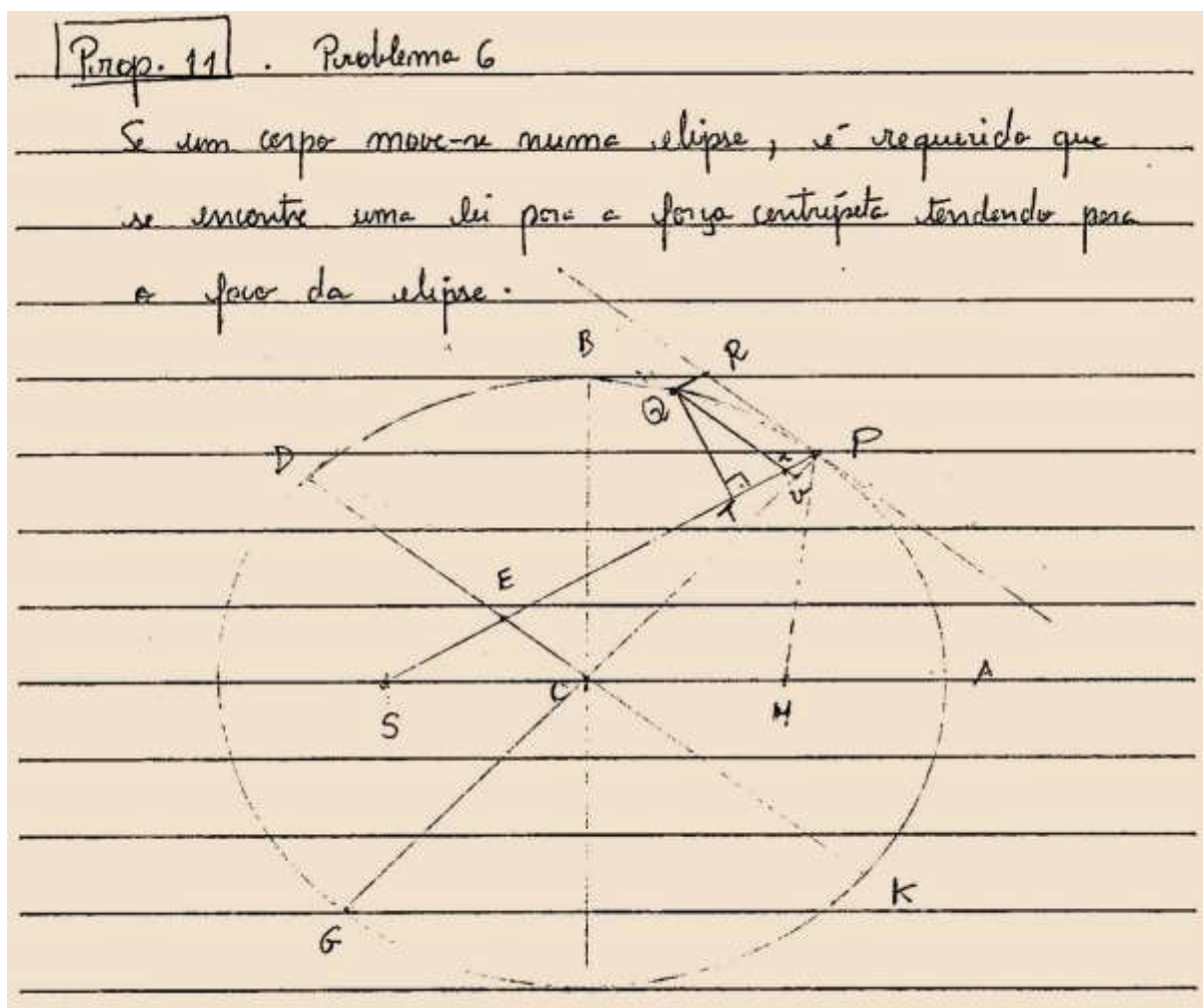
Como procurei mostrar nessa composição alternativa do Escólio das Definições, para compreender melhor a estratégia de Newton nos *Principia* os “movimentos verdadeiros” não podem ser misturados com os “movimentos absolutos”, nem os “movimentos aparentes”, com os “movimentos relativos”. Os desenvolvimentos de Newton no escólio muitas vezes parecem misturar esses conceitos, o que dificulta a compreensão do leitor. O objetivo dos *Principia* é determinar os “verdadeiros movimentos” planetários, que, no entanto, em última instância, ainda assim são “movimentos relativos”. Essa compreensão é importante porque só é possível avançar gradativamente em direção aos movimentos absolutos se os movimentos relativos considerados forem “verdadeiros”, ou seja, não forem “aparentes” em relação a uma região do espaço. Acredito que essas considerações e a versão alternativa aqui proposta para esse

escólio se constituem numa chave interpretativa útil na tentativa de compreensão desse texto newtoniano. Consequentemente, também é uma chave útil para compreender o próprio projeto dos *Principia*.

ANEXO A – Prob. 9 dos *Principia*: Força centrípeta numa espiral equiangular



ANEXO C – Prob.6 dos *Principia*: Força centrípeta em relação a um dos focos da elipse.



OBRAS CONSULTADAS, POR CATEGORIA

Versões dos *Principia* Consultadas

NEWTON, I. **Philosophia Naturalis *Principia* Mathematica**. [First Edition]. Autore Is. Newton, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali. Imprimatur. S. Pepys, Reg. Soc. Praesses. Londini, 1686.

NEWTON, I. **The Mathematical Principles of Natural Philosophy**. Third Edition. Translated into English By Andrew Motte: To Which are Added the System of the World. First American edition carefully revised and corrected. Published by Daniel Adee. New York, 1846.

NEWTON, I. **Sir Isaac Newton's *Principia***. Latim third edition of Philosophia Naturalis *Principia* Mathematica reprinted for Sir William Thompson and Hugh Blackburn. Published by James Maclehouse, University of Glasgow, 1871.

NEWTON I. **Philosophia Naturalis *Principia* Mathematica**. Latim third edition (1726). With variant readings. Assembled and Edited by Alexandre Koyré and I. Bernard Cohen, with assistance of Anne Whitman. Harvard University Press, 1972.

NEWTON, I. **Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World** (2 vols). Third Edition. Translated into English by Andrew Motte in 1729. The translations revised, and supplied with an historical and explanatory appendix by Florian Cajori in 1934. Eighth Printing. University of California Press, 1934.

NEWTON, I. **The *Principia*: Mathematical Principles of Natural Philosophy**. A new translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman, assisted by Julia Budenz, preceded by a guide to Newton's *Principia* by I. Bernard Cohen. Berkeley, CA: University of California Press, 1999.

NEWTON, I. **Principios Matemáticos de la Filosofía Natural**. (2 vols). Introducción, traducción y notas de Eloy Rada García. Madrid : Alianza, 1987.

NEWTON, I. **Principes Mathématique de la Philosophie Naturelle**. Par feu Madame la Marquise du Chastellet. Éditions Jacques Gabay, 1990.

NEWTON, I. ***Principia* : princípios matemáticos de filosofia natural**. Tradução de Trieste Ricci et alii. São Paulo : Nova Stella/EDUSP, 1990.

Obras e escritos de Newton consultados¹¹⁰⁷

NEWTON, I. (1661-1664) **Quaestiones quaedam Philosophie**. In: NEWTON. Certain Philosophical Questions: Newton's Trinity Notebook. Edited by James E. McGuire and Martin Tamny. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

NEWTON, I (1669). **De Analysisi per Aequationes Numero Terminorum Infinitas**. In: NEWTON. The Mathematical Papers of Isaac Newton. Edited by Derek T. Whiteside. Vol. 2: 1667-1670. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

NEWTON, I. (1670-1671). **De methodis fluxionum et serierum**. In: WHITESIDE, D. T. The Mathematical Papers of Isaac Newton. Edited by Derek T. Whiteside. Vol. 3: 1670-1673. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. p.38-328.

NEWTON, I (1670-1672). **Lectiones Opticae**. In: SHAPIRO, A. The *Optical* Papers of Isaac Newton. (3 vol). Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

NEWTON, I. (1670s). **De Gravitatione et Aequipondio Fluidorum**. In: NEWTON. Philosophical Writings. Edited by Andrew Janiak. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. p.12-39

NEWTON, I (1684-1685). **De Motu**. In: HERIVEL, J. The Background to Newton's *Principia*: a Study of Newton Dynamical Researches in the years 1664-84. Oxford, 1965. p.257-303. In: WHITESIDE, D. T. De Motu Corporum (On Motion). The Mathematical Papers of Isaac Newton. Edited by Derek T. Whiteside (8 vols). Vol. 7: 1684-1691. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. p.30-228.

NEWTON, I (1686). **Philosophia Naturalis Principia Mathematica**. Autore Is. Newton, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali. Imprimatur. S. Pepys, Reg. Soc. Praesses. Londini. Várias edições, traduções e versões.

NEWTON, I. (1690s). **De Quadratura Curvarum**. In: WHITESIDE, D. T. The Mathematical Papers of Isaac Newton. Edited by Derek T. Whiteside. Vol. 8: 1697-1722. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. p.92-167.

NEWTON, I. (1690s). **Geometriae Libri Duo**. In: WHITESIDE, D. T. The Mathematical Papers of Isaac Newton. Edited by Derek T. Whiteside (8 vols). Vol. 7: 1691-1695. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. p. 402-561.

¹¹⁰⁷ Entre parênteses, a provável data de composição.

NEWTON, I (1704). **Opticks**: Or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. Third Edition. London: Printed for William and John Innys at the West End of St. Paul's, 1721.

NEWTON, I. **Prefácio intencionado para a Óptica**. In: MCGUIRE, J. E. Principles of Philosophy: An intended preface for the 1704 'Opticks' and a related fragment. The British Journal for the History of Science. Vol. 5, No. 2, Dec. 1970. p. 178-186.

NEWTON, I (1710). **Prefácio intencionado para a segunda edição dos Principia**: esboço de um novo prefácio do autor para a segunda edição dos *Principia*, não publicado. In: WHITESIDE, D. T. The Mathematical Papers of Isaac Newton. Vol. 8. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. p. 442–459 (latim). In: COHEN, I. B. A Guide to Newton's *Principia*. Berkeley: University of California Press, 1999. p.49-53(inglês).

NEWTON, I (1714). **An account of the book entituled Commercium Epistolicum Collinii et Aliorum Promora**. Philosophical Transaction of the *Royal Society* of London, No. 342, January and February, 1714, p. 173–224. In: HALL, A. R. Philosophers at War: The Quarrel Between Newton and Leibniz. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. p.261-314.

NEWTON, I. **Correspondência**. In: The Correspondence of Isaac Newton. (7 vols). Edited by H. W. Turnbull, J. F. Scott, A. R. Hall and L. Tilling. Cambridge: Cambridge University Press, 1959-1977.

Comentadores dos *Principia* dos séc. XVIII e XIX consultados

CLARKE, J. **A demonstration of some of the principal sections of Sir Isaac Newton Principles of Natural Philosophy**, in which his peculiar method of treating that useful subject is explained and applied to some of the chief Phaenomena of the System of the World. London, 1730.

EMERSON, W. **A short comment on Sir Isaac Newton's Principia**. Contaning notes upon some difficult places of that excelent book. London, 1770.

CARR, J. **The First Three Sections of Newton's Principia**. With Copious notes and Illustrations, and great number of deductions and problems. Second Edition. Cambridge, 1826.

WHEWELL, W. **An introduction to Dynamics containing the Laws of Motion and the first three sections of the Principia**. Cambridge, 1832.

DENILSON, J. **Commentaries on the Principia of Sir Isaac Newton**, respecting his theory that the forces of the gravitation of the Planets are inversely as the square of the mean distances from the sun: which theory is called in question in this comentaries. By the author of a 'New theory of Gravitation'. London, 1846.

COOKE, G. L. **The first three sections and part of seventh section of Newton's *Principia***. With a Preface recommending a geometrical course of mathematical Reading, and an introduction on the atomic constitution of matter, and the laws of motion. Oxford. John Henry Parker, 1850.

GOODWIN, H. **Problems and Examples, adapted to the 'Elementary course of mathematics'**. Third Edition, revised. With additional examples in conic sections and Newton. Cambridge, 1862.

FROST, P. **Newton's *Principia*: Sections I, II and III**. With notes and Illustrations. Also a collection of problems principally intended as examples of Newton's methods. Cambridge and London, 1863.

EVANS, J. H. **The First Three Sections of Newton's *Principia***: With na Appendix and the Ninth and Eleventh Sections. Deighton, Bell. Cambridge, 1871.

Obras e autores antigos consultados

ARISTÓTELES. **Analytica Posteriora**. In: ARISTÓTELES. The Basic Works of Aristotle. Edited by Richard McKeon. The modern library. New York, 1941.

ARISTÓTELES. **Problemata Mechanica**. In: ARISTÓTELES. Minor Works. With an English translation by W.S. Hett, MA. Cambridge, Massachusetts. Harvard University Press. William Heinemann, London, 1955. p.329-411.

ARISTÓTELES. **Metaphysica M, N**. In: ARISTÓTELES. Metaphysics: Books M and N. Trad. Julias Annas. Claredon Press. Oxford, 1976.

ARISTÓTELES. **Physica I, II, III, IV**. In: ARISTÓTELES. Physics: Book I and II. Trad. William Charlton. Claredon Press. Oxford, 1970; Física I-II. Trad. Lucas Angioni. Editora Unicamp, 2009; e Physics: Books III and IV. Translated with Introduction and Notes by Edward Hussey. Claredon Press. Oxford, 1993.

ARISTÓTELES. **De caelo**. In: ARISTÓTELES. O céu. Tradução do grego e notas de Edson Bini. São Paulo: Edipro, 2014.

ARQUIMEDES. **On floating bodies**. In: HEATH, T. L. The Works of Archimedes. Edited in Modern Notation with Introductory Chapters by Thomas L. Heath. Cambridge University Press, 1897a. p.253-300.

ARQUIMEDES. **On the equilibrium of planes or the centres of gravity of planes**. In: HEATH, T. L. The Works of Archimedes. Edited in Modern Notation with Introductory Chapters by Thomas L. Heath. Cambridge University Press, 1897b. p.189-220.

ARQUIMEDES. **The sand-reckoner.** In: HEATH, T. L. The Works of Archimedes. Edited in Modern Notation with Introductory Chapters by Thomas L. Heath. Cambridge University Press, 1897c. p.221-232.

EUCLIDES. **Os elementos.** In: HEATH, T. L. The Thirteen Books of the Elements (3 vols). Translated from the text of Heiberg with introduction and commentary by Sir Thomas L. Heath. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1968; In: EUCLIDES. Os Elementos. Tradução e Introdução de Irineu Bicudo. Editora Unesp. São Paulo, 2009.

PAPPUS. **Collectio IV, VIII.** In: THOMAS, I. B (Ed.) Selections illustrating the history of Greek mathematics. Vol. 2: From Aristarchus to Pappus. With and English translation from greek by Ivor Thomas. London, Cambridge, Mass. W. Heinemann, Ltd. Harvard University Press, 1941. In: Pappus of Alexandria: Book 4 of the *Collection*. Edited With Translation and Commentary by Heike Sefrin-Weis. Springer, 2010. In: Mathematical Collection, Book VIII. Translated from the Arabic text by D. Jackson, Digital Research Library for The Archimedes Project, 1970.

Obras e autores medievais consultados

AQUINAS, T. **Basic Writings of St. Thomas Aquinas.** A.C. Pegis (trans.), New York: Random House, 1945.

BACON, R. **The Opus Majus.** Trad. R.B. Burke. New York: Russel & Russel. 1962.

BURIDAN, J. Questions on the Eight Books of the Physics of Aristotle. In: CLAGETT, M. **The Science of Mechanics in the Middle Ages.** Madison, Wis.: University of Wiaconsin Press, 1959.

OKHAM, G. Reportatio, II. In: Tomás de Aquino, Dante Alighieri, John Duns Scot e William of Okham. Coleção os Pensadores, Abril Cultural, São Paulo, 1973.

SCOTUS, D. **Philosophical Writings.** Translation and editing by Allan Wolter. Edinburgh: Thomas Nelson. 1962.

Obras e autores modernos consultados¹¹⁰⁸

ARNAULD, A; P. NICOLE (1696). **Logic: Or, the art of thinking.** Containing, besides comum rules, several new observations appropriate for forming judgement. Translated and edited by Jill Vance Buroker. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

¹¹⁰⁸ Entre parênteses, a data da primeira publicação.

BACON, F. (1620). **Novum Organum**. In: BACON, F. The new organon and related writings. Edited with an introduction by Fulton H. Anderson. Indianapolis, New York: The Bobbs-Merrill Company, 1960. In: BACON, F. The Philosophical Works of Francis Bacon. Reprinted from the texts and translations, with the notes and prefaces of Ellis and Spedding. Edited with an introduction by John M. Robertson. Routledge Revival, New York, 2011. In: BACON, F. Novum Organum. Tradução e notas: José Aluysio Reis de Andrade. Acrópolis, 2002. (Disponível online em www.odialetico.hpg.com.br, em 20-11-2016)

BARROW, I. (1670). **Lectiones Geometricae**. In: BARROW, I. The Geometrical Lectures of Isaac Barrow: Translated, with Notes and Proofs, and a Discussion on the Advance Made Therein of the Work of his Predecessors in the Infinitesimal Calculus by James M. Child. London: Open Court, 1916. In: BARROW, I. The Mathematical Works of Isaac Barrow. Edited by William Whewell. Cambridge: Cambridge University Press, 1860.

BARROW, I. (1683). **Lectiones Mathematicae**. In: BARROW, I. The Usefulness of Mathematical Learning Explained and Demonstrated: Being Mathematical Lectures Read in the Publick Schools at the University of Cambridge. Translated by John Kirkby. London: for Stephen Austen, 1734. In: BARROW. The Mathematical Works of Isaac Barrow. Edited by William Whewell. Cambridge: Cambridge University Press, 1860.

BLACKMORE, R. (1697). **King Arthur**. An heroick poem in twelve books. London, 1697.

BOYLE, R. (?) **Of usefulness of speculative and experimental philosophy to one another**. In: BOYLE. The Works of Robert Boyle. Ed. M. Hunter & E.B. Davis. (14 vols). Vol.14. London, Pickering & Chato, 1999-2000.

COPERNICUS, N. (1543). **De Revolutionibus Orbium Coelestium**. In: COPERNICUS. De Revolutionibus Orbium Coelestium. Nuremberg: Apud J. Petreium, 1543. In: _____. On the revolutions. Translation and Commentary by Edward Rosen. Johns Hopkins University Press. Baltimore and London, 1992.

DESCARTES, R. (1619-1650). **Correspondência**. In: DESCARTES, R. Oeuvres de Descartes. Correspondance. Adams and P. Tannery (eds.), Paris: J. Vrin. 1976. In: DESCARTES, R. The Philosophical Writings of Descartes. Vol. III: The Correspondence. Translated by J. Cottingham, R. Stoothoff, D. Murdoch, and A. Kenny. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

DESCARTES, R. (1664). **Le Monde**. In: DESCARTES, R. O Mundo ou Tratado da Luz. Organização e tradução Érico Andrade. Editora Hedra. São Paulo, 2008. In: _____. The World and Other Writings. Translated and Edited by Stephen Gaukroger. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

DESCARTES, R. (1644). ***Principia Philosophiae***. In: DESCARTES, R. Princípios da Filosofia. Tradução João Gama. Edições 70, 1997. In: _____. Principles of Philosophy: Part II, Paragraphs 24-54; Part III, Paragraphs 56-59; and Letter to Clerselier. On Motion. Transl. M. S. Mahoney, 1977, 1995.

DESCARTES, R (1701). ***Regulae ad Directionem Ingenii***. In: DESCARTES, R. Regras para a direção do espírito. Trad. João Gama. Edições 70. Lisboa, 1985.

DUNTON, J. (1692). **The Young-students-library**: containing extracts and abridgments of the most valuable books printed in England, and in the forreign journals, from the year sixty five, to this time: to which is added a new essay upon all sorts of learning wherein the use of the sciences is distinctly treated on. London, 1692.

GALILEI, G. (1610). ***Sidereus Nuncius***. In: GALILEI, G.. Sidereus Nuncius or The Sideral Messenger. Translated with introduction, conclusion and notes by Albert Van Helder. University of Chicago Press. Chicago and London, 1989.

GALILEI, G (1623). ***Il Saggiatori***. Firenze. G. Barbèra Editore, 1864

GALILEI, G. (1632). ***Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo***. In: GALILEI, G. Diálogo sobre os dois máximos sistemas de mundo ptolomaico e copernicano. Tradução, introdução e notas de Pablo Rubén Mariconda. Editora 34. São Paulo, 2011. In: GALILEI, G. Dialogue Concerning The Two Chief World Sistems – Ptolomaic and Copernican. Translated by Stillman Drake and forward by Albert Einstein. Second Edition. University of California Press, 1967.

GALILEI, G. (1638). ***Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorno a due nouve scienze attenenti alla mecanica & i movimenti locali***. In: GALILEI, G. Dialogue Concerning Two New Sciences. Trad. Henry Crow e Alfonso de Salvio. Dover Publications, Inc., New York, 1914. In: _____. Two New Sciences. Including Centers of Gravity and force of Percussion. Second Edition. Translated, with a new Introduction and Notes, by Stillman Drake. And History of Free Fall: Aristotle to Galileo, by Stillman Drake. Wall & Emerson, Inc. Toronto, 2008.

GLANVILL, J. (1668). ***Plus Ultra***: Or, the progress and advancement of knowledge since the days of Aristotle. Printed for James Collins at the Kings-Head in Westminter-Hall. London, 1668.

HOBBS, T. (1655). ***De corpore***. In: HOBBS, T. Elements of philosophy. London: Printed by R. & W. Leybourn, for Andres Crocke, 1656. In: HOBBS, T. The English Works of Thomas Hobbes of Malmesbury. Edited by William Molesworth (11 vols). London: Bohn, 1839–1845. London: Routledge/Thoemmes Press, 1994.

HOOKE, R. (1664). **Micrographia** and some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquiries thereupon. London, printed by So. Martyn and Sa. Allestry, printers to the *Royal Society*, 1664.

HOOKE, R. (?) **Of comets and gravity**. In: HOOKE, R. Posthumous Works of Robert Hooke. Containing His Cutlerian Lectures, and Other Discourses, Read at the Meetings of the Illustrious *Royal Society*. Illustrated with Sculptures. To These Discourses is Prefixt the Author's Life. Published by Richard Waller. London, 1705.

HUYGENS, C. (1673). **Horologium Oscillatorium**. In: HUYGENS, C. Horologium Oscillatorium: sive, De motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae. Parisiis, 1673. In: _____. The Pendulum Clock: or Geometrical Demonstration concerning the Motion of a Pendula as Applied to Clocks. Ames. Transl. Richard Blackwell. The Iowa State University Press, 1986.

HUYGENS, C. (1703). **De motu corpore ex percussione**. In: HUYGENS, C. The Motion on Coliding Bodies. Trad. Richard Blackwell. *Isis*, vol. 68, 244, 1977. p.574-597.

KEPLER, J. (1609). **Astronomia Nova**. In: KEPLER, J. Astronomia Nova. Translated by William H. Donahue. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

LEIBNIZ, G. W. (1712). Philosophical Letters Written by M. Leibniz and M. Hartsoeker. In: DE LA ROCHE, M. **Memoirs of Literature**. Containing a large account of many valuable books, letters and dissertations upon several subjects, miscellaneous observations. Vol. 4. Second Edition. London, 1722. p.452-471.

POWER, H. (1664). **Experimental Philosophy**. In three books, containing new experiments microscopical, mercurial, magnetical : with some deductions, and probable hypotheses, raised from them, in avouchment and illustration of the now famous atomical hypothesis. London: Printed by T. Roycroft, for John Martin and James Allestry , 1664.

SANDERSON, R. (1615). **Logicae artis compendium**. In: SANDERSON, R. Logicae artis compendium. Editio Nova Emendata. Oxonii. J. Abrams. Londini, G. Bell, 1816.

SERGEANT, J. (1696). **The Method to Science**. London, 1696

Alguns comentadores contemporâneos dos *Principia* consultados

BECHLER, Z. Introduction: Some Issues of Newtonian Historiography. In: BECHLER, Z. (eds) **Contemporary Newtonian Research**. Studies in the History of Modern Science, vol 9. Springer, Dordrecht, 1982. P.1-20.

BIENER, Z.; SCHLIESSER, E. (Eds). **Newton and Empiricism**. Oxford: Oxford University Press, 2014.

BRACKENRIDGE, B. **The Key to Newton's Dynamics: the Kepler problem and the *Principia***. Berkeley: The University of California Press, 1995.

CHANDRASEKHAR, S. **Newton's *Principia* for the Common Reader**. Oxford: Clarendon Press, 1995.

COHEN, I. B. **A Guide to Newton's *Principia***. In: NEWTON, I. *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*, translated by I. Bernard Cohen and Anne Whitman, assisted by Julia Budenz, pp. 1–370. Berkeley: University of California Press, 1999.

DE GANDT, F. **Force and Geometry in Newton's *Principia***. Princeton: Princeton University Press, 1995.

DENSMORE, D. **Newton's *Principia*, the Central Argument**: Translation, Notes, and Expanded Proofs. Translation and illustrations by William H. Donahue. Santa Fe, N.M.: Green Lion Press, 1995.

DUCHEYNE, S. **The Main Business of Natural Philosophy: Isaac Newton's Natural-Philosophical Methodology**. Springer, 2012.

GUICCIARDINI, N. **Newton on Mathematical Certainty and Method**. Cambridge, MA: The MIT Press, 2009.

HARPER, W. **Isaac Newton's Scientific Method: Turning Data into Evidence about Gravity and Cosmology**. Oxford University Press, 2011.

WESTFALL, R. S. **Force in Newton's Physics: the science of dynamics in seventeenth century**. Neale Watson Academic Publications. New York, 1971.

WHITESIDE, D. T. **The Mathematical Papers of Isaac Newton**. (7 vols). Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

Obras e autores de filosofia da ciência consultados

AYER, A. J (ed). **Logical Positivism**. The Free Press. New York. 1959.

BUNGE, M. **Racionalidad y realismo**. Madrid: Alianza, 1985.

CARNAP, R. The elimination of metaphysics through logical analysis of language (1931). Trad. Arthur Pap. In: AYER, A. J (ed). **Logical Positivism**. The Free Press. New York. 1959.

CARNAP, R. **Logical Foundations of Probability**. University of Chicago Press, Chicago, 1950.

DUHEM, P. **The Aim and Structure of Physical Theory** (1906). Trad. da 2ª ed. por Philip. P. Wiener. New Jersey: Princeton University Press, 1991

EARMAN J.; SALMON, C. W. The Confirmation of Scientific Hypotheses. In: SALMON, M. H (Ed). **Introduction to the Philosophy of Science**. Hackett Publishing Company. Indianapolis/Cambridge. 1992. Chap.2. p.42-103.

FEYERABEND P. (1975) **Against Method**. Third Edition. Verso. London, 1993.

FEYERABEND, P. Consolations for the Specialist. In: LAKATOS, I.; MUSGRAVE, A. **Criticism and Growth of Knowledge**. Proceedings of the international colloquium in the philosophy of science, London, vol. 4, 1965. Cambridge University Press, 1970.

GHINS, M. **Uma introdução à metafísica da natureza**: Representação, realismo e leis científicas. Tradução de Ronei C. Mocellin e Eduardo S. O. Barra. Editora UFPR, 2013.

GLYmour, C. Hypothetico-Deductivism Is Hopeless. **Philosophy of Science**. Vol. 47, no. 2, 1980a, p. 322–325. JSTOR, www.jstor.org/stable/187090. Accessed 29 Dec. 2020.

GLYmour, C. **Theory and Evidence**. Princeton: Princeton University Press, 1980b.

HANS, H.; NEURATH O.; CARNAP, R. A concepção científica do mundo: o Círculo de Viena. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**. v.10 (1986), Série 1. UNICAMP. p.5-20.

HEMPEL, C. G. Studies in the logic of confirmation. **Mind**, 54, 1–26, 1945. p. 97–121.

KITCHER, P.; SALMON, C. W. (eds). **Scientific Explanation**. Series: Minnesota Studies in the Philosophy of Science 13. University of Minnesota Press, 1989.

KUHN, T. S. **A Estrutura das Revoluções Científicas** (1962). Trad. Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. 5ª Edição. Editora Perspectiva, 1998.

KUHN, T. **A tensão essencial** (1977). Trad. Marcelo Amaral Penna-Forte. São Paula: Editora Unesp, 2011.

LAKATOS, I. Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes. In: LAKATOS, I.; MUSGRAVE, A. **Criticism and Growth of Knowledge**. Proceedings of the international colloquium in the philosophy of science, London, vol. 4, 1965. Cambridge University Press, 1970. p.91-196.

LAKATOS, I. The Methodology of Scientific Research Programmes. Philosophical Papers, v.1. Edited by John Worrall and Gregory Currie. Cambridge University Press. 1978.

LAUDAN, L. A Confutation of Convergent Realism. **Philosophy of Science**. v.48, n.1, mar, 1981a. p. 19-49.

LAUDAN, L. **Beyond Positivism and Relativism**. Boulder, CO, Westview Press, 1996.

LAUDAN, L. **Science and Hypothesis**. Historical Essays on scientific methodology. Springer-Science + Business Media, BV. 1981b.

LAUDAN, L. **Progress and its Problems: Towards a Theory of Scientific Growth** (1977). Routledge & Kegan Paul. London, 1977.

LAUDAN, L. Teorias do Método Científico de Platão a Mach (1968). Trad. Balthazar Barbosa Filho. **Cad. Hist. Fil. Ciência, Campinas**. Série 3, v.10, n.2, jul-dez, 2000. p.9-140.

LOSEE, J. **A Historical Introduction to the Philosophy of Science** (1972). Fourth Edition. Oxford University Press, 2001.

LEPLIN, J. (Ed.). **Scientific Realism**. Berkeley: University of California Press. 1984

MAXWELL, N. Induction and Scientific Realism: Einstein versus Van Fraassen. Part One: How to Solve the Problem of Induction. **Brit. J. Phil. Sci.** 44 (1993).

NAGEL, E. **The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation**. Publisher: Harcourt, Brace & World, INC., 1961.

POPPER, K. **Conjectures and Refutations: The growth of scientific knowledge** (1963). 2nd Ed. New York: Routledge & Kegan Paul. 2002.

POPPER, K. R. **Lógica da Pesquisa Científica** (1934). Trad. Leonidas Hegenberg e Octanny Silveira da Mota. Editora Cultrix. São Paulo, 1974.

POPPER, K. R. **Realism and the Aim of Science**. London: Hutheson, 1983.

PUTNAM, H. What is realism? In: LEPLIN, J. (Ed.). **Scientific Realism**. Berkeley: University of California Press. 1984.

REINCHENBACH, H. **Experience and prediction**: an analisys of the foundations and the structure of knowledge. University of Chicago Press, 1938.

ROSENBERG, A. **Philosophy of Science: a contemporary introduction**. Second Edition. Routledge, Taylor and Francis Group. New York and London. 2005.

SALMON, M. H (Ed). **Introduction to the Philosophy of Science**. Hackett Publishing Company. Indianapolis/Cambridge. 1992.

SPRENGER, J. Hypothetico-Deductive Confirmation. **Philosophy Compass**. 6. 2011. p. 497-508. Acesso online em <http://www.laeuferpaar.de/Papers/CompassH-D.pdf>. Último acesso em 29/12/2020.

VAN FRAASSEN, B. **Laws and Simetry**. Claredon Press. Oxford. 1989.

VAN FRAASSEN, B. C. **Scientific Representation**: Paradoxes of Perspective. Claredon Press. Oxford, 2008.

VAN FRAASSEN, B. C. **The Scientific Image**. Oxford: Oxford University Press. 1980.