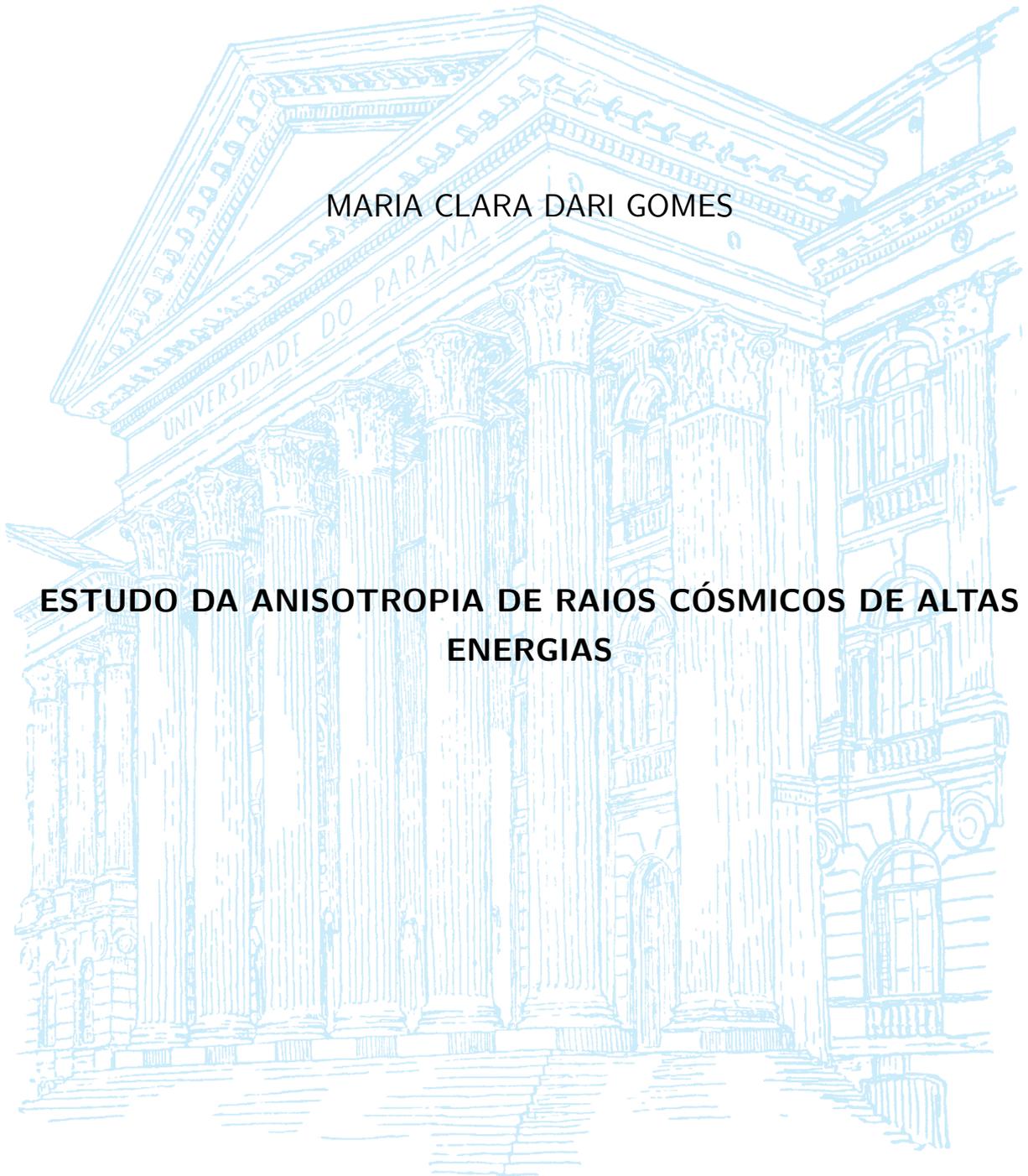


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIA CLARA DARI GOMES

**ESTUDO DA ANISOTROPIA DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTAS
ENERGIAS**



PALOTINA

2022

MARIA CLARA DARI GOMES

**ESTUDO DA ANISOTROPIA DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTAS
ENERGIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná como requisito para a obtenção do título Licenciado em Física.

Orientador: Profa. Dra. Rita de Cássia dos Anjos

PALOTINA
2022

TERMO DE APROVAÇÃO

MARIA CLARA DARI GOMES

ESTUDO DA ANISOTROPIA DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTAS ENERGIAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná como requisito à obtenção do título de Licenciado em Física, e aprovado pela seguinte banca examinadora:



Orientador: Profa. Dra. Rita de Cássia dos Anjos
Setor Palotina, UFPR



Prof. Dr. Carlos Henrique Coimbra Araújo
Setor Palotina, UFPR



Dra. Cynthia Ahiezer Vizcarra Ventura
Pós-doc PPGFA-UTFPR

Palotina, 02 de Setembro de 2022

RESUMO

Raios cósmicos são partículas subatômicas que viajam pelo Universo com velocidades próximas à da luz. Preenchem o espaço cósmico e atingem a Terra. Os mecanismos de produção e aceleração destas partículas ainda são desconhecidos, no entanto é muito provável que originam-se de colisões entre a matéria interestelar, de remanescentes de explosões de supernovas, de buracos negros, de estrelas de nêutrons, entre outros. Resultados recentes na direção de chegada de raios cósmicos de altíssimas energias (UHECRs) medidos pelos Observatórios Pierre Auger (AAB, 2015) e Telescope Array (AABASI, 2014) mostraram a descoberta de hotspots nos hemisférios norte e sul. Neste trabalho, apresento discussões recentes destas descobertas com base em análises estatísticas de nível de significância Li-Ma e P_{value} (LI T. P; MA, 1983), associando estes resultados com possíveis fontes do catálogo Swift BAT 70-Month Hard X-ray Survey (NASA, b) e Swift BAT 105-Month Hard X-ray Survey (NASA, a). Os UHECRs sofrem desvios devido aos efeitos dos campos magnéticos, resultando numa perda de informações da sua origem, dificultando a identificação de suas fontes. Os resultados aqui apresentados mostram que as direções dos eventos de altas energias detectados são anisotrópicas; e que o estudo da composição dos núcleos sob o efeito de campos magnéticos Galácticos devem ser considerados para a descoberta das fontes de UHECRs.

Palavras-chave: Anisotropia. Raios Cósmicos de Altas Energias. Observatório Pierre Auger.

ABSTRACT

Cosmic rays are subatomic particles that travel through the universe with speeds close to that of light. They fill cosmic space and reach the Earth. The mechanisms of production and acceleration of these particles are still unknown, however it is very likely that they originate from collisions between interstellar matter, remnants of supernova explosions, black holes, and neutron stars, among others. Recent results on the direction of arrival of very high energy cosmic rays (UHECRs) measured by the Pierre Auger (AAB, 2015) and Telescope Array (AABASI, 2014) Observatories have shown the discovery of hotspots in the northern and southern hemispheres. In this paper, I present recent discussions of these discoveries based on statistical analyses of Li-Ma and P_{value} high level significance (LI T. P; MA, 1983), associating these results with possible sources from the Swift BAT 70-Month Hard X-ray Survey catalog (NASA, b) and Swift BAT 105-Month Hard X-ray Survey (NASA, a). UHECRs suffer drift due to the effects of magnetic fields, resulting in a loss of their source information, making it difficult to identify their sources. The results presented here show that the directions of the detected high energy events are anisotropic; and that the study of the composition of nuclei under the effect of Galactic magnetic fields should be considered for the discovery of the sources of UHECRs.

Palavras-chave: Anisotropy. High Energy Cosmic Rays. Pierre Auger Observatory.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Chuveiro Cósmico	11
FIGURA 2 – Dados dos Observatórios Pierre Auger e Telescope Array. A linha tracejada representa o plano galáctico.	19
FIGURA 3 – Eventos detectados pelo Telescope Array sob amostragem com $R = 10^\circ$, 20° e 30°	20
FIGURA 4 – Eventos detectados pelo Observatório Pierre Auger sob amostragem com $R = 10^\circ$, 20° e 30°	21
FIGURA 5 – 100.000 eventos MC isotrópicos gerados no campo de visão do experimento TA, amostrados com 20° , normalizados para 72 eventos. Observam-se regiões mais homogêneas devido ao grande número de eventos gerados isotropicamente.	22
FIGURA 6 – 100.000 eventos MC isotrópicos gerados no campo de visão do experimento Auger, amostrados com $R = 20^\circ$, normalizados para 231 eventos. Observam-se regiões mais homogêneas devido ao grande número de eventos gerados isotropicamente.	22
FIGURA 7 – Mapa de significância Li-Ma definido na Eq. 1 em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para os dados detectados pelo experimento Telescope Array. A linha tracejada representa o plano Galáctico.	23
FIGURA 8 – Mapa do P_{value} definido na Eq. 3 e Eq. 4	24
FIGURA 9 – Mapa de significância Li-Ma definido na Eq. 1 em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para os dados detectados pelo experimento Observatório Pierre Auger. A linha tracejada representa o plano Galáctico.	24
FIGURA 10 – Mapa do P_{value} definido na Eq. 3 e Eq. 4	25
FIGURA 11 – Mapas em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para exibir as direções de chegada de eventos UHECR e as posições de objetos do Swift BAT 70 meses em raios-X. A linha tracejada representa o plano Galáctico.	26
FIGURA 12 – Mapas em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para exibir as direções de chegada de eventos UHECR e as posições de objetos do Swift BAT 70 meses em raios-X. A linha tracejada representa o plano Galáctico.	27

FIGURA 13 – Mapas em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para exibir as direções de chegada de eventos UHECR do Telescope Array e as simulações dos eventos retropropagados para a borda da Galáxia, considerando diferentes composições. A linha tracejada representa o plano Galáctico. O raio de amostragem corresponde a 20° e o campo magnético Galáctico é aproximado pela componente regular do modelo JF2012 em (b), (c) e (d).	29
FIGURA 14 – Mapas em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para exibir as direções de chegada de eventos UHECR do Auger e as simulações dos eventos retropropagados para a borda da Galáxia, considerando diferentes composições. A linha tracejada representa o plano Galáctico. O raio de amostragem corresponde a 20° e o campo magnético Galáctico é aproximado pela componente regular do modelo JF2012 em (b), (c) e (d).	30
FIGURA 15 – Mapas em coordenadas equatoriais utilizando a projeção Hammer para exibir as direções de propagação de partículas dentro da Galáxia com diferentes energias. As partículas foram retropropagadas para a borda da Galáxia utilizando o modelo regular de campo Galáctico JF2012. A linha tracejada representa o plano Galáctico. As partículas foram propagadas considerando uma composição de próton.	31
FIGURA 16 – Mapas em coordenadas equatoriais utilizando a projeção Hammer para exibir as direções de propagação de partículas dentro da Galáxia com diferentes energias. As partículas foram retropropagadas para a borda da Galáxia utilizando o modelo regular de campo Galáctico JF2012. A linha tracejada representa o plano Galáctico. As partículas foram propagadas considerando uma composição de hélio.	32
FIGURA 17 – Mapas em coordenadas equatoriais utilizando a projeção Hammer para exibir as direções de propagação de partículas dentro da Galáxia com diferentes energias. As partículas foram retropropagadas para a borda da Galáxia utilizando o modelo regular de campo Galáctico JF2012. A linha tracejada representa o plano Galáctico. As partículas foram propagadas considerando uma composição de nitrogênio.	33
FIGURA 18 – Mapas em coordenadas equatoriais utilizando a projeção Hammer para exibir as direções de propagação de partículas dentro da Galáxia com diferentes energias. As partículas foram retropropagadas para a borda da Galáxia utilizando o modelo regular de campo Galáctico JF2012. A linha tracejada representa o plano Galáctico. As partículas foram propagadas considerando uma composição de oxigênio.	34

FIGURA 19 – Mapas em coordenadas equatoriais utilizando a projeção Hammer para exibir as direções de propagação de partículas dentro da Galáxia com diferentes energias. As partículas foram retropropagadas para a borda da Galáxia utilizando o modelo regular de campo Galáctico JF2012. A linha tracejada representa o plano Galáctico. As partículas foram propagadas considerando uma composição de silício.	35
FIGURA 20 – Mapas em coordenadas equatoriais utilizando a projeção Hammer para exibir as direções de propagação de partículas dentro da Galáxia com diferentes energias. As partículas foram retropropagadas para a borda da Galáxia utilizando o modelo regular de campo Galáctico JF2012. A linha tracejada representa o plano Galáctico. As partículas foram propagadas considerando uma composição de ferro.	36
FIGURA 21 – Dados dos Observatórios Pierre Auger, os eventos possuem energia superior a 54 EeV. A linha tracejada representa o plano galáctico.	37
FIGURA 22 – Mesmos eventos detectados pelo Observatório Pierre Auger em (a) 20° conforme ilustrado na Figura 2b. Em (b) foram adicionados 21 novos eventos com o mesmo raio $R = 20^\circ$	37
FIGURA 23 – 100.000 eventos MC isotrópicos gerados no campo de visão do experimento Auger, amostrados com $R = 20^\circ$ normalizados para 231 eventos em (a) e em (b) para 252 eventos.	38
FIGURA 24 – Mapa de significância Li-Ma definido na Eq. 1 em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para os dados detectados pelo Observatório Pierre Auger. A linha tracejada representa o plano Galáctico.	38
FIGURA 25 – Mapa do P_{value} definido na Eq. 3 e Eq. 4	39
FIGURA 26 – Ambos os eventos detectados.	39
FIGURA 27 – Mapa em coordenadas equatoriais usando a projeção de Hammer para exibir as direções de chegada de eventos UHECR e as posições de objetos do Swift BAT 70 meses em raios-X para os novos dados do Auger. A linha tracejada representa o plano Galáctico.	40
FIGURA 28 – 100.000 eventos MC isotrópicos gerados no campo de visão do experimento TA, amostrados com $R = 10^\circ$ e 30° , normalizados para 72 eventos. Observam-se regiões mais homogêneas devido ao grande número de eventos gerados isotropicamente.	44
FIGURA 29 – 100.000 eventos MC isotrópicos gerados no campo de visão do experimento Auger, amostrados com $R = 10^\circ$, 20° e 30° , normalizados para 231 eventos. Observam-se regiões mais homogêneas devido ao grande número de eventos gerados isotropicamente.	45

FIGURA 30 – Mapa de significância Li-Ma definido na Eq. 1 em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para os dados detectados pelo experimento Telescope Array. A linha tracejada representa o plano Galáctico.	46
FIGURA 31 – Mapa do P_{value} definido na Eq. 3 e Eq. 4	47
FIGURA 32 – Mapa de significância Li-Ma definido na Eq. 1 em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para os dados detectados pelo experimento Observatório Pierre Auger. A linha tracejada representa o plano Galáctico.	48
FIGURA 33 – Mapa do P_{value} definido na Eq. 3 e Eq. 4	49
FIGURA 34 – Mesmos eventos detectados pelo Observatório Pierre Auger em (a), (c) e (e) sob amostragem com $R = 10^\circ, 20^\circ$ e 30° , respectivamente - conforme ilustrado na Figura 2b. Em (b), (d) e (f) foram adicionados 21 novos eventos com raio variando da mesma forma $10^\circ, 20^\circ$ e 30°	50
FIGURA 35 – 100.000 eventos MC isotrópicos gerados no campo de visão do experimento Auger, amostrados com $R = 10^\circ, 20^\circ$ e 30° normalizados para 231 eventos em (a), (c) e (e) e para 252 eventos em (b), (d) e (f).	51
FIGURA 36 – Mapa de significância Li-Ma definido na Eq. 1 em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para os dados detectados pelo Observatório Pierre Auger. A linha tracejada representa o plano Galáctico.	52
FIGURA 37 – Mapa do P_{value} definido na Eq. 3 e Eq. 4	53

SUMÁRIO

1	–	INTRODUÇÃO	10
2	–	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1		ORIGEM DO CAMPO MAGNÉTICO	12
2.2		CAMPO MAGNÉTICO JANSSON & FARRAR	13
3	–	OBJETIVOS	14
3.1		OBJETIVO GERAL	14
3.2		OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4	–	JUSTIFICATIVA	15
5	–	METODOLOGIA	16
5.1		ANÁLISE ESTATÍSTICA	16
5.2		ESTATÍSTICA LI-MA	16
5.3		SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA	17
6	–	RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
6.1		EVENTOS DETECTADOS PELO TA E AUGER	18
6.2		INTERPRETAÇÃO ESTATÍSTICA	21
6.3		FONTES POTENCIAIS	25
6.4		ESTUDO DO EFEITO DO CAMPO MAGNÉTICO	28
6.5		NOVOS DADOS DO OBSERVATÓRIO PIERRE AUGER	36
6.6		FONTES POTENCIAIS PARA OS NOVOS DADOS DO AUGER	39
7	–	CONCLUSÃO	41
		REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Os raios cósmicos de alta energia são de origem externa ao sistema solar e possuem fontes variadas. Muito já se sabe sobre os raios cósmicos de alta energia, houve uma grande evolução nos últimos 100 anos, mas ainda existem muitas questões abertas em relação a origem, aceleração e propagação destas partículas. Atualmente, a física dedicada a esse campo de estudo busca respostas sobre o grande enigma: como estas partículas são aceleradas e qual a origem de partículas com $E > 10^{20}$ eV. Conforme Anjos (2014),

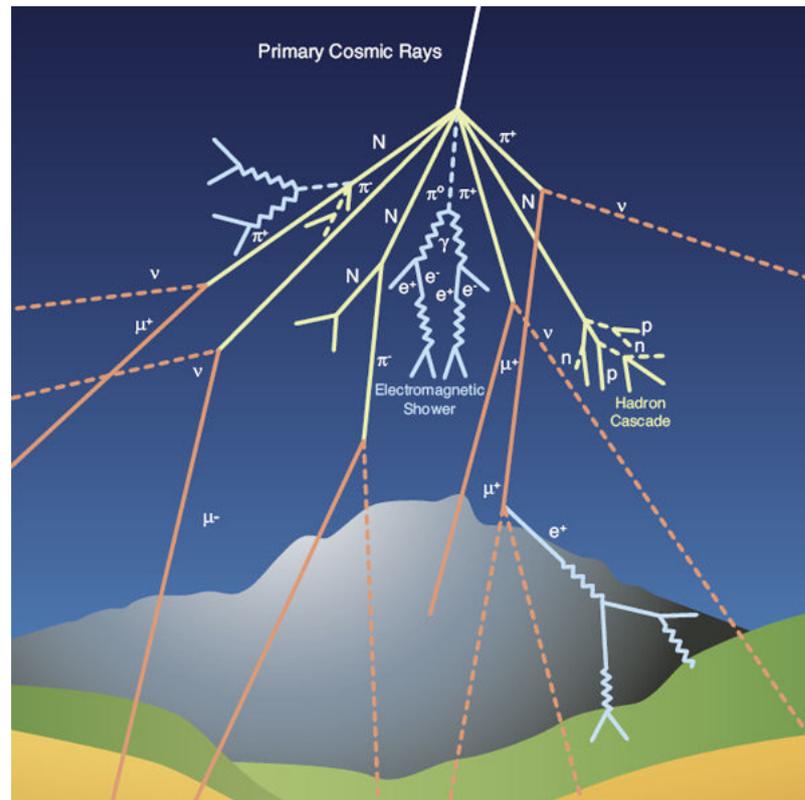
Raios cósmicos são partículas subatômicas com velocidades próximas à da luz. Preenchem o espaço cósmico e atingem a Terra. Os mecanismos de produção dos raios cósmicos ainda não são bem descritos, no entanto é muito provável que originam-se de colisões entre a matéria interestelar, de remanescentes de explosões de supernovas, de núcleos ativos de galáxias, de estrelas de nêutrons, entre outros (ANJOS, 2014, p. 35).

Raios cósmicos de altas energias possuem energia acima de 10^{18} eV e recebem o nome de Raios Cósmicos de Ultra-Alta Energia, em inglês Ultra High Energy Cosmic Ray (UHECRs). Este estudo será dedicado a essas partículas. Oliveira afirma que existe um grupo de fontes astrofísicas que ao serem submetidas A altas energias durante processos físicos que acontecem em seu interior, seriam capazes de acelerar os raios cósmicos da ordem de PeV 10^{15} até EeV 10^{18} (OLIVEIRA, 2017). Tais possíveis fontes são os quasares, as supernovas e núcleos ativos de galácticos.

Para Bandeira e Mackedanz as galáxias que possuem seu núcleo ativado, estrelas de nêutrons, explosões de raios gama, são possíveis fontes de raios cósmicos, e ainda completa “para determinar se o candidato a fonte de raios cósmicos é adequado, é necessário determinar a direção de chegada dos raios cósmicos da faixa de energia de interesse apontando ao respectivo candidato” (BANDEIRA Y. B; MACKEDANZ, 2019, s/p). Nota-se que há concordância quanto aos estudos de Anjos com os de Bandeira e Mackedanz, onde ambos citam as mesmas possíveis fontes.

Um estudo sobre a descoberta dos raios cósmicos foi essencial para o desenvolvimento da física de partículas e da física de altas energias. Como assegura Bustamante (BUSTAMANTE, 2013), no final do século XVIII em experiências como a de Coulomb, deu-se início o estudo das partículas cósmicas, mas provas concretas foram obtidas somente em 1900. Logo após, em 1912 com a experiência de Victor Hess, foi possível elaborar a hipótese de que esses raios eram de origens extraterrestres. Segundo Anjos (ANJOS, 2014), durante as décadas de 30 e 50, ocorreu a principal fonte de descoberta de novas partículas como os múons e os píons, este último descoberto pelo físico e pesquisador brasileiro César Lattes, em uma equipe britânica, descoberta esta que contribuiu para a descoberta dos raios cósmicos. A primeira detecção de UHECRs foi feita por John Linsley em 1962, com o uso de 20 detectores terrestres, essas observações levaram a descoberta do chuveiro cósmico representado na Figura 1.

FIGURA 1 – Chuveiro Cósmico



Fonte: De Oliveira (2017) (OLIVEIRA, 2017)

De acordo com Anjos,

Técnicas modernas de detecção e modelos sofisticados de reconstrução de eventos de raios cósmicos permitem determinar com precisão a energia e a direção de chegada de partículas com energia acima de 10^{18} eV. Da mesma forma, os experimentos atuais têm sido projetados para extrair informações indicativas da massa da partícula cósmica (ANJOS, 2014, p. 39).

Cabe aqui citar os principais Observatórios construídos para o estudo dos UHECRs: "Haverah Park, KASCADE e sua expansão KASCADE-Grande, Fly's Eye, HiRes, Telescope Array – TA e o Observatório Pierre Auger"(ANJOS, 2014, p.41). Neste trabalho o Telescope Array (AABASI, 2014) e o Observatório Pierre Auger (AAB, 2015) ganharão destaque pois os utilizaremos como base de dados da pesquisa. O primeiro é responsável por observar o hemisfério sul, encontra-se em Utah nos EUA, foi inaugurado com 2007 e faz o uso de detectores de superfície e de fluorescência para $E > 10^{17}$ eV. Por sua vez, o Observatório Pierre Auger encontra-se no Sul, com mais precisão em Malargüe, Mendoza na Argentina e foi proposto em 1992, com o objetivo de detectar raios cósmicos com energia acima de 10^{17} eV utilizando detectores de superfície e de fluorescência. O conjunto de dados utilizados foram disponibilizados à população, usaremos o período de 2008 a 2022.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ORIGEM DO CAMPO MAGNÉTICO

Os campos magnéticos com escalas próximas ao tamanho da Galáxia podem interferir na propagação dos UHECRs. O campo magnético extragaláctico (EGMFs) ainda é desconhecido, os mecanismos que o classificam são divididos em classes astrofísicas e primordiais (BATISTA, 2019). Acredita-se que quando o raio de Larmor de um raio cósmico ultrapassa o tamanho do acelerador, ele é direcionado para o meio interestelar. O raio de Larmor é o raio associado à trajetória de uma partícula em um campo magnético e o acelerador em questão é a própria Galáxia. A propagação dos UHECRs, antes de entrarem em nossa Galáxia, também é influenciada pela radiação cósmica de fundo e por campos magnéticos extragalácticos (BISTER, 2018).

Em uma teoria de origem primordial, os campos magnéticos presentes hoje seriam relíquias de um campo coerente existente anteriormente à formação das galáxias. Tal campo magnético teria suas linhas de campo deformadas e curvadas ao redor de seu centro devido a movimentos de gás associados ao colapso de protogaláxias. Em teorias de dínamo, como a MFD (Mean Field Dynamo, dínamo de campo médio), a difusividade magnética das galáxias é alta e o campo rapidamente decairia caso não fosse realimentado pelo movimento de fluidos. Em teorias primordiais, a difusividade das galáxias é baixa e o fluxo magnético é aproximadamente constante nas galáxias, de forma que o campo deve ter sido criado no passado. (BATISTA R. A; KEMP, 2012, p.18).

Devido a falta de modelos observacionais sobre os EGMFs, a análise da propagação de UHECRs torna o estudo mais complexo. As rotações de Faraday (RM) apresentam um limite superior de 1.7 nG a um comprimento de coerência $L_c = 1$ Mpc. Porém, L_c é bem variável, ele descreve o tamanho de uma região coerente onde as direções e a intensidade de campo magnético não variam muito. De acordo com Bister (2018), os modelos para estudar a origem do EGMFs são divididos em dois: "amplificação de campos de origens fracas produzidos em um estágio inicial da evolução do universo, e produção durante a formação da estrutura, por fluxos magnéticos de galáxias ativas ou remanescentes de supernovas"(BISTER, 2018, p.17).

Independentemente de sua origem, os campos magnéticos estão sujeitos a decadência turbulenta livre, onde a intensidade do campo se reduz à medida que o comprimento de coerência aumenta. Isso ocorre porque as potências magnéticas em pequenas distâncias são dispersas em calor. O comprimento de coerência máximo e restrito é dado pelo raio de Hubble. Para caracterizar a influência do EGMF na propagação de UHECRs, modelos de EGMFs foram estabelecidos. Há alguns modelos que são baseados em simulações de formação de estrutura em grande escala (LSS), como exemplo o campo de Dolag (BATISTA, 2019). Uma versão mais representativa baseada em LSS é o campo de Benchmark, que por sua vez quantifica as incertezas nos UHECR simulados devido a diferentes modelos de radiação de fundo extragaláctica (BISTER, 2018). Uma abordagem para modelar a trajetória dos UHECRs é fazer o uso do campo de Kolmogorov, no qual considera-se que o mesmo é turbulento. Este modelo se encaixa perfeitamente na hipótese da origem primordial: nenhum LSS está presente e a intensidade do

campo é quase uniforme em todo o universo. Em campos exclusivamente turbulentos como o de Kolmogorov, os UHECRs realizam um passeio aleatório, onde se espalham aleatoriamente e acumulam deflexões estocasticamente (BRAY J.D.; SCAIFE, 2018).

O campo magnético Galáctico (GMF) é melhor compreendido do que os EGMFs. Os modelos desenvolvidos fazem o uso de mapas síncrotron polarizados, combinados com medições de rotação de Faraday (RM) para o campo regular e mapas de intensidade síncrotron para derivar a componente do campo aleatório (BATISTA, 2019). O modelo mais completo de acordo com a literatura foi desenvolvido por Jansson & Farrar em 2012 (JANSSON R; FARRAR, 2012).

2.2 CAMPO MAGNÉTICO JANSSON & FARRAR

A influência do campo magnético na trajetória da partícula é um dos efeitos mais importantes na propagação dos raios cósmicos, além da sua composição e origem. Como explica (OLIVEIRA, 2017), baseado no mapa de emissão síncrotron Galáctica e em mais de 40.000 medidas de rotação extragalácticas, o modelo Jansson & Farrar (JF12) é o mais atual para o campo Galáctico e constitui-se por três partes: o campo regular, também conhecido como ordenado; campo aleatório ou turbulento; e o campo estriado. Essas estruturas podem ser estudadas individualmente devido a suas diferentes contribuições (TABORDA, 2013). O campo regular possui grande escala com o disco, halo e fora do plano. Seus parâmetros podem ser ajustados de modo independente em cada componente separadamente.

O campo regular contribui para três observáveis: a emissão síncrotron (I), emissão síncrotron polarizada (PI) e rotação de Faraday. A componente regular de larga escala é responsável por deflexões coerentes, pois sua direção segue a estrutura do braço espiral da Galáxia, o braço possui intensidades entre -4.2 a 3.0 G e raios entre 5 - 30 kpc. O campo halo abrange uma intensidade de campo que decresce exponencialmente radialmente com a distância ao disco. A componente fora do plano, ou então, componente X, não possui componente azimutal, sendo introduzido via campo do halo toroidal inspirado por observações de borda de outras galáxias (TABORDA, 2013; BISTER, 2018). Este campo é bastante forte, cerca de $5\mu G$ no centro, além disso, é um campo direcionado do sul para o norte. O campo aleatório é especificado por sua intensidade de campo variável com um comprimento de coerência da ordem de 100 pc ou menos, seu campo aleatório contribui apenas para a emissão síncrotron. Ele é descrito por um campo de Kolmogorov independente. O campo estriado permite a possibilidade de um campo aleatório em grandes escalas e contribui para a emissão síncrotron e emissão síncrotron polarizada (JANSSON R; FARRAR, 2012, p. 24).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

No presente trabalho buscou-se estudar os efeitos da anisotropia na direção de chegada de raios cósmicos correlacionando-os com a direção no céu de possíveis fontes de UHECRs.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a deflexão de partículas no Campo Magnético Galáctico JF12;
- Correlacionar os eventos detectados com possíveis fontes de UHECRs;
- Interpretar o comportamento das partículas de diferentes composições e energias;

4 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho busca analisar a direção de chegada de UHECRs comparando a distribuição dos eventos com amostras isotrópicas simuladas. Examinamos também possíveis fontes potenciais através de dois catálogos SWIFT BAT: telescópio de raios-X de 70 e 105 meses. O estudo baseou-se nas ferramentas descritas nas linguagens Julia e Python e no trabalho nomeado *Anisotropy in the Arrival Directions of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays* (VILLASEÑOR, 2017). Neste trabalho, tomaremos como verdade que a amostra original é isotrópica. Após simular distribuições de eventos de raios cósmicos de altíssimas energias (EeV) isotrópicos em nossa Galáxia, vamos compará-las com a amostra original utilizando o método de análise estatística de Li-Ma e P_{value} para validar ou refutar o critério adotado.

5 METODOLOGIA

O estudo baseou-se nas ferramentas descritas nas linguagens Julia e Python, no trabalho nomeado Anisotropy in the Arrival Directions of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays (VILLASEÑOR, 2017). Para análise quantitativa dos dados, fez-se o uso da significância estatística de Li-Ma e P_{value} .

5.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Considere uma dada distribuição de eventos em uma região. Para sabermos se esta amostra é anisotrópica ou isotrópica podemos compará-la com uma amostra isotrópica. Para isto simulamos N eventos randomicamente a fim de verificar uma discrepância na hipótese estatística que definimos. O nível de significância α adotado para esse estudo é de 0,05, sendo este o limite superior para o P_{value} , ou também denominado nível de significância de 95%. Quando o valor encontrado for menor que o nível de significância, então rejeita-se a hipótese estipulada.

Em outras palavras, a medida do valor P_{value} representa a probabilidade de erro envolvida em aceitar o resultado observado como válido. Um valor de 0,05 indica que há 5% de probabilidade de que a relação entre as variáveis encontradas na amostra seja aceitável.

São propostos duas análises para estimar a significância estatística de um resultado observacional. Sendo que a primeira se refere a imediata estimativa do desvio padrão do sinal observado (N_s) e a segunda, através da aplicação do método de hipóteses estatísticas.

5.2 ESTATÍSTICA LI-MA

A variância do sinal N_s pode ser definido uma vez que as contagens na origem N_{on} e as contagens de fundo (isotrópicas) N_{off} são resultados de duas medições independentes. Quando utilizado esse método, deve-se considerar que não houve fonte extra e todas as contagens observadas foram devido ao fundo. O método de razão de probabilidade leva em consideração dois parâmetros desconhecidos, são eles: a expectativa do número de partículas fonte e a expectativa de partículas de fundo. Com isso, é utilizado um teste de hipótese onde os dois parâmetros estão associados, chamado de hipótese nula. A hipótese nula é de que nenhuma fonte extra existe e todas as partículas observados são devido ao fundo, ou seja, $N_s = 0$. Com a utilização de um teorema estatístico também é possível definir uma hipótese alternativa: $N_s \neq 0$.

Portanto, para quantificar o desvio de isotropia presente nos dados a significância estatística baseada em Li-Ma (LI T. P; MA, 1983) utilizamos:

$$S_{LM} = \left[2N_{on} \ln \left(\frac{(1 + 1/\alpha)N_{on}}{N_{on} + N_{off}} \right) + 2N_{off} \ln \left(\frac{(1 + \alpha)N_{off}}{N_{on} + N_{off}} \right) \right]^{1/2}, \quad (1)$$

onde t_{on} se refere a fontes observadas por um determinado tempo com N_{on} partículas presentes. A medição de fundo isotrópico em um intervalo de tempo é representado por t_{off} contando N_{off} partículas. Com isso, consegue-se determinar a relação entre as diferentes amostras ($\alpha = t_{on}/t_{off}$) (LI T. P; MA, 1983).

Testada por meio de simulações de Monte Calo, a equação acima também pode ser aplicada quando há um caso geral, com $\alpha \neq 1$. Pois na prática o tempo de observação da fonte não é idêntico ao tempo de fundo e são medidas independentes. O nível de confiança pode ser calculado através da equação:

$$\zeta = p_0 = (1 - p)^M, \quad (2)$$

onde p é a probabilidade de anisotropia e M o número de amostras analisadas.

5.3 SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA

Como forma alternativa ao uso Li-Ma pode-se utilizar o P_{value} para estimar o desvio da isotropia. O valor de p é calculado usando a distribuição amostral da estatística de teste sob a hipótese nula:

$$P_{value} = P_{poisson}(X \geq N_{on}), \quad (3)$$

onde,

$$P_{value} = 1 - CDF_{poisson}(\mu = \alpha N_{off}, X = N_{on} - 1). \quad (4)$$

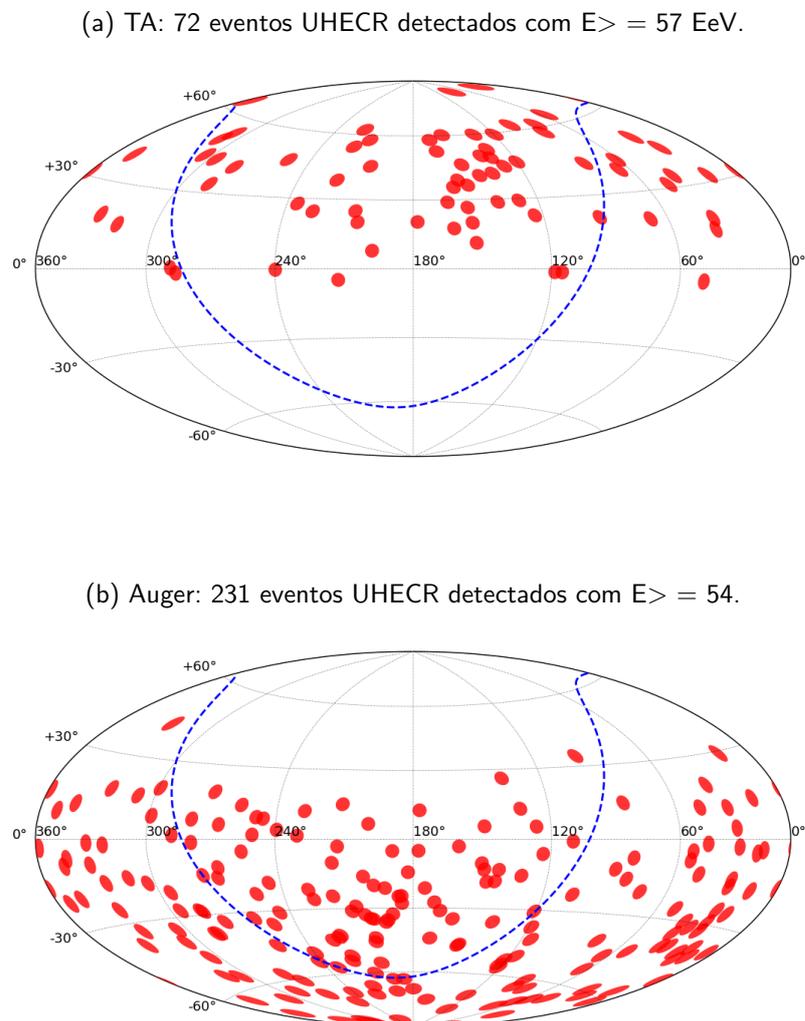
onde $CDF_{poisson}$ é a função distribuição de Poisson acumulada. Ao utilizar um conjunto de dados da Colaboração Pierre Auger, foi possível identificar a direção no céu de UHECRs em nossa Galáxia. Estes dados fornecem a direção de chegada dos eventos em coordenadas equatoriais e/ou galácticas. A hipótese desse estudo será de que nossa amostra é isotrópica. Ao final, após calcular a anisotropia e comparar com os dados simulados isotropicamente através do Monte Carlo para a significância estatística Li-Ma em coerência com o P_{value} , devemos aceitá-la ou refutá-la.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 EVENTOS DETECTADOS PELO TA E AUGER

Ao utilizar um conjunto de dados da Colaboração Pierre Auger e Telescope Array foi possível identificar a direção de chegada de partículas ultra-alta energéticas em nossa Galáxia. Estes dados fornecem a direção de chegada dos eventos em coordenadas equatoriais e/ou galácticas. A hipótese desse estudo será de que nossa amostra é isotrópica. Ao final, após medir a anisotropia e comparar com os dados simulados isotropicamente com o auxílio do Li-Ma e P_{value} (que será abordado na seção seguinte) devemos aceitá-la ou refutá-la. A Figura 2 mostra os eventos detectados pelos Observatórios citados em coordenadas equatoriais, fazendo o uso a projeção de Hammer. Para construir esse mapa, é levado em consideração o zênite de cada evento, sua energia, bem como suas coordenadas de latitude e longitude.

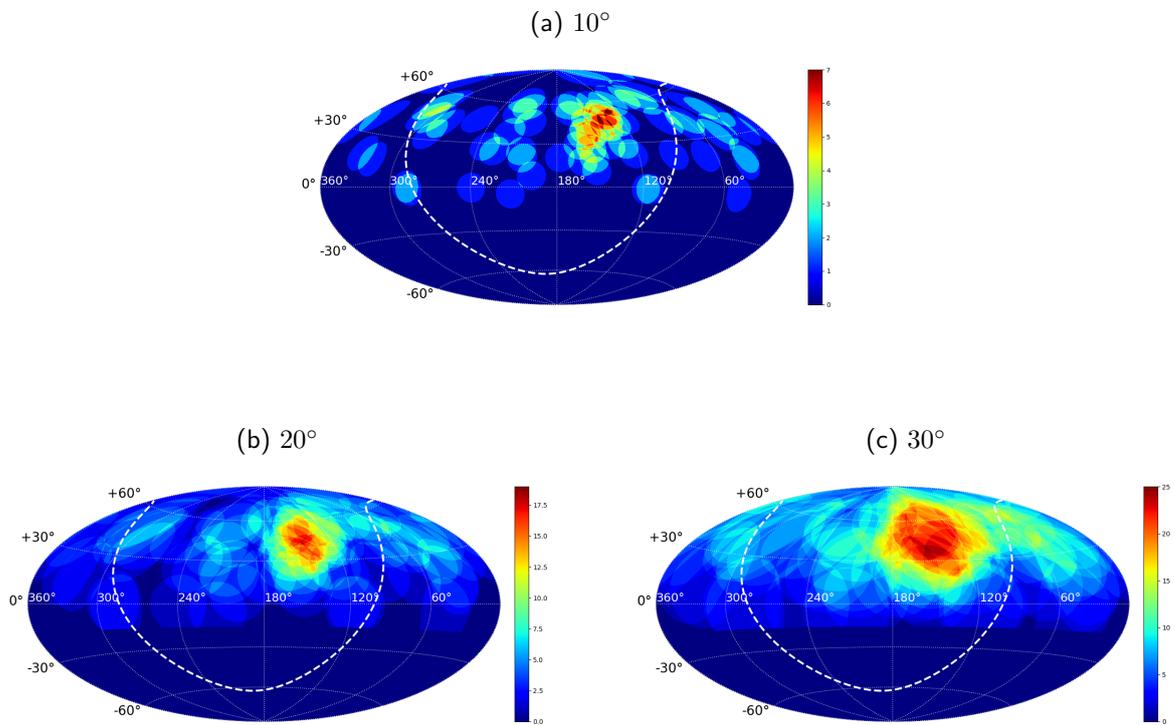
FIGURA 2 – Dados dos Observatórios Pierre Auger e Telescope Array. A linha tracejada representa o plano galáctico.



Fonte: O autor (2022)

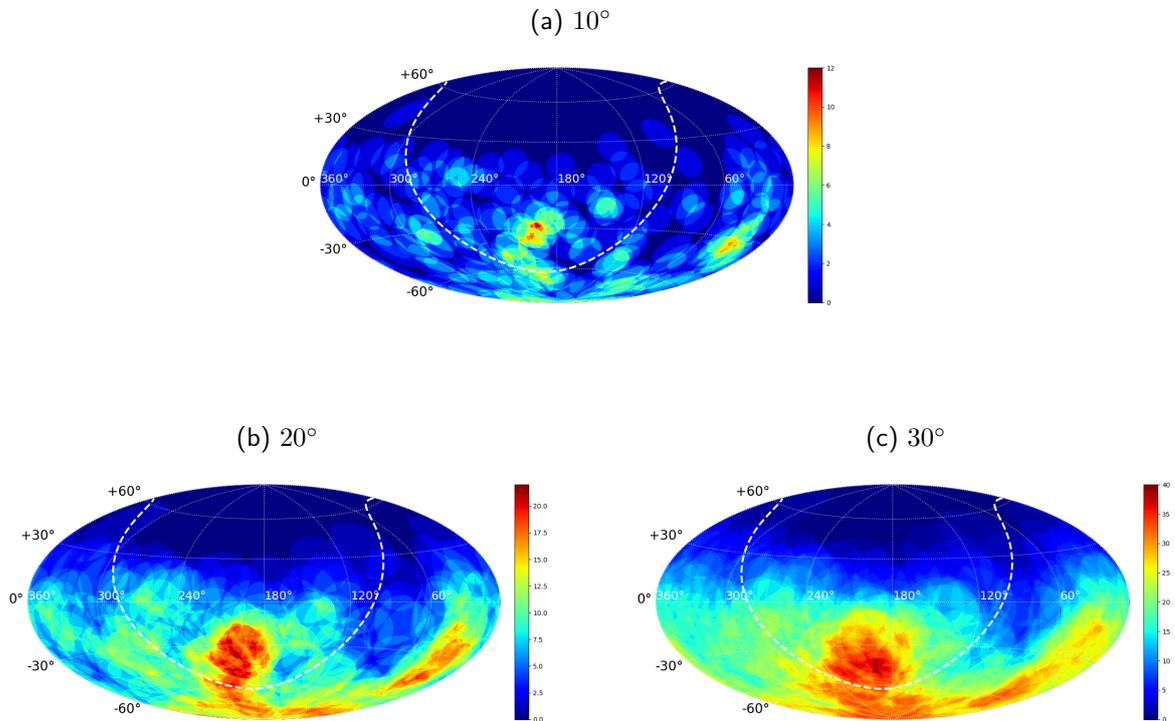
Nota-se que há mais detecção de eventos no sul através do Observatório Pierre Auger, isso se dá pelo fato dele ser maior em extensão e conseqüentemente ter uma maior exposição. Para identificar onde se tem a maior quantidade de eventos foram adicionados raios, com diferentes ângulos, ao redor dos eventos detectados, como mostram as Figuras 3 e 4. Referindo-se ao Telescope Array e Observatório Pierre Auger, respectivamente.

FIGURA 3 – Eventos detectados pelo Telescope Array sob amostragem com $R = 10^\circ$, 20° e 30° .



Fonte: O autor (2022)

FIGURA 4 – Eventos detectados pelo Observatório Pierre Auger sob amostragem com $R = 10^\circ$, 20° e 30° .



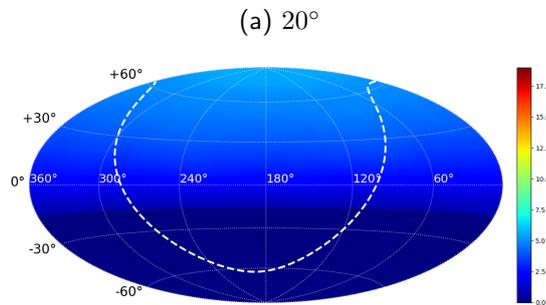
Fonte: O autor (2022)

Ao analisar os mapas apresentados em 3 e 4, é possível observar que quando o raio possui 10° encontra-se pouca evidência de eventos sobrepostos, por isso não o consideramos como ideal. Quanto ao $R = 30^\circ$ observa-se que há bastante ocorrência de eventos superpostos, sendo assim difícil a identificação da região que possui mais eventos. Deste modo, consideramos como ideal o raio igual a 20° , usando uma área de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ para cada raio, pois permite que os eventos sejam identificados com maior clareza.

6.2 INTERPRETAÇÃO ESTATÍSTICA

A próxima etapa consiste em avaliar o ruído de fundo, denominado background. Para tanto, criou-se as Figuras 5 e 6, supondo que estes sejam isotrópicos. Foram simulados 100.000 eventos de modo aleatório a fim de comprovar as regiões com maiores incidências de eventos. Esta simulação leva em consideração a exposição geométrica em função do ângulo zenital, este mapa tem como granularidade igual a dez. Granularidade pode ser definido como a extensão à qual um sistema é dividido em partes pequenas. Como foi mostrado, o raio ideal para análise $R=20^\circ$, os demais mapas podem ser visualizados no apêndice A em Figura 28.

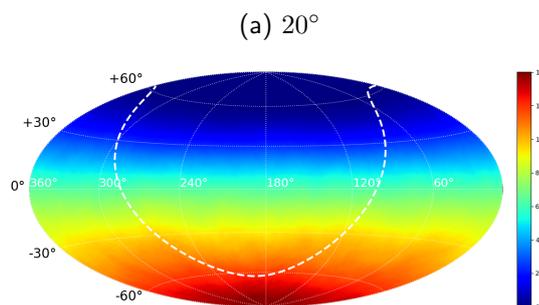
FIGURA 5 – 100.000 eventos MC isotrópicos gerados no campo de visão do experimento TA, amostrados com 20° , normalizados para 72 eventos. Observam-se regiões mais homogêneas devido ao grande número de eventos gerados isotropicamente.



Fonte: O autor (2022)

Os 100.000 eventos simulados são guardados no N_{off} , e como vimos, os 72 eventos são aqueles que foram detectados pelo observatório, portanto, N_{on} . Quando analisamos os mapas, notamos que Na letra (c) onde $R=30^\circ$ há uma maior heterogeneidade no mapa, isso se dá devido a localização em que os detectores estão situados, ou seja, sua exposição. Na sequência, o mesmo procedimento foi realizado para o hemisfério sul.

FIGURA 6 – 100.000 eventos MC isotrópicos gerados no campo de visão do experimento Auger, amostrados com $R = 20^\circ$, normalizados para 231 eventos. Observam-se regiões mais homogêneas devido ao grande número de eventos gerados isotropicamente.



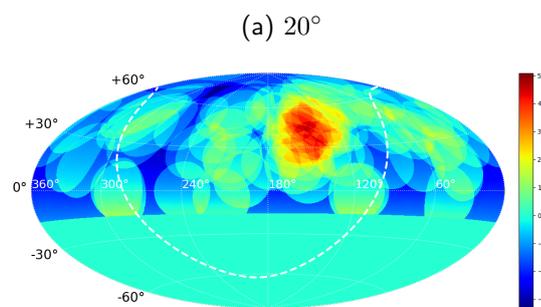
Fonte: O autor (2022)

Quando comparado a homogeneidade do TA ao do Auger é possível identificar uma certa diferença, mais uma vez isso se dá ao fato da maior quantidade de eventos que o Auger detecta. Os demais mapas estão no apêndice A em Figura 29. Com efeito, é necessário o uso

da significância estatística Li-Ma e P_{value} para identificar se a direção dos eventos detectados é isotrópica. Os eventos simulados isotropicamente são guardados na variável que chamamos de N_{off} . A Equação (1) faz a relação dos eventos simulados isotropicamente, com aqueles que detectamos para determinar o que chamaremos de S_{LM} .

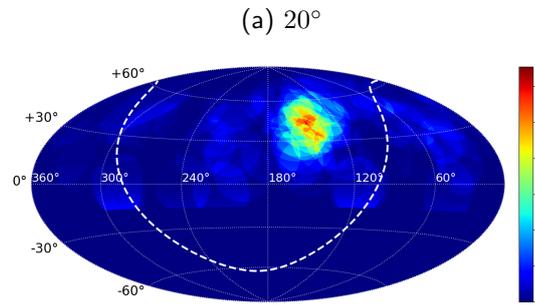
O valor máximo encontrado para significância Li-Ma através da Equação (1) foi de 5,04. Deste modo, o valor se aproxima de uma amostra anisotrópica. O valor máximo encontrado para P_{value} (3) foi de 6,45. Quando foi gerado os eventos isotrópicos apresentados nas Figuras 5 e 5 foi possível obter uma significância estatística unilateral, com uma probabilidade similar entre as duas formas em que a significância foi medida. O TA apresentou uma significância de $3,4\sigma$ e $4,6\sigma$ para o Auger.

FIGURA 7 – Mapa de significância Li-Ma definido na Eq. 1 em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para os dados detectados pelo experimento Telescope Array. A linha tracejada representa o plano Galáctico.



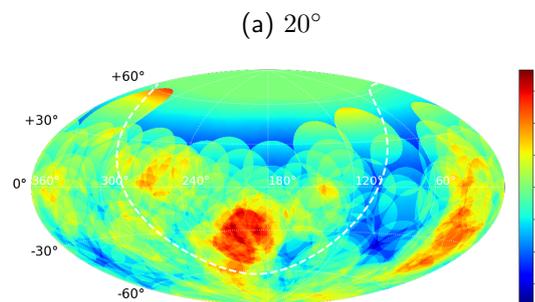
Fonte: O autor (2022)

Os demais mapas para análise e comparação estão dispostos no apêndice A em Figura 30. A seguir, mostra-se o mapa do P_{value} , a fim de fazer uma comparação com os demais raios já analisados pode ser encontrado em Figura 31 no apêndice A.

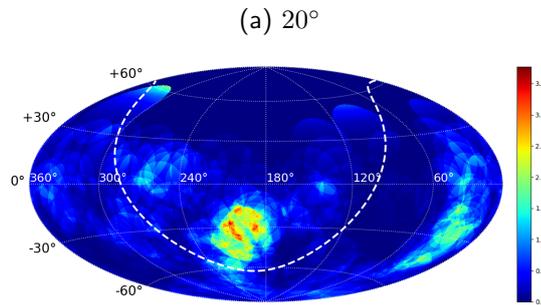
FIGURA 8 – Mapa do P_{value} definido na Eq. 3 e Eq. 4

Fonte: O autor (2022)

FIGURA 9 – Mapa de significância Li-Ma definido na Eq. 1 em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para os dados detectados pelo experimento Observatório Pierre Auger. A linha tracejada representa o plano Galáctico.



Fonte: O autor (2022)

FIGURA 10 – Mapa do P_{value} definido na Eq. 3 e Eq. 4

Fonte: O autor (2022)

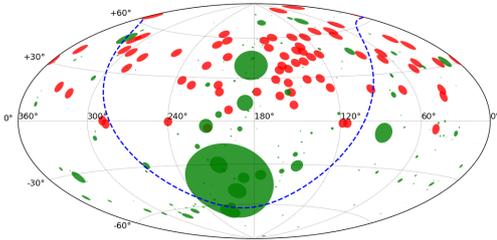
Os outros mapas estão dispostos no apêndice A em Figura 32 e Figura 33.

6.3 FONTES POTENCIAIS

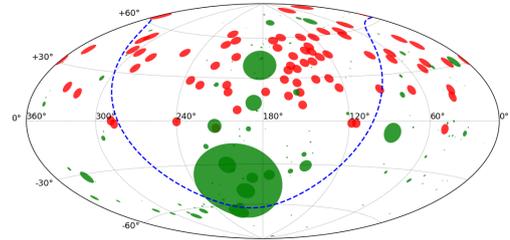
Buscando uma correlação com as posições das possíveis fontes dos UHECRs usou-se o catálogo de (AGNs) Swift BAT (NASA, b) nas Figuras 11 e 12. O Swift BAT é um Telescópio de 70 meses em raios-X. O catálogo inclui 1210 fontes e a maioria delas podem ser classificadas como Galáxias Ativas (AGNs), portanto geramos os mapas a seguir variando a distância em Mpc. Para construir esses mapas foi preciso encontrar os valores de Mpc em redshift, para isso, fizemos a transformação usando os seguintes parâmetros: 1 redshift equivale a 4.22×10^9 parsec e 1 parsec corresponde a 2.37×10^{-10} redshift usamos também a ascensão reta, declinação dos eventos e das fontes potenciais e o fluxo.

FIGURA 11 – Mapas em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para exibir as direções de chegada de eventos UHECR e as posições de objetos do Swift BAT 70 meses em raios-X. A linha tracejada representa o plano Galáctico.

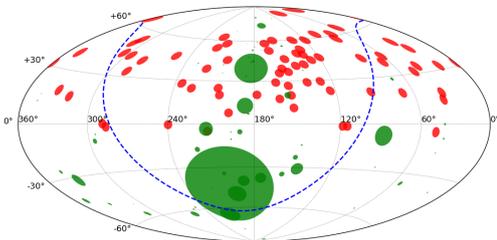
(a) 202 objetos a 100 Mpc



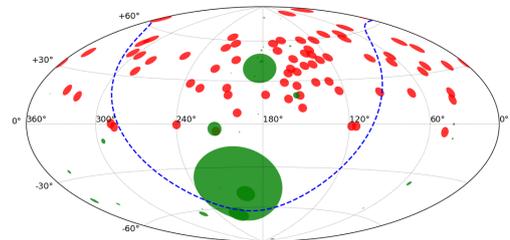
(b) 159 objetos a 80 Mpc



(c) 70 objetos a 50 Mpc



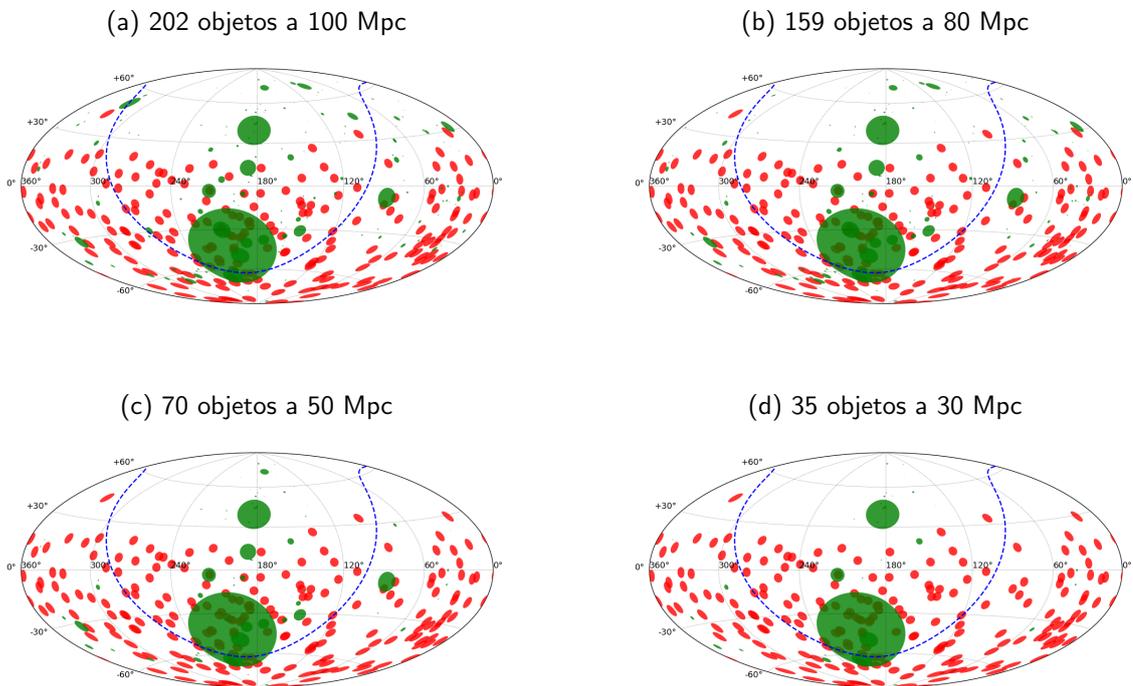
(d) 35 objetos a 30 Mpc



Fonte: O autor (2022)

Para o Auger foi feito o mesmo processo, para as mesmas distâncias.

FIGURA 12 – Mapas em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para exibir as direções de chegada de eventos UHECR e as posições de objetos do Swift BAT 70 meses em raios-X. A linha tracejada representa o plano Galáctico.



Fonte: O autor (2022)

Constata-se que o céu do norte tem menos fontes potenciais, isso explica seu mapa ser mais compacto quando comparado ao sul. As Figuras 11 e 12 mostram os círculos vermelhos com um raio de 3° e representam os eventos detectados. Os círculos verdes representam as possíveis fontes localizados a 30, 50, 80 e 100 Mpc da Terra, com seus raios arbitrariamente escalados como $FluxX/50$ em graus. A luminosidade pertence a uma banda em X de 14 a 195 KeV.

As fontes que ganham destaque no norte são denominadas NGC 4151 e NGC 4388 representada na cor verde. Já as do sul ganham destaque CenA, NGC 2110, IC 4329A, a Galáxia Circinus e NGC 5506 também destacadas na cor verde. Estas fontes com mais alta luminosidade podem indicar possíveis fontes de raios cósmicos de altas energias.

Para obter as diferentes distâncias utilizamos o parâmetro redshift. O redshift representa o desvio para o vermelho, isto significa uma alteração na forma como a frequência da onda é observada no espectroscópio em função da velocidade relativa entre a fonte emissora e o receptor. Utilizamos esta informação para o cálculo da distância da fonte. Importante mensurar que, ao considerá-lo estamos excluindo a possibilidade de movimentação do objeto dentro do seu campo gravitacional.

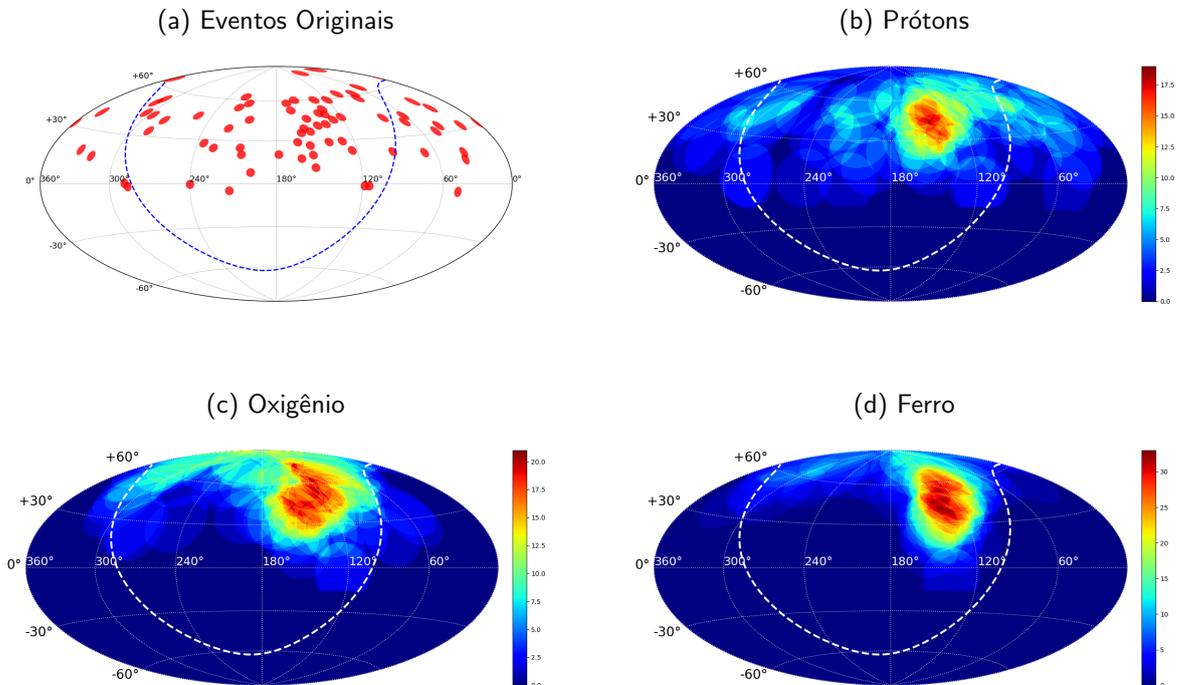
6.4 ESTUDO DO EFEITO DO CAMPO MAGNÉTICO

A medida que mais dados são coletados fica evidente que os UHECRs sofrem desvios por campos magnéticos Galácticos. Os campos Galácticos possuem grande influência na propagação de UHECRs. Novas informações são obtidas ao passo que os estudos se avançam, buscando cada vez mais realizar correções para identificar as fontes mais importantes. Ao conhecer as fontes de multi-mensageiros (neutrinos com energias altas, UHECRs e raios gama de alta energia) será possível esclarecer enigmas: mecanismos de aceleração, propagação pelo Universo e composição destas partículas.

Para corrigir as deflexões dos raios, fizemos o uso do modelo particular Jansson-Farrar, JF2012 (JANSSON R; FARRAR, 2012). A Figura 13, na sequência 14 mostram os eventos do TA e Auger, respectivamente, simulados considerando composições de prótons, oxigênio e ferro retropropagados para a borda da Galáxia. Quando empregado o termo retropropagados, estamos querendo dizer que os eventos são retornados para a borda da nossa galáxia a fim de observar seu comportamento para diferentes composições, ou seja, voltamos os eventos detectados para a borda da galáxia para entendermos como eles chegam e qual seu comportamento. Para obter essas trajetórias é preciso resolver a equação de Lorentz, para esta finalidade foi utilizado o programa CRBackProp escrito em Julia/Python.

A Figura 13 mostra a direção dos eventos originais em 13-(a), quando consideramos os eventos como prótons, observamos que a direção dos eventos mostram pouca deflexão, na borda da Galáxia 13-(b). Entretanto, considerando núcleos mais pesados, como oxigênio 13-(c) e ferro 13-(d), os eventos sofrem altas deflexões. Quanto mais pesado o núcleo nota-se que há maior desvio. Esta simulação foi realizada utilizando apenas a componente regular do campo JF2012.

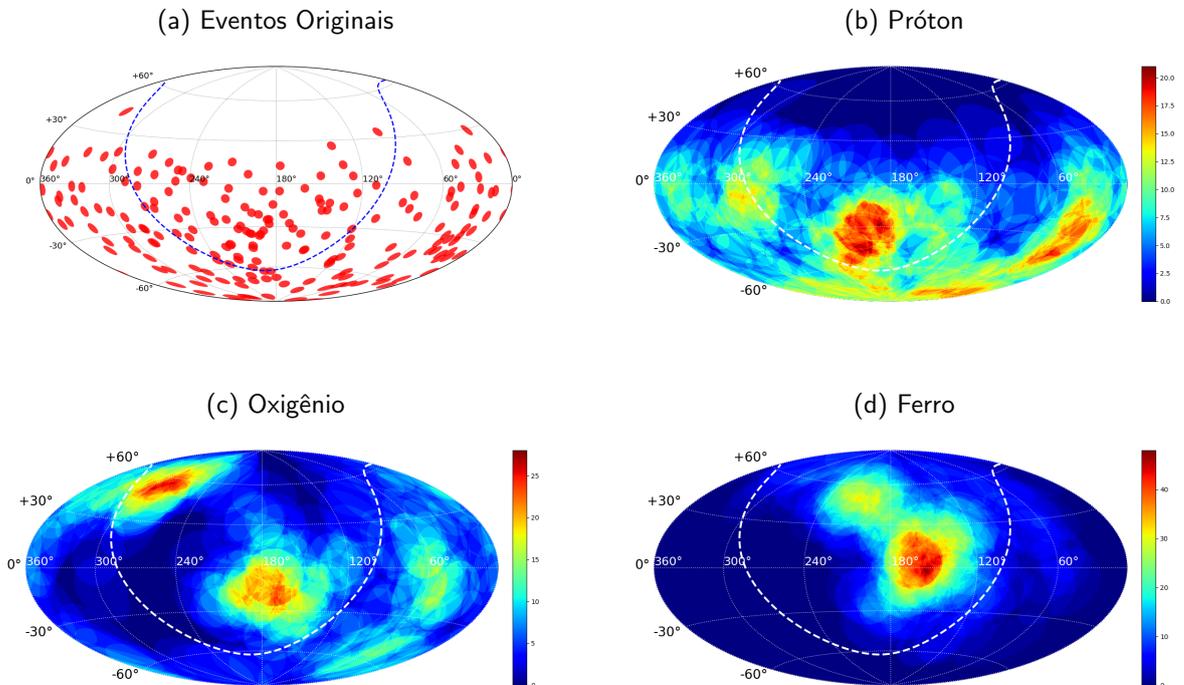
FIGURA 13 – Mapas em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para exibir as direções de chegada de eventos UHECR do Telescope Array e as simulações dos eventos retropropagados para a borda da Galáxia, considerando diferentes composições. A linha tracejada representa o plano Galáctico. O raio de amostragem corresponde a 20° e o campo magnético Galáctico é aproximado pela componente regular do modelo JF2012 em (b), (c) e (d).



Fonte: O autor (2022)

A fim de identificar uma região de maior significância também para Auger, observa-se que a deflexão dos eventos para núcleos mais pesados é maior do que a apresentada pelo TA.

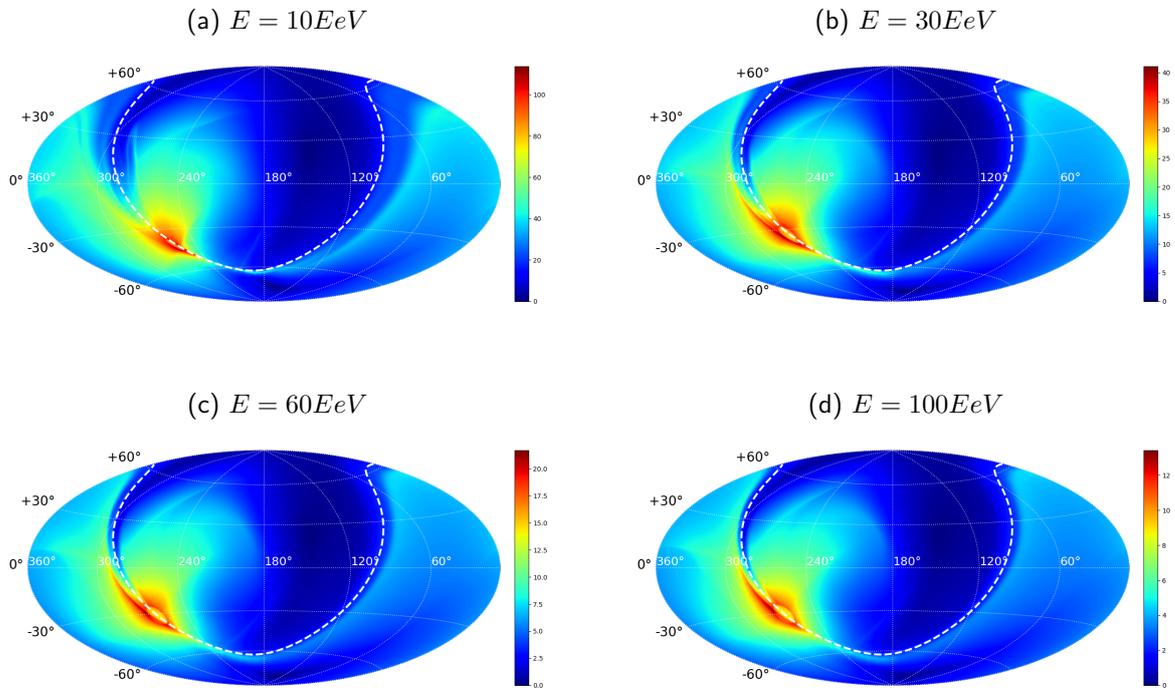
FIGURA 14 – Mapas em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para exibir as direções de chegada de eventos UHECR do Auger e as simulações dos eventos retropropagados para a borda da Galáxia, considerando diferentes composições. A linha tracejada representa o plano Galáctico. O raio de amostragem corresponde a 20° e o campo magnético Galáctico é aproximado pela componente regular do modelo JF2012 em (b), (c) e (d).



Fonte: O autor (2022)

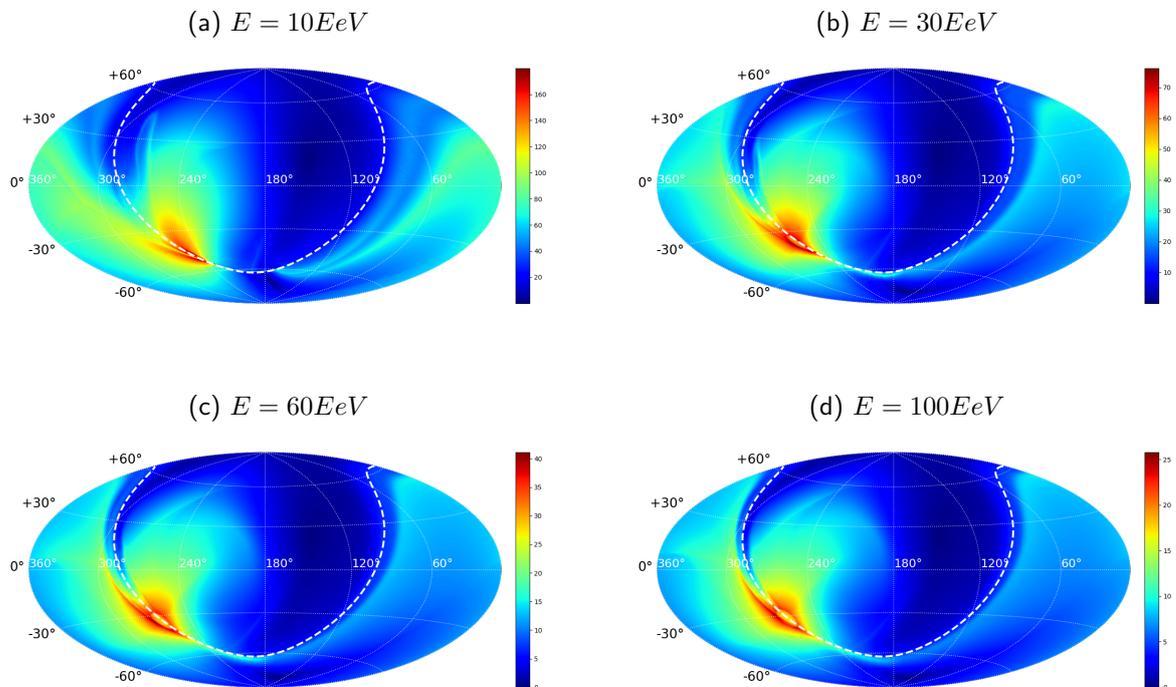
Nesta seção, simulamos 1.6 milhão de partículas com diferentes composições, de núcleos leves até o ferro. Desta vez, dividimos a área da projeção de Hammer em 180×5 e 360×5 (em que 5 está representando a granularidade). Quando são retropropagadas com diferentes energias é possível observar os desvios que estes raios sofrem. Os resultados são descritos nos mapas a seguir.

FIGURA 15 – Mapas em coordenadas equatoriais utilizando a projeção Hammer para exibir as direções de propagação de partículas dentro da Galáxia com diferentes energias. As partículas foram retropropagadas para a borda da Galáxia utilizando o modelo regular de campo Galáctico JF2012. A linha tracejada representa o plano Galáctico. As partículas foram propagadas considerando uma composição de próton.



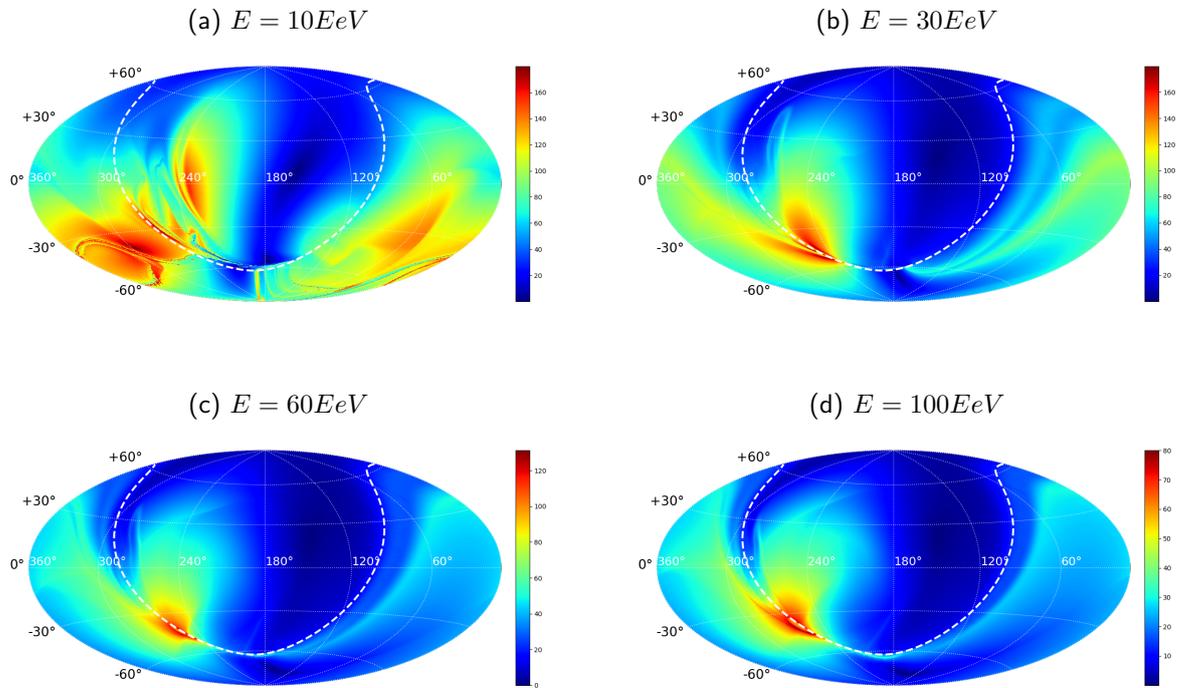
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 16 – Mapas em coordenadas equatoriais utilizando a projeção Hammer para exibir as direções de propagação de partículas dentro da Galáxia com diferentes energias. As partículas foram retropropagadas para a borda da Galáxia utilizando o modelo regular de campo Galáctico JF2012. A linha tracejada representa o plano Galáctico. As partículas foram propagadas considerando uma composição de hélio.



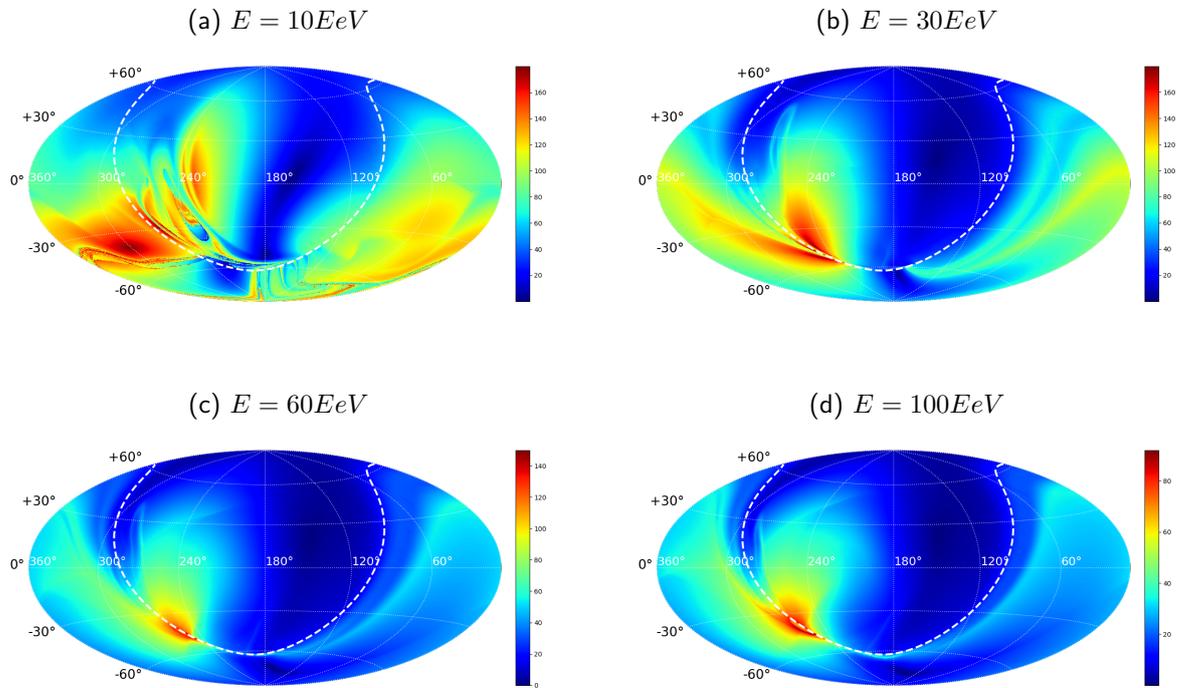
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 17 – Mapas em coordenadas equatoriais utilizando a projeção Hammer para exibir as direções de propagação de partículas dentro da Galáxia com diferentes energias. As partículas foram retropropagadas para a borda da Galáxia utilizando o modelo regular de campo Galáctico JF2012. A linha tracejada representa o plano Galáctico. As partículas foram propagadas considerando uma composição de nitrogênio.



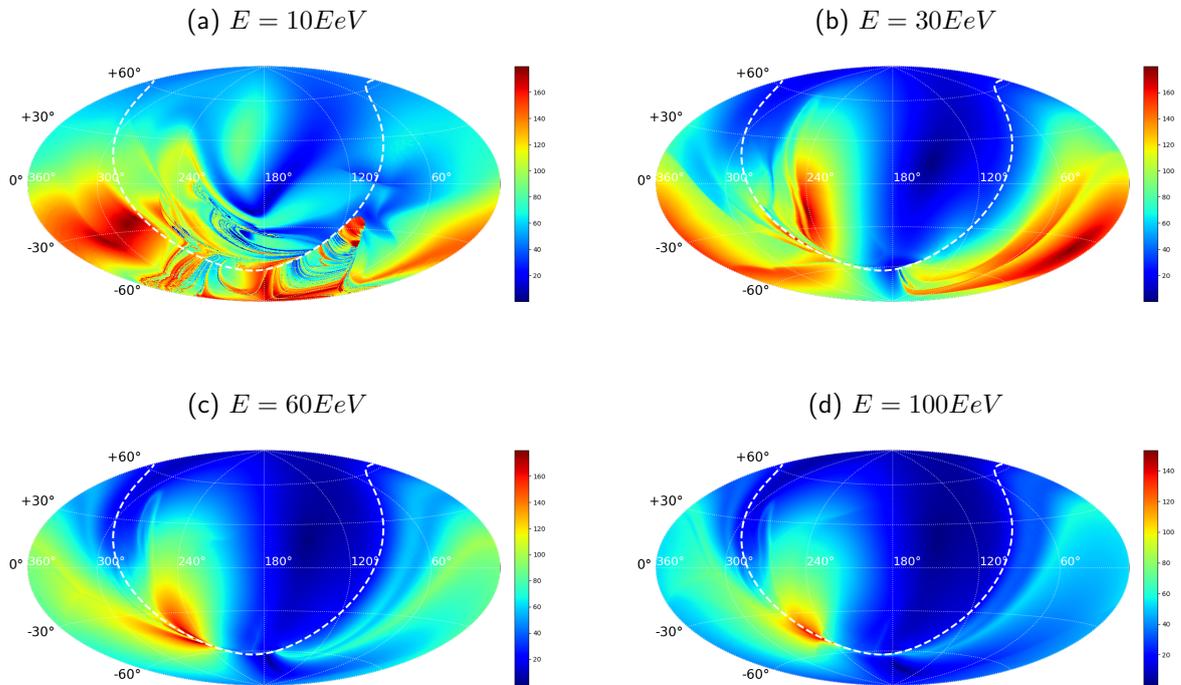
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 18 – Mapas em coordenadas equatoriais utilizando a projeção Hammer para exibir as direções de propagação de partículas dentro da Galáxia com diferentes energias. As partículas foram retropropagadas para a borda da Galáxia utilizando o modelo regular de campo Galáctico JF2012. A linha tracejada representa o plano Galáctico. As partículas foram propagadas considerando uma composição de oxigênio.



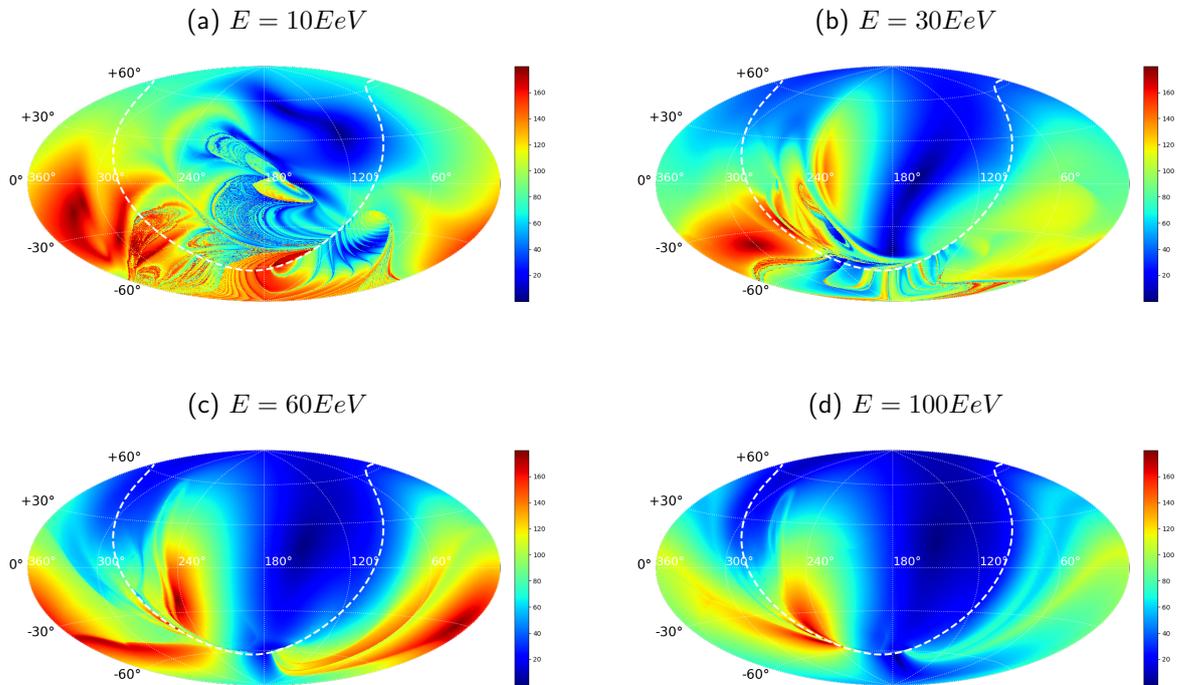
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 19 – Mapas em coordenadas equatoriais utilizando a projeção Hammer para exibir as direções de propagação de partículas dentro da Galáxia com diferentes energias. As partículas foram retropropagadas para a borda da Galáxia utilizando o modelo regular de campo Galáctico JF2012. A linha tracejada representa o plano Galáctico. As partículas foram propagadas considerando uma composição de silício.



Fonte: O autor (2022)

FIGURA 20 – Mapas em coordenadas equatoriais utilizando a projeção Hammer para exibir as direções de propagação de partículas dentro da Galáxia com diferentes energias. As partículas foram retropropagadas para a borda da Galáxia utilizando o modelo regular de campo Galáctico JF2012. A linha tracejada representa o plano Galáctico. As partículas foram propagadas considerando uma composição de ferro.



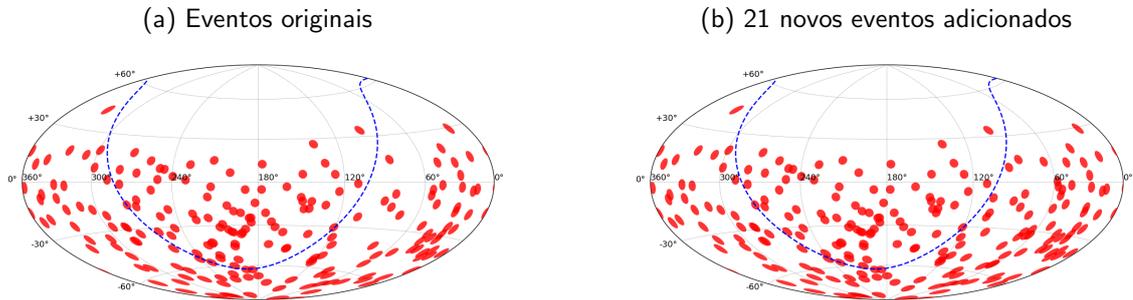
Fonte: O autor (2022)

As Figuras 15 e 16 são considerados núcleos leves, já as Figuras 17 e 18 núcleos intermediários, finalmente 19 e 20 núcleos pesados. Observa-se que conforme a amostra se torna mais pesada há maior deflexão para energias menores, conseqüentemente energias muito altas sofrem pouco desvio. As partículas mais energéticas são mais raras, estamos falando de eventos com energias de 10^{20} EeV, para detectar maior quantidade desses eventos é necessário ampliar o Observatório Pierre Auger, por exemplo.

6.5 NOVOS DADOS DO OBSERVATÓRIO PIERRE AUGER

Fizemos uma nova leitura dos últimos dados divulgados pela colaboração Auger, ampliando os dados de 2008 a 2022, usamos o mesmo parâmetro de energia (>54 EeV). Nesta busca encontramos 21 novos eventos com $E > 54$ EeV, e reproduzimos os cálculos anteriores adicionando os novos eventos. Os resultados estão descritos a seguir. Eles mostram um aumento no poder de detecção da anisotropia dos eventos de altas energias.

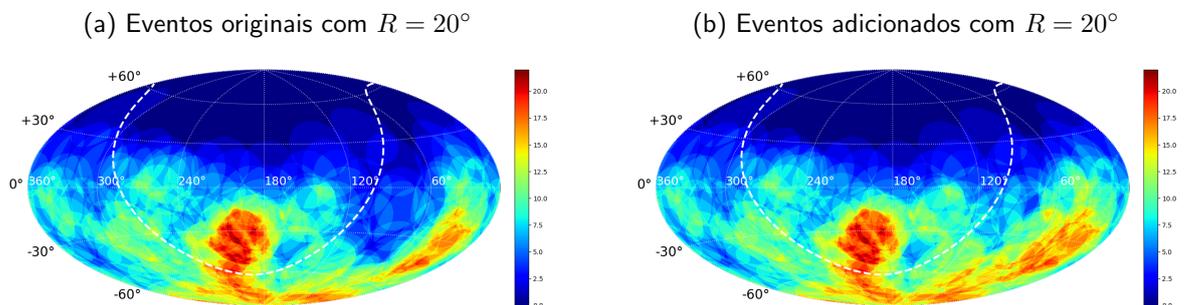
FIGURA 21 – Dados dos Observatórios Pierre Auger, os eventos possuem energia superior a 54 EeV. A linha tracejada representa o plano galáctico.



Fonte: O autor (2022)

Adicionamos um raio de dez, vinte e trinta graus sobre os novos eventos e comparamos com a Figura 2b onde apresentamos os eventos originais.

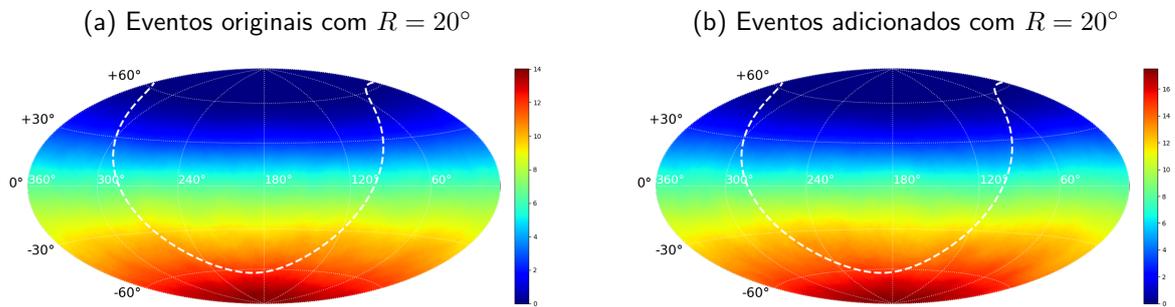
FIGURA 22 – Mesmos eventos detectados pelo Observatório Pierre Auger em (a) 20° conforme ilustrado na Figura 2b. Em (b) foram adicionados 21 novos eventos com o mesmo raio $R = 20^\circ$.



Fonte: O autor (2022)

Observa-se que com o ampliamto dos dados as regiões se tornaram mais intensas, principalmente do lado direito do mapa. A comparação com os outros raios estão disponíveis no apêndice A em Figura 34. Também foi realizado a simulação dos eventos isotrópicos com os 252 eventos detectados, em que as demais comparações pode ser encontradas em Figura 35.

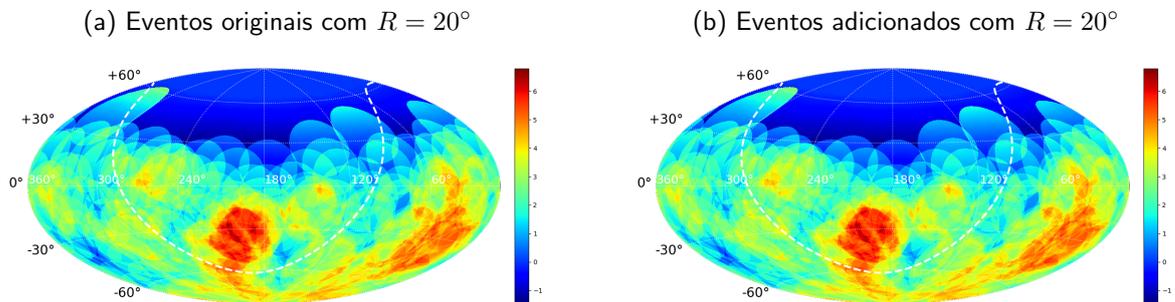
FIGURA 23 – 100.000 eventos MC isotrópicos gerados no campo de visão do experimento Auger, amostrados com $R = 20^\circ$ normalizados para 231 eventos em (a) e em (b) para 252 eventos.



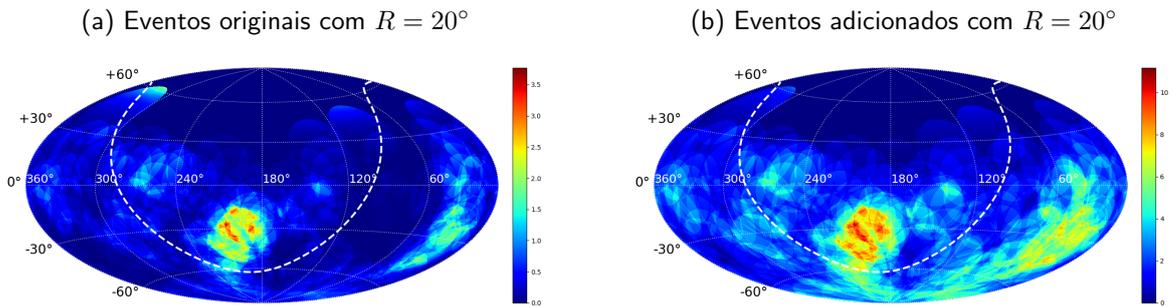
Fonte: O autor (2022)

A seguir, mostramos a análise estatística dos novos dados comparando-os aos eventos originais já mostrados.

FIGURA 24 – Mapa de significância Li-Ma definido na Eq. 1 em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para os dados detectados pelo Observatório Pierre Auger. A linha tracejada representa o plano Galáctico.



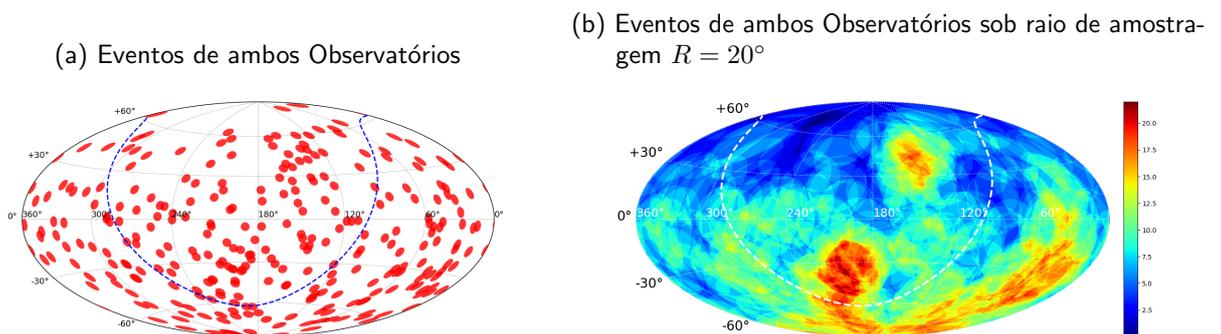
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 25 – Mapa do P_{value} definido na Eq. 3 e Eq. 4

Fonte: O autor (2022)

Em Figura 36 e Figura 37 há as demais comparações com raio de 10° e 30° da significância estatística LiMa e P_{value} respectivamente. Na Figura 26 apresentamos os eventos do TA e Auger com os novos eventos já adicionados.

FIGURA 26 – Ambos os eventos detectados.



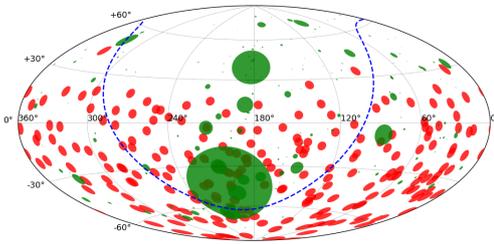
Fonte: O autor (2022)

6.6 FONTES POTENCIAIS PARA OS NOVOS DADOS DO AUGER

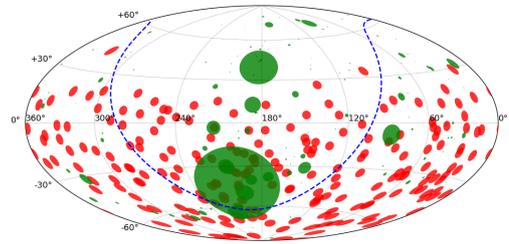
A busca por fontes potenciais para os novos dados coletados pelo Auger foi feita somente com o catálogo Swift BAT 105 (NASA, a). A associação das direções dos eventos com as direções das fontes do Catálogo foi realizada com as seguintes distâncias: 30, 50, 80 e 100 Mpc. Os mapas são mostrados abaixo na Figura

FIGURA 27 – Mapa em coordenadas equatoriais usando a projeção de Hammer para exibir as direções de chegada de eventos UHECR e as posições de objetos do Swift BAT 70 meses em raios-X para os novos dados do Auger. A linha tracejada representa o plano Galáctico.

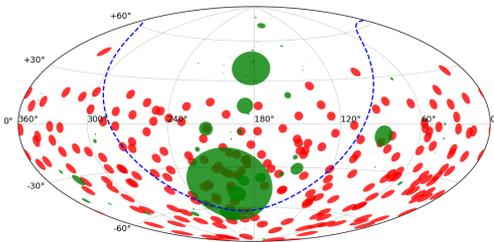
(a) 226 Objetos a 100 Mpc



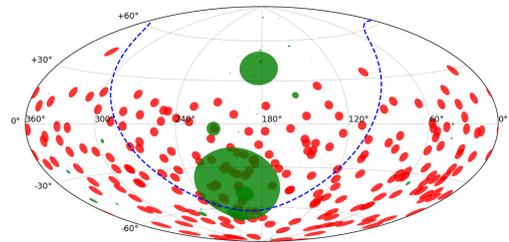
(b) 176 Objetos a 80 Mpc



(c) 79 Objetos a 50 Mpc



(d) 38 Objetos a 30 Mpc



Fonte: O autor (2022)

7 CONCLUSÃO

Foi apresentado preliminarmente o estudo da anisotropia de eventos de altas energias detectados pela Colaboração Auger e Telescope Array, utilizando as estatísticas de Li-Ma e P_{value} e mostrando-se a equivalência entre elas. Observou-se também que as direções dos eventos de altas energias detectados são anisotrópicas. Executamos uma simples correlação entre a direção de chegada dos eventos e a direção no céu de AGNs do catálogo Swift BAT. Realizamos também um estudo do campo magnético com o modelo particular JF2012 e analisamos possíveis trajetórias dessas partículas considerando diferentes energias e composição.

Na segunda seção deste trabalho, ampliamos os dados do Observatório Pierre Auger, integrando 21 novos eventos ao mapa. Refizemos as análises e com isso foi possível observar um aumento significativo de anisotropia nos mapas, validando nossa hipótese de estudo. Como melhoria deste trabalho em novos estudos pretendemos analisar outro catálogo de fontes e também levar em consideração as demais componentes do campo definido pelo JF2012.

REFERÊNCIAS

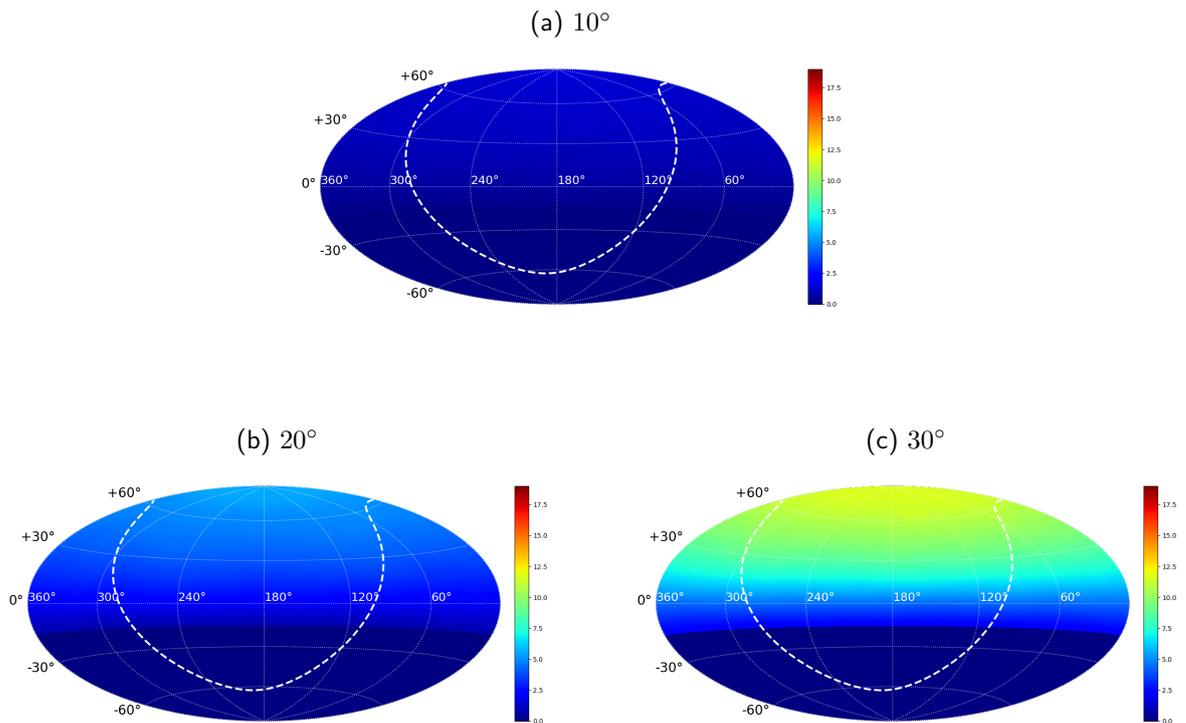
- AAB, A. e. a. Searches for anisotropies in the arrival directions of the highest energy cosmic rays detected by the pierre auger observatory. **The Astrophysical Journal**, v. 804, n. 1, p. 15, 2015. Citado 2 vezes nas páginas e 11.
- AABASI, R. u. e. a. Indications of intermediate-scale anisotropy of cosmic rays with energy greater than 57 eev in the northern sky measured with the surface detector of the telescope array experiment. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 790, n. 2, p. L21, 2014. Citado 2 vezes nas páginas e 11.
- ANJOS, R. C. **Propagação de raios cósmicos extragaláticos**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo., 2014. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- BANDEIRA Y. B; MACKEDANZ, L. F. Mecanismos de limitação da energia de raios cósmicos durante sua propagação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 8, 2019. Citado na página 10.
- BATISTA, R. A. e. a. Open questions in cosmic-ray research at ultrahigh energies. **Frontiers in Astronomy and Space Sciences**, v. 6, n. 13, p. 23, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.
- BATISTA R. A; KEMP, E. **Da deflexão de raios cósmicos ultra-energéticos no campo magnético galáctico**. 120 p. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Instituto de Física "Gleb Wataghin"., Campinas, 2012. Citado na página 12.
- BISTER, T. K. **Investigation of the Correlation between Starburst Galaxies and Arrival Directions of Ultrahigh Energy Cosmic Rays measured at the Pierre Auger Observatory**. Dissertação (Mestrado em Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften) — RWTH Aachen University, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.
- BRAY J.D.; SCAIFE, A. M. M. An upper limit on the strength of the extragalactic magnetic field from ultra-high-energy cosmic-ray anisotropy. **The Astrophysical Journal**, v. 861, n. 16, p. 3, 2018. Citado na página 13.
- BUSTAMANTE, M. C. A descoberta dos raios cósmicos ou o problema da ionização do ar atmosférico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 45, n. 9, 2013. Citado na página 10.
- JANSSON R; FARRAR, G. R. A new model of the galactic magnetic field. **The Astrophysical Journal**, v. 757, n. 11, p. 14, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 28.
- LI T. P; MA, Y. Analysis methods for results in gamma-ray astronomy. **The Astrophysical Journal**, v. 272, n. 3, p. 317–324, 1983. Citado 3 vezes nas páginas , 16 e 17.
- NASA. **Swift BAT 105-Month Hard X-ray Survey**. Citado 2 vezes nas páginas e 39.
- NASA. **Swift BAT 70-Month Hard X-ray Survey**. Citado 2 vezes nas páginas e 25.
- OLIVEIRA, M. A. L. de. Estudo das anisotropias nas direções de chegada dos raios cósmicos de ultra-alta energia. n. 7, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11 e 13.

TABORDA, O. A. P. **Efectos del campo magnético galáctico en las anisotropías a gran escala de los rayos cósmicos de alta energía.** Tese (Doutorado) — Universidad Nacional de Cuyo., 2013. Citado na página 13.

VILLASEÑOR, L. Anisotropy in the arrival directions of ultrahigh-energy cosmic rays. **Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing**, v. 866, n. 10, p. 012014, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

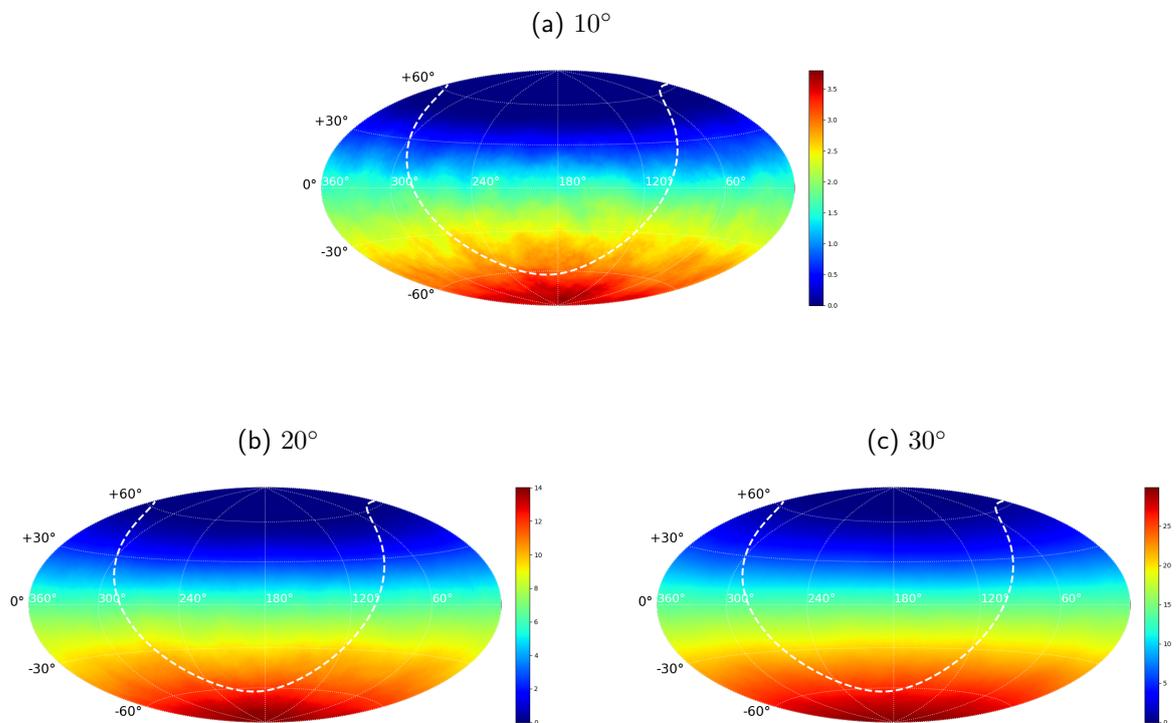
Apêndice A

FIGURA 28 – 100.000 eventos MC isotrópicos gerados no campo de visão do experimento TA, amostrados com $R = 10^\circ$ e 30° , normalizados para 72 eventos. Observam-se regiões mais homogêneas devido ao grande número de eventos gerados isotropicamente.



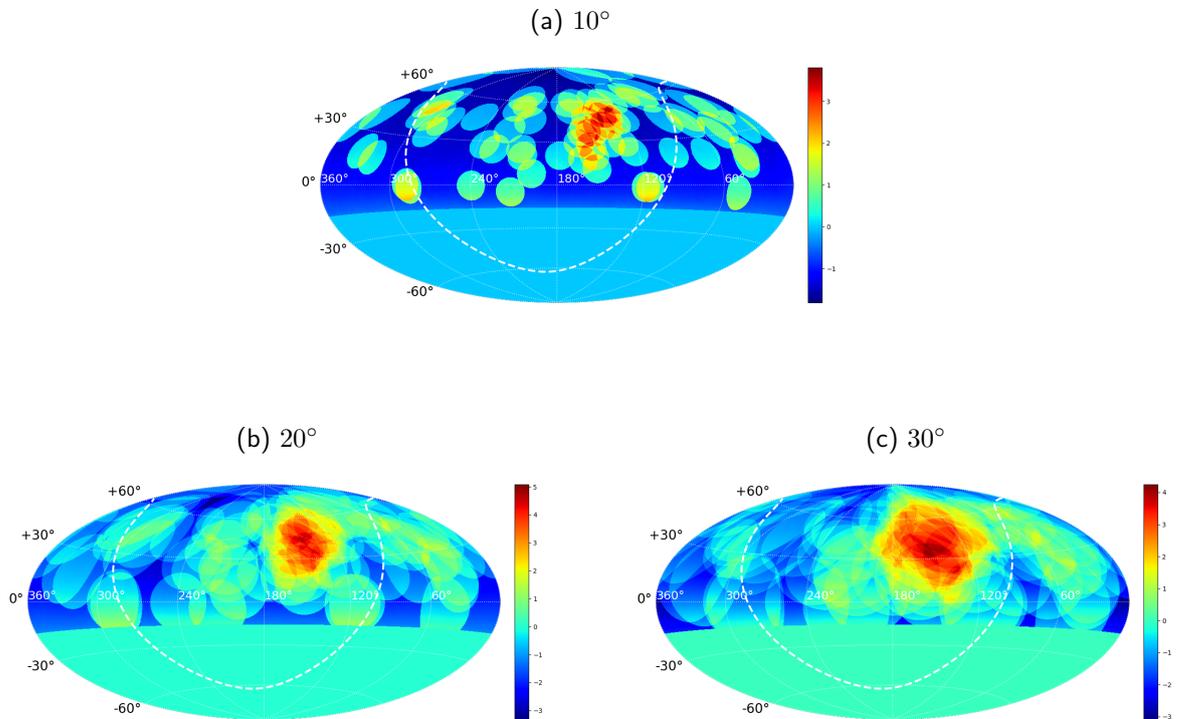
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 29 – 100.000 eventos MC isotrópicos gerados no campo de visão do experimento Auger, amostrados com $R = 10^\circ$, 20° e 30° , normalizados para 231 eventos. Observam-se regiões mais homogêneas devido ao grande número de eventos gerados isotropicamente.

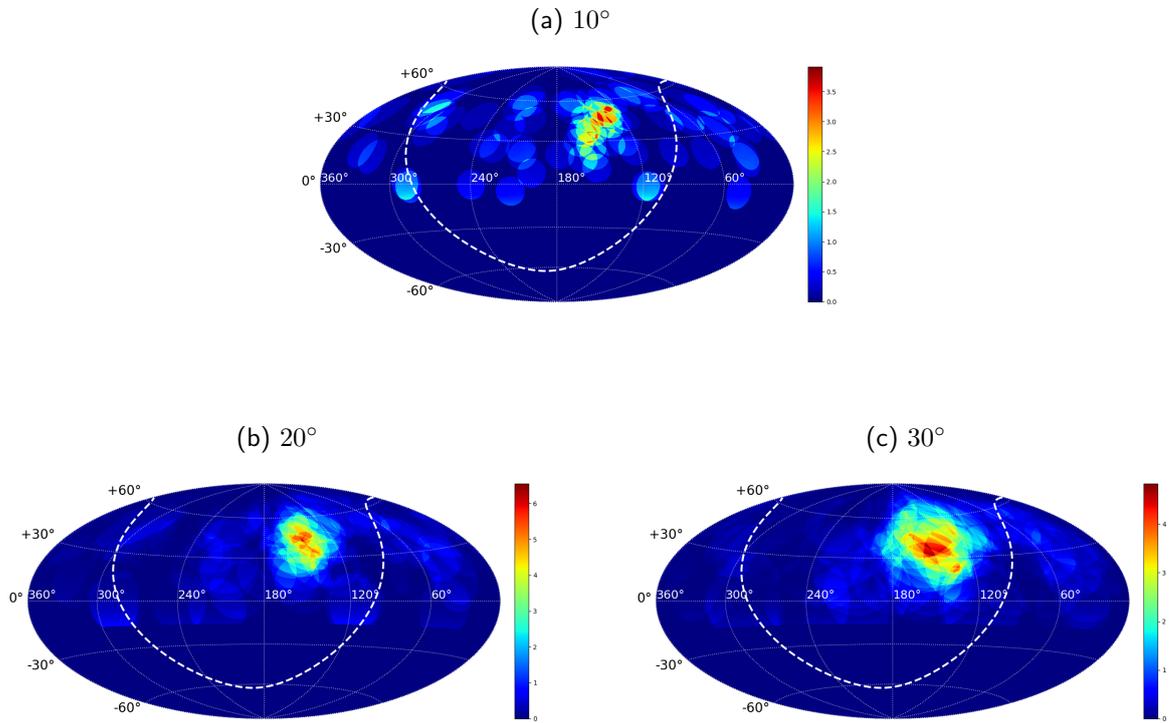


Fonte: O autor (2022)

FIGURA 30 – Mapa de significância Li-Ma definido na Eq. 1 em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para os dados detectados pelo experimento Telescope Array. A linha tracejada representa o plano Galáctico.

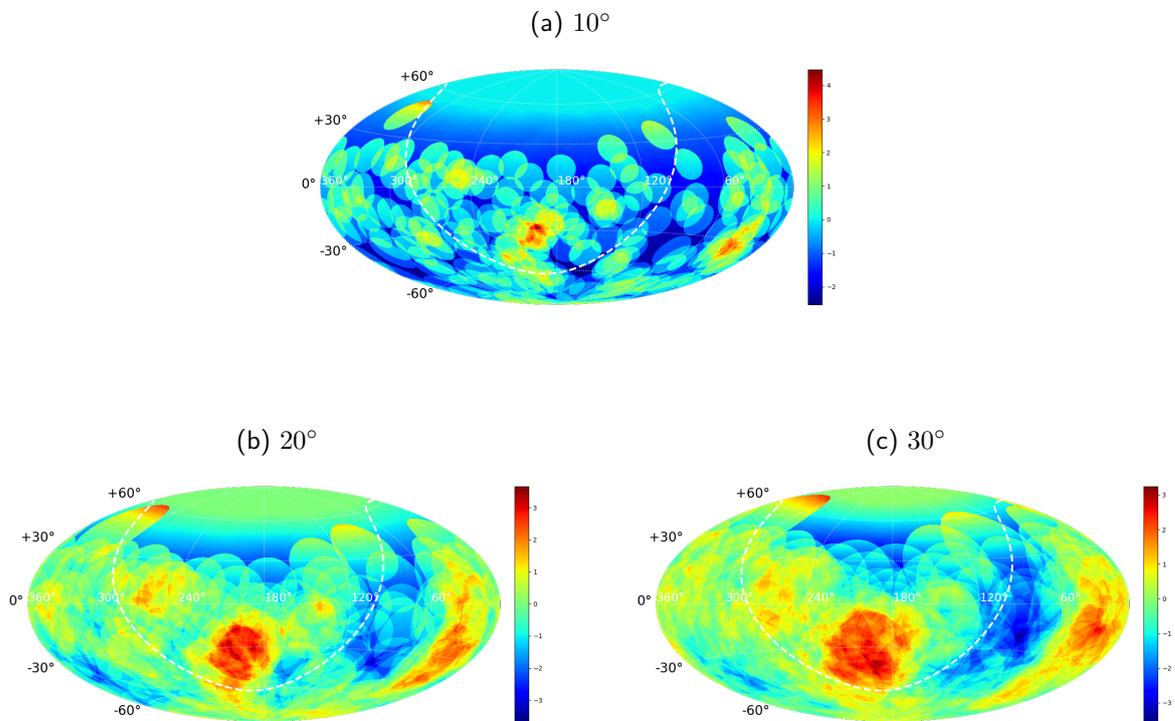


Fonte: O autor (2022)

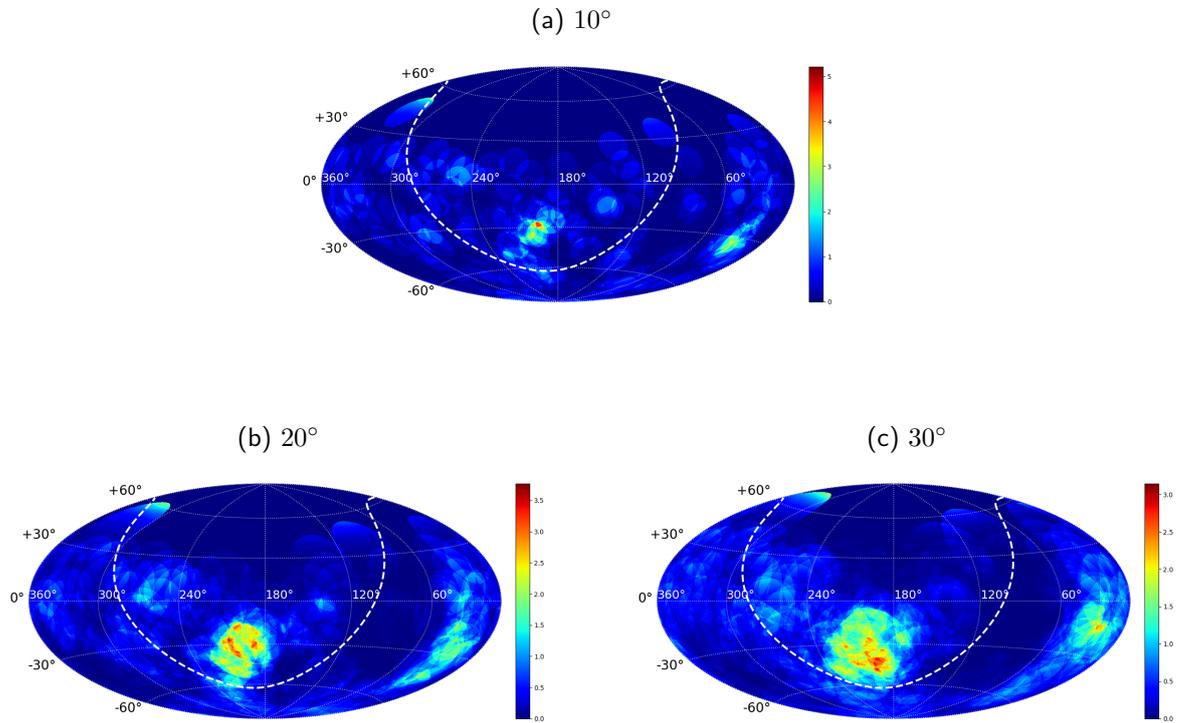
FIGURA 31 – Mapa do P_{value} definido na Eq. 3 e Eq. 4

Fonte: O autor (2022)

FIGURA 32 – Mapa de significância Li-Ma definido na Eq. 1 em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para os dados detectados pelo experimento Observatório Pierre Auger. A linha tracejada representa o plano Galáctico.

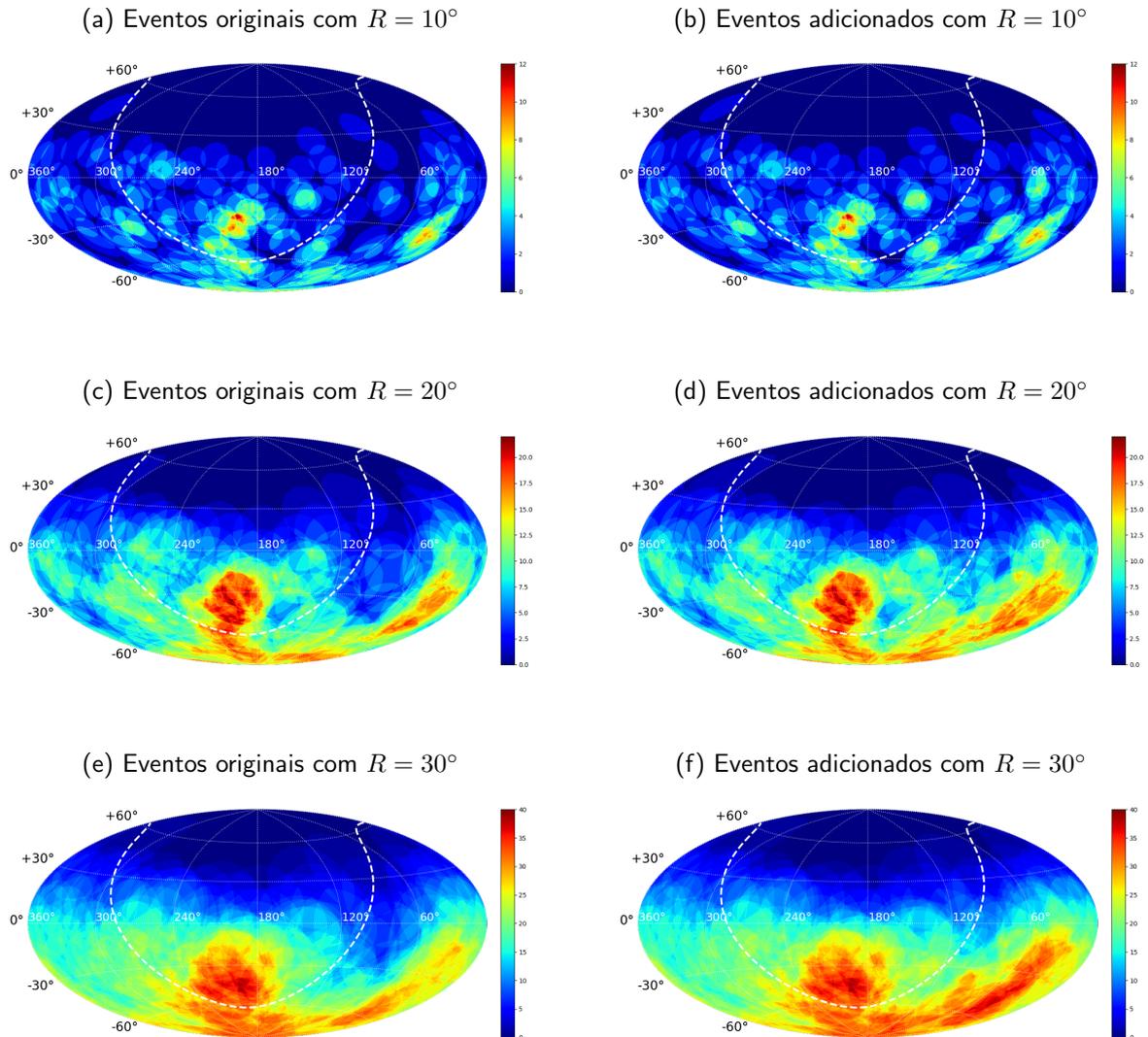


Fonte: O autor (2022)

FIGURA 33 – Mapa do P_{value} definido na Eq. 3 e Eq. 4

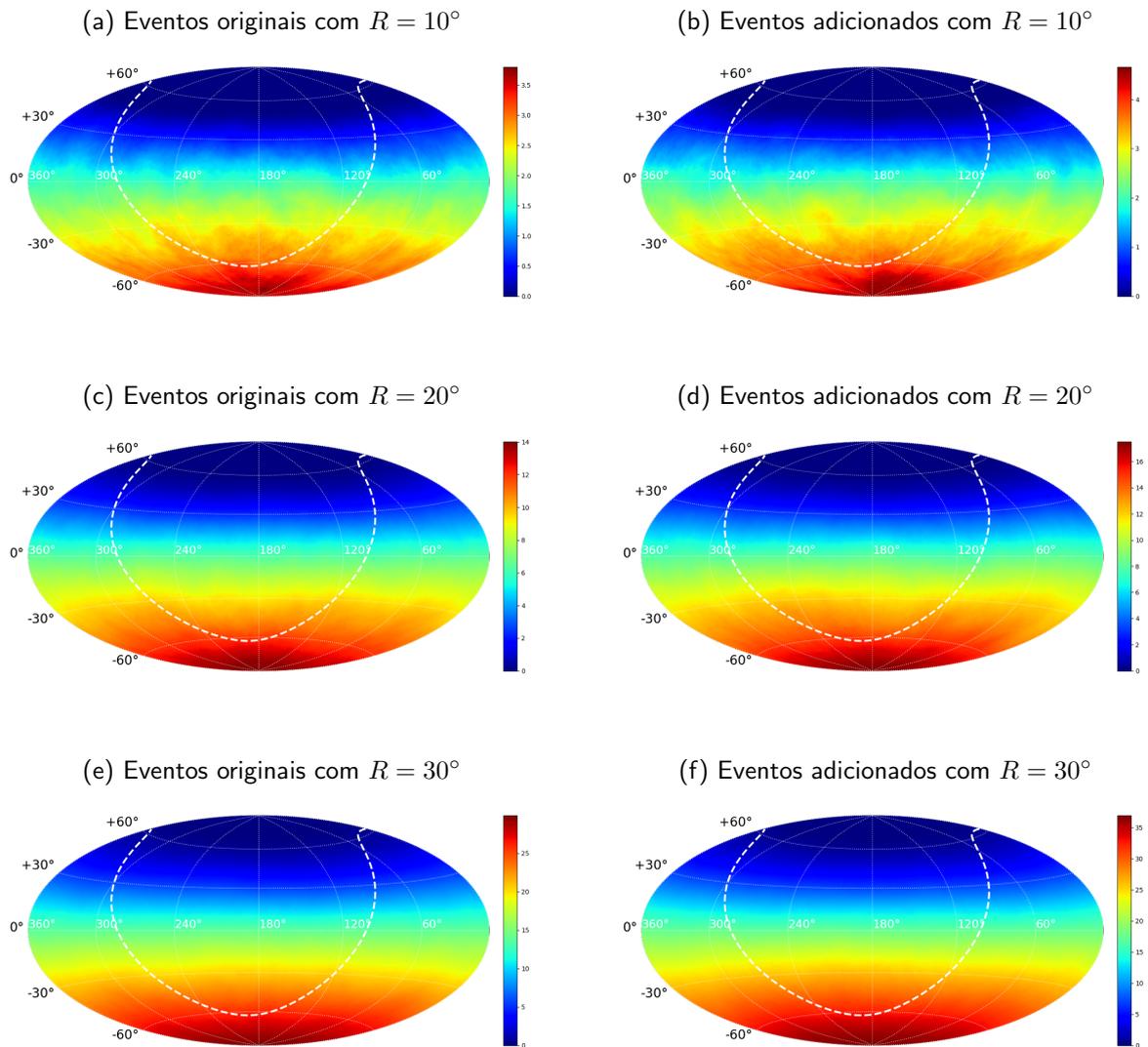
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 34 – Mesmos eventos detectados pelo Observatório Pierre Auger em (a), (c) e (e) sob amostragem com $R = 10^\circ$, 20° e 30° , respectivamente - conforme ilustrado na Figura 2b. Em (b), (d) e (f) foram adicionados 21 novos eventos com raio variando da mesma forma 10° , 20° e 30° .



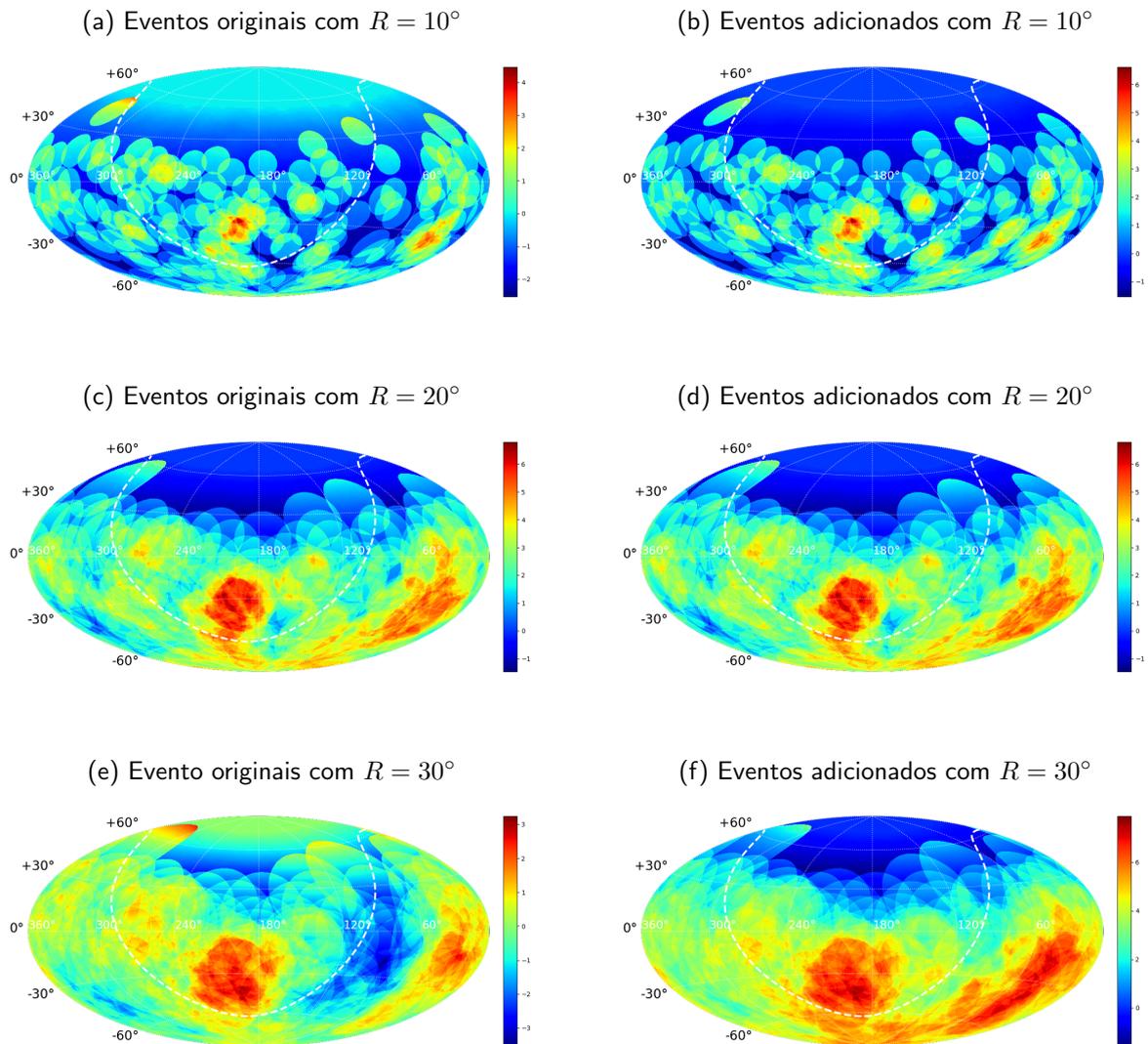
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 35 – 100.000 eventos MC isotrópicos gerados no campo de visão do experimento Auger, amostrados com $R = 10^\circ$, 20° e 30° normalizados para 231 eventos em (a), (c) e (e) e para 252 eventos em (b), (d) e (f).



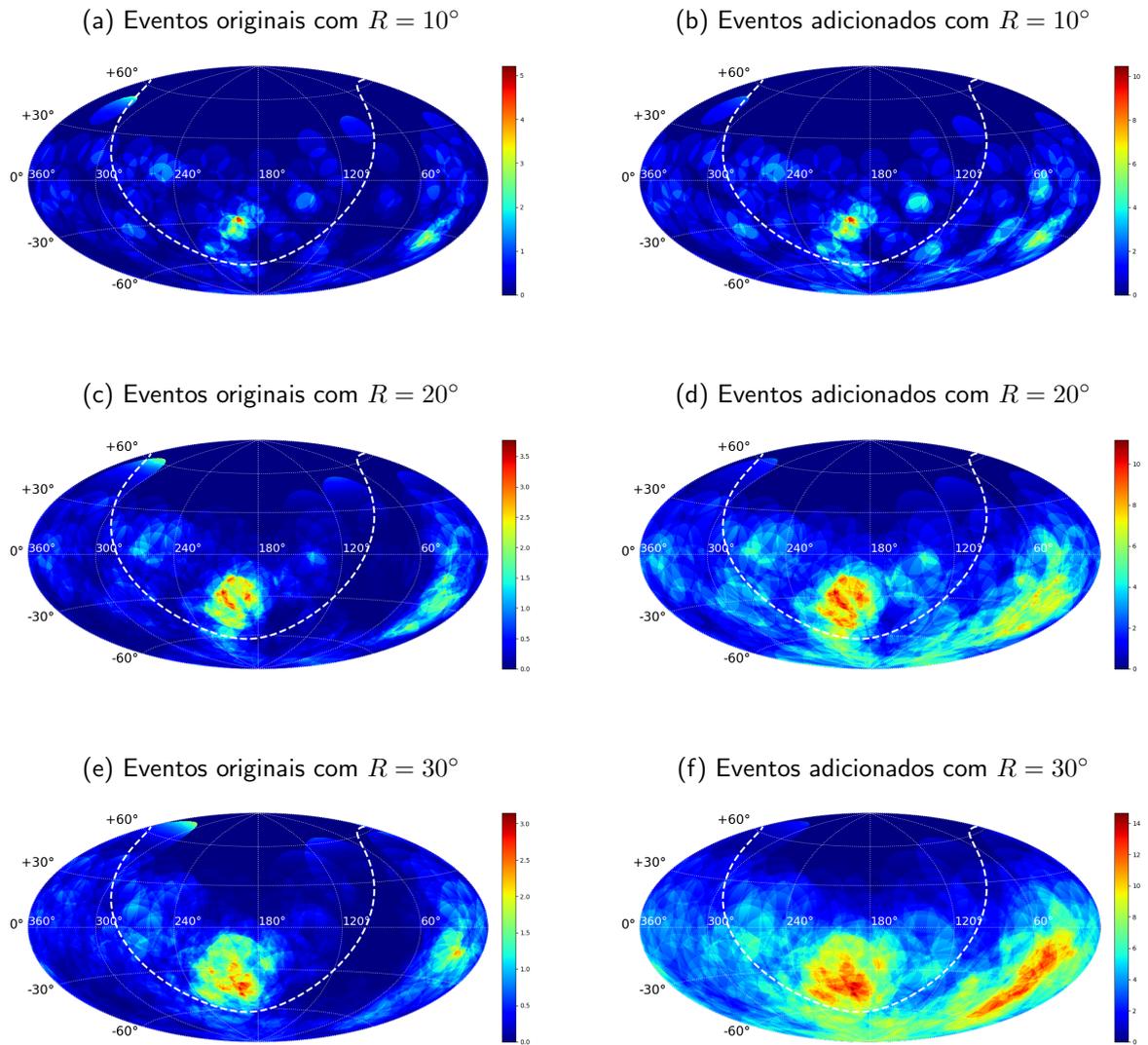
Fonte: O autor (2022)

FIGURA 36 – Mapa de significância Li-Ma definido na Eq. 1 em coordenadas equatoriais usando a projeção Hammer para os dados detectados pelo Observatório Pierre Auger. A linha tracejada representa o plano Galáctico.



Fonte: O autor (2022)

FIGURA 37 – Mapa do P_{value} definido na Eq. 3 e Eq. 4



Fonte: O autor (2022)