



UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA
INSTITUTO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIAS DA VIDA E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA APLICADA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Foz do Iguaçu-Paraná

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA
INSTITUTO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIAS DA VIDA E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA APLICADA

**Estudo de deflexões de UHECR na presença do
campo magnético galáctico JF2012**

Larissa Cristina dos Santos

Orientadora: Prof. Dra. Rita de Cássia dos Anjos

Foz do Iguaçu-Paraná

2023

Estudo de deflexões de UHECR na presença do campo magnético galáctico JF2012

Larissa Cristina dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (PPGFISA-UNILA) como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientadora: Prof. Dra. Rita de Cássia dos Anjos

Banca Examinadora

Prof. Dra. Rita de Cássia dos Anjos (Orientadora)

Prof. Dr. Jaime Souza de Oliveira (Membro Externo)

Prof. Dr. Carlos Henrique Coimbra Araújo (Membro Interno)

Foz do Iguaçu-Paraná

2023

Resumo

Estudo de deflexões de UHECR na presença do campo magnético galáctico JF2012

Larissa Cristina dos Santos

Orientadora: Prof. Dra. Rita de Cássia dos Anjos

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (PPGFISA-UNILA) como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Física.

A produção e aceleração de raios cósmicos de altas energias (*Ultra-high energy cosmic rays* - UHECR) no Universo continua sendo um dos grandes mistérios da ciência moderna. Os mecanismos de aceleração de partículas altamente energéticas em fontes astrofísicas são ainda desconhecidos. O principal objetivo deste estudo foi explorar a distribuição de emissão e chegada de UHECR originadas de radiogaláxias. Utilizou-se como possíveis fontes as galáxias Centaurus A, Fornax A e M87 devido a sua correlação com a direção de chegada de eventos medidos do Observatório Pierre Auger. Explorou-se as potencialidades de detecção dessas partículas considerando o efeito do modelo do campo magnético galáctico Jansson-Farrar 2012 (JF2012). O estudo da influência do campo magnético auxilia na compreensão da geração e propagação dos UHECR. Para o estudo, foi utilizado o programa computacional *Cosmic Ray Transport* (CRT), o programa não considera perdas de energia, mas foi utilizado para a quantificação dos desvios das partículas a partir dos seguintes parâmetros: rigidez, distância da fonte à Terra, direção da fonte no céu e carga/massa da partícula a ser propagada. Os resultados obtidos quantificam o efeito do campo magnético galáctico nas diferentes direções das radiogaláxias e indicam que o campo galáctico deve ser considerado a partir de energias próximas a 16 EeV.

Foz do Iguaçu-Paraná

2023

Abstract

Study of UHECR deflections in the presence of the galactic magnetic field JF2012

Larissa Cristina dos Santos

Orientadora: Prof. Dra. Rita de Cássia dos Anjos

Abstract da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (PPGFISA-UNILA) como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Física.

The production and acceleration of high-energy cosmic rays (*Ultra-high energy cosmic rays* - UHECR) in the Universe remains one of the great mysteries of modern science. The mechanisms of acceleration of highly energetic particles in astrophysical sources are still unknown. The main objective of this study was to explore the distribution of UHECR emission and arrival originating from radio galaxies. The galaxies Centaurus A, Fornax A and M87 were used as possible sources due to their correlation with the direction of arrival of events measured at the Pierre Auger Observatory. The detection potential of these particles was explored considering the effect of the Jansson-Farrar 2012 (JF2012) galactic magnetic field model. The study of the influence of the magnetic field helps to understand the generation and propagation of UHECR. For the study, the computational program *Cosmic Ray Transport* (CRT) was used, the program does not consider energy losses, but was used to quantify particle deviations based on the following parameters: stiffness, distance from the source to Earth, direction of the source in the sky and charge/mass of the particle to be propagated. The results obtained quantify the effect of the galactic magnetic field in the different directions of radio galaxies and indicate that the galactic field must be considered from energies close to 16 EeV.

Foz do Iguaçu-Paraná

2023

“À Ciência e à Educação!”

“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o misterioso passará pela vida sem ver nada.”

Albert Einstein

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida!

A meus pais, Irene e Antônio, pelo apoio e incentivo aos meus estudos.

Agradeço à minha orientadora Prof. Dra. Rita de Cássia dos Anjos por acreditar no meu potencial e me proporcionar oportunidades de adquirir e compartilhar conhecimento, vejo-a como uma pessoa inspiradora.

A todos os professores que fizeram parte dessa minha trajetória, pelos ensinamentos, com certeza contribuíram para minha formação.

A todos meus amigos e colegas de pesquisa que me auxiliaram e me apoiaram nessa etapa.

Ao PPGFISA por todas as oportunidades.

À UNILA, pelo apoio financeiro.

Lista de Figuras

1.1	Espectro de energia de Raios C3smicos. Fonte: Retirado de [13].	13
1.2	Detector de Superf3cie. Fonte: Retirado de [15]	14
1.3	Detector de Fluoresc3ncia. Fonte: Retirado de [15]	15
1.4	Diagrama de Hillas. Fonte: Retirado de [19].	18
2.1	Mapa do fluxo de raios c3smicos com energia acima de 40 EeV com <i>top-hat smoothing</i> raio de $\Psi = 25^\circ$ em coordenadas gal3cticas. Fonte: Retirado de [25].	20
2.2	Centaurus A. Fonte: Retirado de [26,27]	22
2.3	<i>Skymap</i> em coordenadas gal3cticas da signific3ncia estat3stica de Li-Ma <i>overdensities</i> em 20° de raio com 840 eventos registrados por Auger com $E > E_{\text{Auger}}$ e 130 eventos registrados por TA com $E > E_{\text{TA}}$. A escala de cores indica a signific3ncia em unidades de desvio padr3o. Fonte: Retirado de [28].	23
2.4	Fornax A [31]	25
2.5	Messier 87 [32]	26
2.6	Buraco negro supermassivo M87 [32]	27
3.1	Medidas da polariza3o da luz em coordenadas gal3cticas. As linhas representam a dire3o da polariza3o, onde as estrelas se encontram no centro de cada linha, o comprimento das linhas indicam a porcentagem da polariza3o. Fonte: Retirado de [37]	30
3.2	Representa3o de uma onda eletromagn3tica polarizada em contato com um campo magn3tico. Fonte: Retirado de [23].	32
3.3	Representa3o da intensidade e das dire3o dos campos magn3ticos BSS e ASS, no disco Gal3ctico. O ponto em azul representa a localiza3o do Sol. Fonte: Retirado de [23].	33

3.4	A seta vermelha representa a geometria poloidal e a seta azul, a toroidal. Fonte: Retirado de [23].	35
3.5	Uma fatia xz da galáxia mostrando apenas o componente fora do plano. Este componente também é chamado de componente de campo em forma de X. Fonte: Retirado de [23].	35
4.1	Deflexões de UHECR provenientes das regiões das radiogaláxias, na presença do campo regular (JF2012-reg), (a) Centaurus A, (b) Fornax A e (c) Messier 87, no eixo x há a energia na unidade de (EeV), no eixo y, o ângulo de deflexão dado em (graus), as distribuições acima e ao lado direito do plot representam a região onde se concentra o maior número de partículas. Fonte: Autor.	41
4.2	Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores, a estrela preta representa a posição do centro de Cen A. Fonte: Autor.	42
4.3	Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores, a estrela preta representa a posição do centro de Fornax A. Fonte: Autor.	44
4.4	Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores, a estrela preta representa a posição do centro de M87. Fonte: Autor.	45
4.5	Projeção x-y das posições finais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores, a estrela preta representa a posição do centro de Cent A. Fonte: Autor.	46
4.6	Projeção x-y das posições finais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores, a estrela preta representa a posição do centro de Fornax A. Fonte: Autor.	47
4.7	Projeção x-y das posições finais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores, a estrela preta representa a posição do centro de Fornax A. Fonte: Autor.	48

4.8	Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados com rigidez de 32 EV e com as três componentes do modelo de campo magnético Galáctico JF2012 (a) e rigidez de 16 EV com duas componentes do GMF JF2012 (b). Ambos utilizando um detector de 0.4 kpc. A estrela preta representa a posição do centro de Cen A. Fonte: Autor.	50
4.9	Projeção x-y das posições finais dos eventos simulados com rigidez de 32 EV e com as três componentes do modelo de campo magnético Galáctico JF2012 (a) e rigidez de 16 EV com duas componentes do GMF JF2012 (b). Ambos utilizando um detector de 0.4 kpc. A estrela preta representa a posição do centro de Cen A. Fonte: Autor.	51
4.10	Direções observadas dos eventos detectados em coordenadas Galácticas utilizando o modelo de campo JF2012, para rigidez de 32 EV e 16 EV, para as três radiogaláxias. Fonte: Autor.	52
4.11	Posições finais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos de 100 EV, 64 EV e 32 EV, as estrelas pretas representam as radiogaláxias, os pontos as posições das partículas detectadas com suas respectivas energias. Fonte: Autor.	53
4.12	Posições finais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos de 16 EV, 10 EV e 4 EV, as estrelas pretas representam as radiogaláxias, os pontos as posições das partículas detectadas com suas respectivas energias. Fonte: Autor.	54
4.13	Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $40 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor.	55
4.14	Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $40 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor.	55
4.15	Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 8 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $40 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor.	56
4.16	Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $70 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor.	57

- 4.17 Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $70 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor. 57
- 4.18 Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 8 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $70 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor. 58
- 4.19 Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $100 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor. 58
- 4.20 Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $100 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor. 59
- 4.21 Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 8 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $100 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor. 59
- 4.22 Posições finais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos que entraram na Galáxia na posição das radiogaláxias, considerando um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $40 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Retirado de [28]. 60

Lista de Tabelas

2.1	Índices espectrais de fontes próximas selecionadas: γ maximiza a probabilidade e $[\gamma_l, \gamma_r]$ indica uma confiança de 68 % intervalo do índice espectral. Retirado do [28].	24
2.2	Fluxos de raios γ para as três fontes. Retirado de [29].	24

Lista de Nomenclaturas

AGNs Núcleos Ativos de Galáxias

ASS Espiral axissimétrica

BSS Espiral bissimétrica

CMB Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas

CRT Transporte de Raios Cósmicos

EHT Telescópio do Horizonte de Eventos

GMF Campo Magnético Galáctico

GZK Greisen-Zatsepin-Kuz'min

JF2012 Jansson Farrar 2012

NGC Novo Catálogo Geral de Nebulosas e Aglomerados

RM Medida de Rotação

RMCF Radiação Microcósmica de Fundo

TA Telescópio Array

UHECR Raios Cósmicos de Energia Ultra-Alta

WMAP7 Sonda de anisotropia de microondas Wilkinson 7

Sumário

Lista de Nomenclaturas	xi
Introdução	9
1 Raios Cósmicos de energia ultra-alta (UHECR)	12
1.1 Espectro de Energia	12
1.1.1 Observatório Pierre Auger	14
1.2 Composição	16
1.3 Anisotropia	16
1.4 Diagrama de Hillas	17
2 Fontes de UHECR	19
2.1 Radiogaláxias	19
2.1.1 Centaurus A	19
2.1.2 Fornax A	25
2.1.3 Messier 87	26
3 Campo Magnético Galáctico	29
3.1 A origem do Campo Magnético Galáctico	29
3.1.1 Polarização da Luz Estelar	30
3.1.2 Emissão Síncrotron	30
3.1.3 Rotação de Faraday	31
3.1.4 Efeito Zeeman	31
3.2 Os modelos de GMF	32
3.3 Modelo de Campo Magnético Galáctico JF2012	33
3.3.1 Campo Regular Only	34

3.3.2	Campo Regular + Estriado	36
3.3.3	Campo Randômico	37
4	Simulações de UHECR	39
4.1	UHECR de Radiogaláxias	39
4.1.1	Posições Iniciais dos UHECR na região das fontes	41
4.1.2	Posições Finais dos UHECR	45
4.1.3	JF2012 - Completo	49
4.1.4	Campo Randômico em Coordenadas Galácticas	51
4.2	Deflexões em <i>Skymaps</i>	52
4.3	Análises gerais de Deflexões de UHECR	54
	Considerações Finais	61

Introdução

O estudo de raios cósmicos iniciou-se em 1900, aproximadamente, e seu marco deu-se em 1912, com o físico Austríaco Victor Hess. Hess realizou um experimento medindo a radiação ionizante em grande altitude com um aparelho conhecido como eletroscópio. Essa foi a primeira evidência que a ionização atmosférica era de origem extraterrestre [1].

Com os avanços dos estudos foi possível detectar os primeiros *Raios Cósmicos de Energia Ultra-Alta* (UHECR), em um experimento chamado Volcano Ranch criado por John Linsley, em 1962 [2]. Desde então, vários observatórios foram criados para a detecção de partículas energéticas.

Com o espectro de energia de raios cósmicos, [3] é possível obter várias informações importantes sobre essas partículas altamente energéticas que são aceleradas e percorrem todo o universo praticamente na velocidade da luz, denominadas UHECR (Raios Cósmicos de energia ultra-alta), as quais atingem constantemente a Terra. As ordens de grandeza dessas partículas no espectro de energia variam de GeV a EeV: os raios cósmicos de mais baixa energia, na faixa de GeV são provenientes de fontes Galácticas, como supernovas, já os UHECR ainda não possuem fontes totalmente definidas, mas, através de estudos já realizados [3] é possível analisar as prováveis fontes dessas partículas.

Neste estudo, investigou-se as radiogaláxias, incluindo Centaurus A, Fornax A e M87, como possíveis fontes de UHECR [4,5]. Essas três galáxias foram escolhidas devido à extensa pesquisa em andamento sobre elas, como detalhado no capítulo 3. Essa escolha baseia-se em dados experimentais obtidos pelo Observatório Pierre Auger, localizado na Argentina, como explicado em detalhes no Capítulo 1. Esses dados consistem, essencialmente, em medições da direção de partículas altamente energéticas detectadas e provenientes das regiões dessas potenciais fontes.

Com base nas análises realizadas pelo Observatório Pierre Auger, presume-se que partículas

na faixa de EeV têm origem extragaláctica [7]. Portanto, neste estudo, buscou-se descrever a relação entre essas partículas, provenientes dessas possíveis fontes, e o campo magnético Galáctico mais atual, conhecido como modelo Jansson-Farrar, conforme detalhado no Capítulo 2. Esse modelo inclui três componentes de campo magnético: o primeiro é denominado "Apenas Regular", o segundo é "Regular + Estriado" e o terceiro é "Randômico" [8].

O objetivo deste estudo foi elucidar a trajetória das partículas cósmicas de altíssima energia (UHECR) à medida que atravessam a nossa Via Láctea e como o campo magnético Galáctico interfere na propagação dessas partículas. Além disso, examinou-se como essas partículas são distribuídas ao sair de suas fontes e ao serem detectadas na Terra. Realizaram-se análises sobre a deflexão dessas partículas foram investigadas áreas especialmente influenciadas próximas às fontes, variando a rigidez (a relação entre a energia e a carga ($R = E/Z$)) das partículas carregadas.

Para as simulações realizadas, utilizou-se um programa de código aberto denominado CRT (*Cosmic-Ray Transport*) [9], que fornece informações sobre a trajetória dessas partículas dentro da nossa Galáxia. O programa não considera a perda de energia e outros processos que ocorrem durante a propagação dentro e fora da Galáxia. Portanto, nas simulações deste estudo, posicionou-se as fontes na periferia da Via Láctea. Dentro do programa, ajustaram-se diversos parâmetros para realizar as simulações, como o número de eventos, o espectro na fonte (rigidez e índice espectral), as coordenadas de longitude e latitude das fontes em graus, bem como a massa e a carga das partículas. Como resultado, obtiveram-se dados sobre a trajetória das partículas, sua posição inicial e final, expressas em quiloparsec (kpc) e em coordenadas Galácticas.

Ao final do estudo, analisaram-se diversas distribuições de saída e chegada das partículas, destacando o efeito das diferentes partes do modelo do campo magnético usado, para as três radiogaláxias investigadas. Também observou-se que o efeito do campo magnético torna-se mais pronunciado a partir de uma energia da ordem de 16 EeV. É importante ressaltar que os resultados obtidos são consistentes com a literatura, sugerindo que as radiogaláxias analisadas neste estudo podem ser fontes geradoras de partículas de altíssima energia.

O trabalho foi organizado em quatro capítulos distintos: no Capítulo 1, aborda-se o panorama atual da física de raios cósmicos de altíssima energia. No Capítulo 2, discutiu-se as possíveis fontes de raios cósmicos, com um foco particular nas radiogaláxias. No Capítulo 3, apresenta-se detalhadamente o modelo de campo magnético galáctico Jansson-Farrar. Por fim, no Capítulo 4, são descritas as simulações conduzidas utilizando o programa CRT, sendo discutidos, com

detalhes, os resultados obtidos. Ao final, apresentam-se as considerações finais e sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 1

Raios Cósmicos de energia ultra-alta (UHECR)

Nos estudos da propagação dos raios cósmicos de energia ultra-alta (UHECR) pelo universo, são considerados todos os mecanismos existentes durante a trajetória dessas partículas [10]. Ao começar pelas possíveis fontes desses raios, até sua chegada a atmosfera, formando um chuveiro energético, enfim, a detecção dessas partículas através dos observatórios. Dessa forma, neste capítulo aborda-se, o estudo da formação do chuveiro de raios cósmicos e sua relação com as ordens de grandezas de energia presentes no espectro de energia dos raios cósmicos e a chegada dessas partículas à Terra, mostrando os mecanismos utilizados pelo Observatório Pierre Auger para detecção desses raios.

1.1 Espectro de Energia

Embora sua origem exata ainda seja desconhecida, os raios cósmicos são partículas aceleradas que se propagam por todo universo, a sua composição vai desde prótons até núcleos mais pesados, acredita-se que essas partículas são provenientes de galáxias. O espectro de energia de raios cósmicos permite analisar o fluxo de partículas por energia e é representado através de uma lei de potência [5], conforme a expressão:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha} \quad (1.1)$$

A figura 1.1 ilustra o espectro de energia de Raios C3smicos. As faixas de energia do espectro variam, v3o desde eV a EeV, as part3culas na ordem de eV ficam distribu3das na regi3o conhecida como joelho 3 onde se concentram as part3culas de n3cleos mais pesados como o ferro, que ficam confinadas na borda da gal3xia, isso 3 explicado pelo modelo gal3ctico *Leaky Box* e sua rela33o com o *Raio de Larmor* [11, 12].

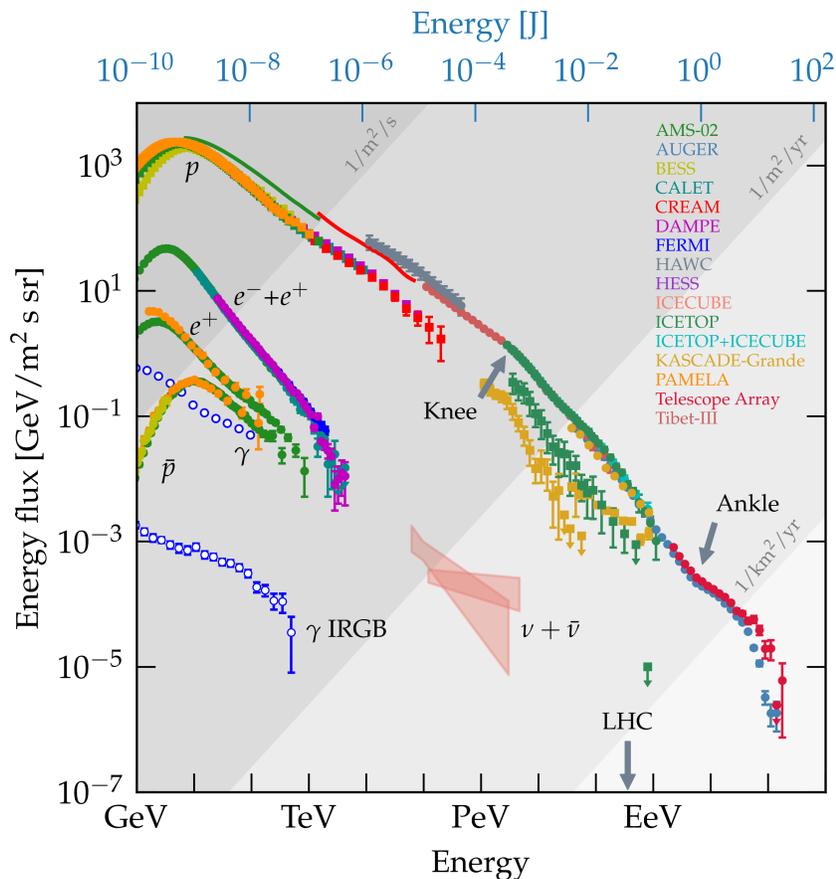


Figura 1.1: Espectro de energia de Raios C3smicos. Fonte: Retirado de [13].

A lei de pot3ncia 3 expressa pela energia total elevada a $-\alpha$, onde α representa o 3ndice espectral e 3 atrav3s dele que se observa a distribu33o do fluxo das part3culas no espectro. As part3culas de ultra alta energia ou seja na faixa de $10^{18}eV$ (EeV) ficam localizadas na regi3o conhecida como "tornozelo" e s3o determinadas pelo mecanismo de corte GZK (Greisen-Zatsepin-Kuz'min.) [14], embora existam d3vidas a respeito dessa faixa de energia, devido ao fato de haver interfer3ncia da radia33o micro c3smica de fundo (RMCF) [5].

1.1.1 Observatório Pierre Auger

Para o estudo dos UHECR utilizam-se os dados do observatório Pierre Auger, localizado em uma região conhecida como Pampa Amarilla, na Argentina. Esse observatório é um dos maiores e mais antigos na detecção de partículas altamente energéticas, a sua área de detecção fica concentrada em Mendoza, na Argentina. No processo de detecção, o observatório utiliza dois métodos independentes, o primeiro é através de detectores de superfície, o segundo é através de detectores de fluorescência [6].

O detector de superfície possui 1660 tanques compostos por água, cada um com aproximadamente 12 mil litros de água, as partículas viajam com velocidade maior que a da luz na água, quando essas partículas chegam ao detector é gerada a luz Cherenkov que ocorre devido às ondas de choque eletromagnéticas. A luz Cherenkov é medida através de tubos fotomultiplicadores que consiste em dispositivos para detectar fótons, onde relaciona o efeito fotoelétrico com emissão secundária, que converte luz em pulso elétrico, com isso é determinada a energia das partículas, a figura 2.1 ilustra o tanque de detectores de superfície.



Figura 1.2: Detector de Superfície. Fonte: Retirado de [15]

O segundo método é o detector de fluorescência, dentro do observatório existem 27 telescópios de fluorescência, esse processo ocorre através de um chuveiro de ar de partículas carregadas entrando em contato com hidrogênio na atmosfera, gerando a luz ultravioleta. A fluorescência

pode ser observada através de detectores de óptica presentes nos telescópios. Esses detectores captam a fluorescência de Nitrogênio e medem o brilho da luz emitida, para isso são utilizados espelhos de foco. A fluorescência é invisível a olho nu, entretanto, os detectores são sensíveis e podem observar um chuva de ar a quilômetros de distância.



Figura 1.3: Detector de Fluorescência. Fonte: Retirado de [15]

Com a junção desses dois métodos é possível obter informações precisas sobre os raios cósmicos primários. A análise de ambos os detectores ajudam os pesquisadores a compor dois grupos de dados para reproduzir os resultados da energia dos raios cósmicos com maior precisão. Os detectores de superfície apresentam dados de uma porcentagem pequena de energia de um chuva de ar comparado com os detectores de fluorescência que, ao contrário, detectam a energia total nesse processo e que pode ser comparada à energia de raios cósmicos primários. Essa junção permite aos cientistas uma investigação mais exata dos resultados obtidos até então. Ambos os métodos têm características diferentes, o detector de superfície opera independente das relações climáticas e fenômenos atmosféricos, enquanto os detectores de fluorescência dependem de noites sem lua e claras para funcionar.

1.2 Composição

O universo em sua imensidão é também constituído por partículas bariônicas, pertencentes à família dos bárions, com por exemplo os prótons e os nêutrons. A composição dos raios cósmicos variam, indo de núcleos considerados mais “leves”, até núcleos mais “pesados”, como exemplo, há os elementos que são utilizados nas simulações deste estudo, como: p^+ , He, Ni, Si e Fe.

Essas partículas interagem com outros núcleos durante sua propagação, o que gera o decaimento, transformando partículas primárias, que são aquelas provenientes das fontes, em partículas secundárias [16].

Com a chegada dessas partículas na atmosfera terrestre ocorre a formação dos chuueiros atmosféricos, que são detectados através dos observatórios, onde o fluxo por energia dessas partículas presentes nos chuueiros, trazem informações sobre a composição desses UHECR.

Há indícios que os raios cósmicos primários, em sua maioria, são elementos de núcleos pesados, porém há uma dificuldade em se detectar essas partículas aqui na Terra, devido a vários fatores, um deles é a influência do campo magnético galáctico, pois esses raios cósmicos apresentam um ângulo de deflexão bem maior comparado com núcleos considerados mais leves.

1.3 Anisotropia

A anisotropia diz respeito ao comportamento dos raios cósmicos ultra energéticos em determinadas direções, assim como suas características. Sabe-se que a distribuição angular dessas partículas é isotrópica, ou seja, as propriedades físicas são independentes das direções neste meio, mas, isso é válido segundo dados científicos para partículas de mais baixa energia, abaixo de 10^{14} eV [17]. Os estudos realizados sobre a anisotropia na distribuição das direções de chegada dos raios cósmicos, apresentam contribuições relevantes sobre a deflexão dessas partículas, assim como informações a respeito dos, mecanismos de aceleração e propagação desses UHECR em meio aos campos magnéticos, seja galáctico ou extragaláctico.

A anisotropia de grande escala angular no estudo das distribuições de direções de chegada dos UHECR, traz informações importantes sobre a natureza e origem dessas partículas. Para partículas com rigidez maiores os desvios angulares são razoáveis, podendo, assim, correlacionar possíveis fontes pontuais. Em pequenas escalas angulares, estão as partículas de menor energia, neste caso a correlação ocorre por meio dos campos magnéticos, de modo que o estudo da anisotropia se concentra em regiões mensuráveis do espaço.

Estudos mostram uma possível explicação para a região do tornozelo do espectro de raios cósmicos, que pode estar relacionada com a passagem dessas partículas de um meio galáctico para um meio extragaláctico, apresentando um padrão dipolar na distribuição desses UHECR observados na Terra. Acredita-se que a amplitude resultante nessa região pode estar relacionada com os modelos de campos magnéticos galácticos com diferentes aspectos.

1.4 Diagrama de Hillas

Para se desvendar o mistério de partículas altamente energéticas faz-se necessário compreender como essas partículas são aceleradas, pode-se explicar esse fenômeno de forma sucinta através do diagrama de Hillas. Esse modelo ajuda a identificar possíveis fontes de UHECR, realizando a caracterização dos objetos presentes no universo em altas magnitudes para acelerar essas partículas.

As partículas presentes na nossa galáxia na faixa de energia igual a $10^{15} eV$ são aceleradas pela própria Via Láctea, o mistério é encontrar um mecanismo capaz de acelerar os UHECR.

O modelo de Hillas busca por possíveis fontes de raios cósmicos ultra energéticos relacionando a energia máxima dos raios cósmicos, dada pelo mecanismo de primeira ordem de Fermi, com a magnitude do campo magnético das possíveis fontes.

Essa análise permite explorar possíveis fontes de UHECR como a de investigação deste estudo as radiogaláxias. Na figura 1.4 apresenta-se o diagrama que ilustra a intensidade do campo magnético das fontes em Gauss (G) *versus* o raio do objeto astrofísico em (cm).

Para determinar possíveis fontes dessas partículas ultra energéticas, a análise de Hillas afirma que esses aceleradores devem armazenar raios cósmicos até atingirem altíssimas energias. Pode-se investigar a capacidade de aceleração de UHECR na fonte, o que é determinado através de uma equação (1.2) conhecida como critério de Hillas [18], descrita abaixo.

$$E_{max} = \beta Z \left(\frac{B}{\mu G} \right) \left(\frac{L}{kpc} \right) EeV, \quad (1.2)$$

onde E_{max} é a energia máxima que uma partícula de carga Z pode alcançar sendo acelerada em uma região L , β é um fator velocidade, B o campo magnético.

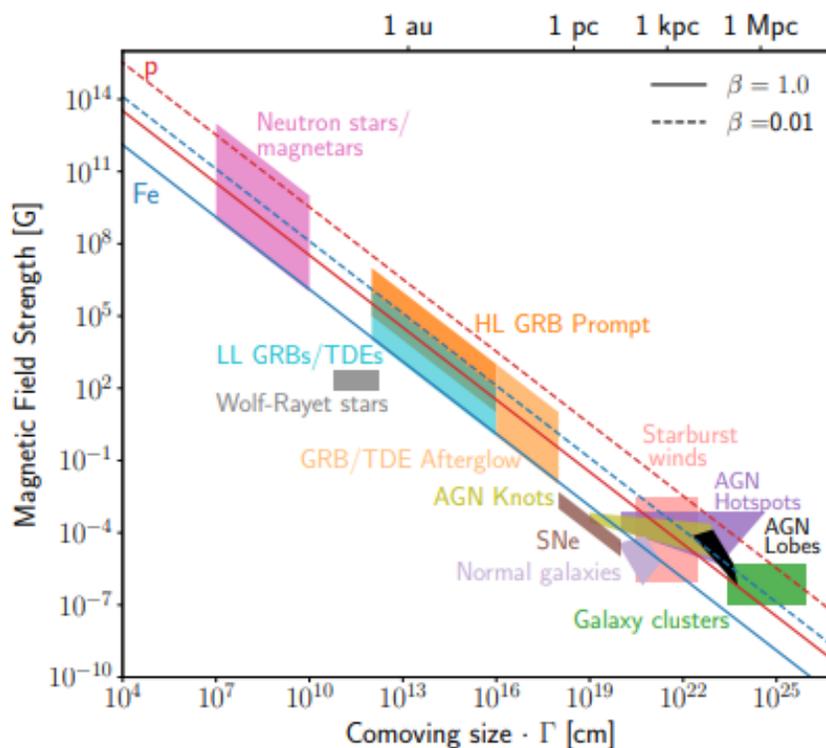


Figura 1.4: Diagrama de Hillas. Fonte: Retirado de [19].

O raio de Larmor da partícula acelerada deve ser menor que a região da fonte aceleradora, nesse ponto, ocorre o escape dessas partículas, isso é descrito pelo critério de Hillas. Na figura 1.4 há o diagrama de Hillas, que relaciona os possíveis aceleradores de UHECR tais como: AGNs, Starburst, Galáxias, entre outras, determinadas pelo campo magnético em termos de dimensão, trazendo hipóteses de objetos astrofísicos mais apropriados para acelerar partículas de ultra-alta energia.

Capítulo 2

Fontes de UHECR

2.1 Radiogaláxias

Neste capítulo são abordadas as características das três radiogaláxias escolhidas como possíveis fontes de UHECR, assim como as contribuições dos observatórios a respeito dessas fontes [20].

2.1.1 Centaurus A

As fontes foram escolhidas com base em dados obtidos pelo Observatório Pierre Auger descrito no Capítulo 1, que observaram uma correlação entre os raios cósmicos de ultra-alta energia com as AGNs, entre todas as galáxias, a Centaurus A é a mais próxima, estando a uma distância de 3,84 megaparsec (Mpc) da Terra [21].

Em dados obtidos pelo Observatório Pierre Auger constata-se que existe uma extensa região observada ao redor da rádilogaláxia Centaurus A. Os resultados das observações e a região onde se encontra Centaurus A a torna uma possível fonte de grande interesse, por esse motivo decidiu-se explorá-la neste estudo, visto que essa se mostrou ser fonte promissora para aceleração de UHECR como mostram as pesquisas [22].

As informações do observatório para um número de eventos observados com $E \leq 55$ EeV conforme mostrado na pesquisa [23], é a motivação para o aprofundamento dessas análises, através das simulações nestas regiões em diferentes faixas de energia.

Centaurus A, também conhecida como NGC 5128, é uma rádilogaláxia que foi descoberta

por James Dunlop, em 1826, estando localizada na constelação de Centauro, tendo seu formato elíptico, sendo bastante massiva.

Como já discutido anteriormente neste estudo, um dos objetivos é analisar a trajetória dos UHECR na presença do modelo de campo magnético galáctico JF2012. Supondo que as partículas detectadas pelo observatório Pierre Auger propagam-se da direção de Centaurus A.

A colaboração do Observatório Pierre Auger, em 2017, descreveu o primeiro vestígio observacional que mostra a origem dos raios cósmicos e concluíram com mais de 30 mil eventos a uma energia de 1J que estas partículas tem origem extragaláctica, confirmando as hipóteses existentes desde a sua descoberta. Para energias maiores, o número de eventos que chegam até ao topo da atmosfera cai eficientemente, as pesquisas mostram resultados em que as deflexões sejam menores nesse processo, como demonstrado neste estudo também, de maneira que suas direções de chegada podem trazer informações relevantes sobre suas direções de origem. O artigo [24] mostra as deflexões dos UHECR para diferentes modelos de campo, destacando a relevância do modelo de campo mais atual JF2012.

O estudo do Observatório Pierre Auger concentrou-se em suas análises em dois aceleradores extragalácticos, um deles são os *Núcleos ativos de galáxias*(AGNs). A figura 2.1 mostra o fluxo de raios cósmicos obtidos pelo observatório Pierre Auger com uma $E \leq 40$ EeV, onde é possível observar um alto fluxo dessas partículas próximas à fonte de Centaurus A. A fonte se encontra em uma longitude de 309.6° e uma latitude de 19.4° .

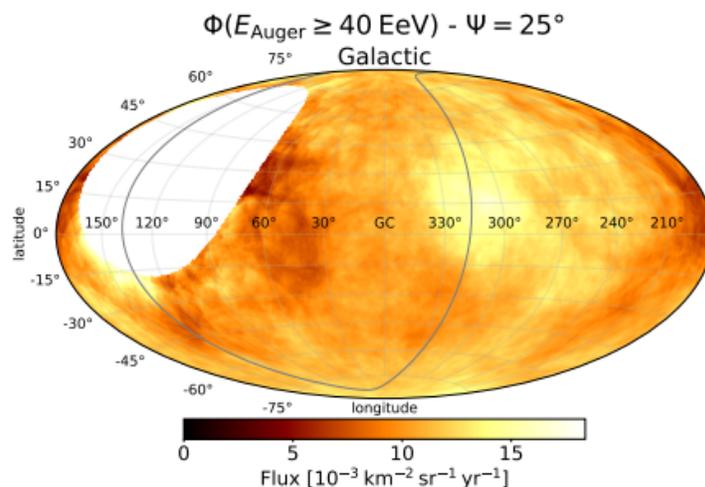


Figura 2.1: Mapa do fluxo de raios cósmicos com energia acima de 40 EeV com *top-hat smoothing* raio de $\Psi = 25^\circ$ em coordenadas galácticas. Fonte: Retirado de [25].

A área branca observada no *skymap* figura 2.1, não possui significância, pois o campo de visão do observatório Pierre Auger não abrange essas regiões.

Por sua vez, na figura 2.2 apresentam-se as imagens astronômicas recentes de Centaurus A. As imagens ilustram as estrelas, a poeira, o gás interestelar, entre outras propriedades que se fazem presentes, que os olhos humanos não são capazes de observar. Se observada a imagem (b) observa-se toda luminosidade de Centaurus A, classificada como a quinta galáxia mais brilhante no céu. O seu formato refere-se à fusão entre duas galáxias, uma elíptica e outra espiral. Assim, como na maioria das galáxias, Centaurus A também possui um buraco negro massivo em seu centro. Na imagem (b) os pontos vermelhos representam os elementos provenientes do jato relativístico ejetado pelo buraco negro.



(a) O formato de Cen A

(b) O brilho de Cen A

Figura 2.2: Centaurus A. Fonte: Retirado de [26, 27] .

A radiogaláxia Centaurus A é uma grande candidata à fonte de raios cósmicos, por ser próxima e por suas contribuições relevantes até o momento. A distribuição de direções de chegada de partículas ultra altas energéticas próximas à Centaurus A motiva a exploração dessas regiões. Os lóbulos gigantes dessa radiogaláxia evidenciam um possível local para aceleração de UHECR, assim como um jato de rádio no centro da fonte pode ser um acelerador de UHECR, entre outros mecanismos. Assim, é uma fonte bastante explorada, com resultados de número de eventos bastante relevantes, comparada com outras fontes próximas. Esses dados não consideraram as deflexões geradas pelos modelos de campos magnéticos galácticos, mas, como já mostrado neste estudo, a deflexão de Centaurus A para o modelo de campo mais atual JF2012 se mostrou ser menor, comparada com outras fontes.

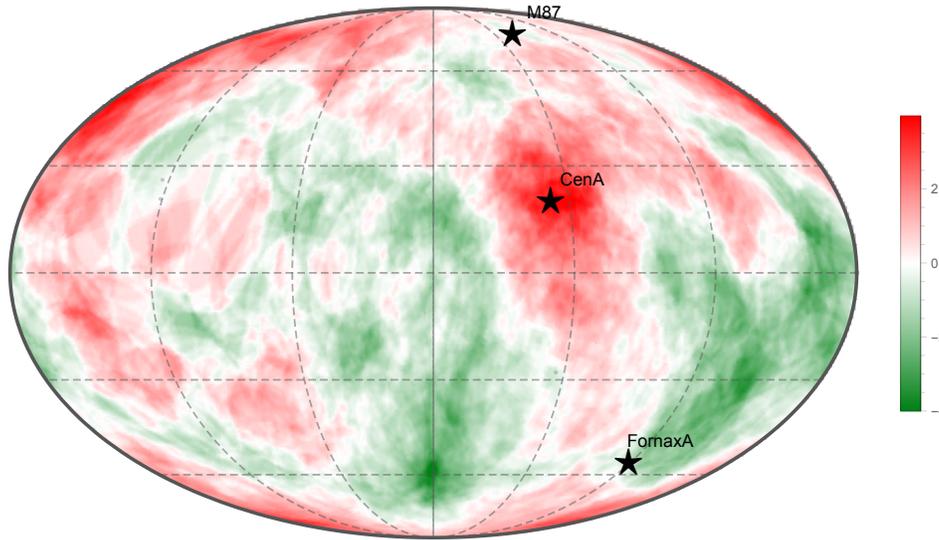


Figura 2.3: *Skymap* em coordenadas galácticas da significância estatística de Li-Ma *overdensities* em 20° de raio com 840 eventos registrados por Auger com $E > E_{\text{Auger}}$ e 130 eventos registrados por TA com $E > E_{\text{TA}}$. A escala de cores indica a significância em unidades de desvio padrão. Fonte: Retirado de [28].

A figura 2.3 ilustra os espectros dos eventos observados pelo Auger e *Telescópio Array* (TA), sendo 231 eventos com energia acima de 52 EeV detectados pelo observatório Pierre Auger e 72 eventos com energia acima de 57 EeV detectados pelo TA. O *skymap* mostra as anisotropias nas regiões das radiogaláxias. A cor verde mostra os pontos nas regiões em que a deflexão é maior, onde se pode observar que nas regiões das radiogaláxias Fornax A e M87 apresentaram maiores deflexões, diferente da Centaurus A que se mostra ser uma região privilegiada para detecção de UHECR.

A tabela 2.1 mostra algumas fontes observadas pelos observatórios Auger e TA, entre elas as três radiogaláxias investigadas neste estudo, trazendo o número de eventos observados, onde Cen A mostra ter o maior número de eventos detectados pelo Auger, as outras informações contidas na tabela referem-se às probabilidades relacionadas ao índice espectral. Os parâmetros utilizados nessas análises podem ser vistos com mais detalhes em [28].

A tabela 2.2 mostra os fluxos de raios γ das radiogaláxias, conforme os catálogos 2FHL e 3FHL. Nesta análise verificou-se a atenuação durante a propagação de UHECR. Esta atenuação é devido ao efeito GZK. A análise é descrita com detalhes em [29].

Tabela 2.1: Índices espectrais de fontes próximas selecionadas: γ maximiza a probabilidade e $[\gamma_l, \gamma_r]$ indica uma confiança de 68 % intervalo do índice espectral. Retirado do [28].

Source	Dataset	Events	γ	γ_l	γ_r
NGC 253	Auger	8	4.8	3.6	6.4
NGC 4945	Auger	14	6.8	5.4	8.5
M83	Auger	13	4.6	3.7	5.7
NGC 1068	Auger	8	4.9	3.7	6.4
NGC 1068	TA	2	3.9	2.3	6.5
M82	TA	3	5.3	3.3	8.3
Cen A	Auger	16	5.5	4.5	6.8
Fornax A	Auger	7	7.0	5.0	9.5
M87	Auger	3	15.2	8.5	25.0
M87 A	TA	2	8.7	4.5	15.5

Tabela 2.2: Fluxos de raios γ para as três fontes. Retirado de [29].

Source	2FHL	3FHL
	$(10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$	
Cen A core	3.90 ± 2.29	7.40 ± 1.90
M87	5.12 ± 3.47	9.55 ± 3.26
Fornax A	-	2.59 ± 1.27

2.1.2 Fornax A

A Fornax A também conhecida como NGC 1316, está localizada a, aproximadamente, 20,9 *megaparsec* (Mpc) da Terra [30], possui uma luminosidade de aproximadamente $8,3 \times 10^{40} \text{ erg/s}$. Classificada como uma radiogaláxia, tem seu formato elíptico e é gigantesca. A possível fonte se encontra em uma longitude galáctica de $l = 240,16^\circ$ e uma latitude galáctica de $b = -56,69^\circ$.

A figura 2.4 ilustra a NGC 1316 e suas características. A figura foi construída através de dados obtidos com o HUBBLE (Telescópio Espacial da NASA). A imagem mostra o porquê da radiogaláxia ser conhecida como uma galáxia empoeirada, revelando as faixas de poeira que indicam que a NGC 1316 pode ter sido formada pela fusão de galáxias ricas em gás, a imagem também ilustra os aglomerados de estrelas.



Figura 2.4: Fornax A [31]

A radiogaláxia pertence à constelação Fornax e é uma das fontes com maior presença de rádio do céu, com comprimentos de ondas de rádio que nem o telescópio Hubble é capaz de alcançar. Essa energia de rádio é emitida através dos lóbulos da Fornax A. Embora seja a radiogaláxia mais distante da Terra, a NGC 1316 apresenta informações relevantes e mostra ser uma possível fonte de UHECR, devido às direções de chegada dessas partículas até a fonte.

2.1.3 Messier 87

A M87 também conhecida como NGC 4486 é uma radiogaláxia elíptica presente no aglomerado de Virgem, está a, aproximadamente, 18,4 *megaparsec* (Mpc) da Terra, possui uma luminosidade estimada em $7,6 \times 10^{40}$ *ergs/s* [18]. A Messier 87 tem em seu centro um buraco negro supermassivo responsável pelo jato de partículas ultra alta energética que emergem dessa região. A figura 2.5 apresenta uma imagem que ilustra o formato da radiogaláxia, assim como suas características.

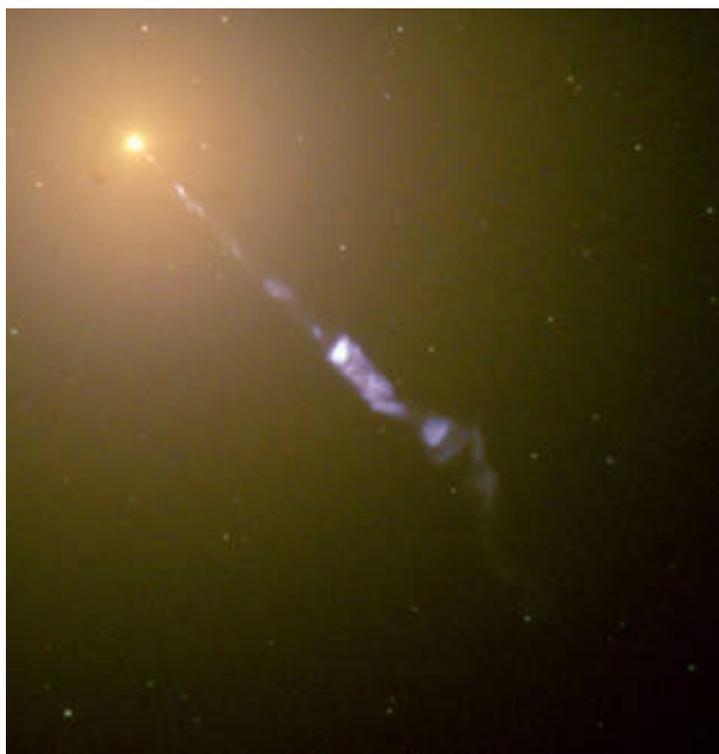


Figura 2.5: Messier 87 [32]

A figura 2.6 ilustra imagens obtidas do buraco negro da radiogaláxia Messier 87, a primeira imagem do buraco negro da Messier 87 foi obtida em 2017 pelo telescópio EHT (Telescópio do

Horizonte de Eventos), localizada do lado esquerdo da figura 2.6. A imagem registrada pelo EHT e por outros telescópios obteve melhor resolução em 2019, com o uso da inteligência artificial tornando a imagem mais nítida, conforme mostra a imagem do lado direito da figura 2.6. Esse fato foi um grande avanço na Cosmologia, tendo a contribuição da pesquisadora brasileira Lia Medeiros [33], o trabalho repercutiu pelo mundo inteiro e merece um destaque neste estudo.

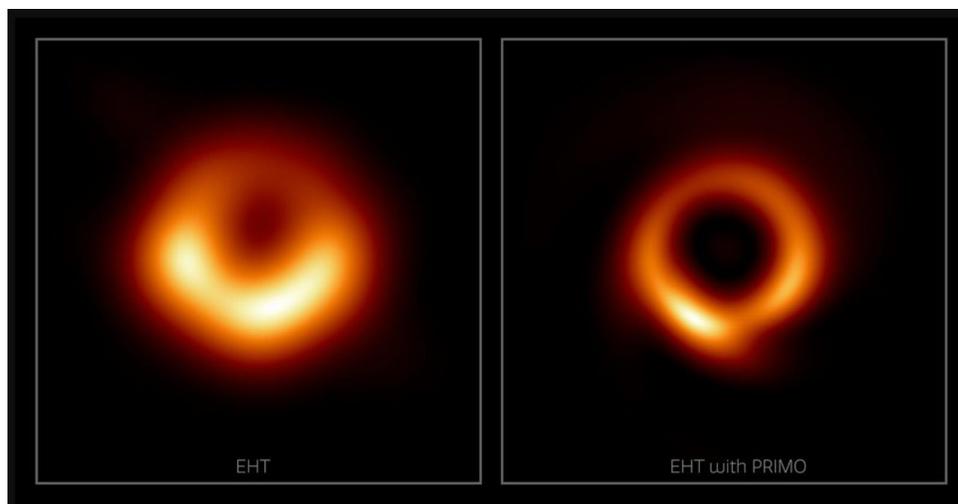


Figura 2.6: Buraco negro supermassivo M87 [32]

Como se sabe, um buraco negro possui um campo gravitacional tão intenso que nada escapa dele, nem mesmo a luz. A sombra do buraco negro é a parte escura no centro, envolvida ao redor por matéria (gás e poeira) que são absorvidas pelo buraco negro. O que torna essas imagens ainda mais fascinantes é o fato de que o buraco negro M87 se encontra a milhões de anos-luz da nossa galáxia e sua massa é estimada em bilhões de vezes maior que a massa solar.

A EHT trabalhou muito para a criação da primeira imagem do buraco negro M87, no total foram oito telescópios espalhados por várias regiões do mundo, utilizando da rotação da Terra para gerar um grande telescópio associado aos outros oito e, assim, realizar as observações em um comprimento de onda de aproximadamente 1.3 mm. A EHT alcançou uma resolução angular de 20 micro arc-segundos e um avanço primordial no estudo sobre os buracos negros, o que implica na compreensão com relação a relatividade geral de Albert Einstein entre outras teorias, que estão descritas com mais detalhes em [34].

As características da Messier 87 e seus jatos relativísticos poderosos podem trazer informações importantes a respeito do buraco negro, pois quando a matéria contida ao redor do buraco negro é acelerada com uma velocidade muito próxima a da luz, os jatos são formados.

Esses estudos da formação desses jatos são extremamente relevantes e podem contribuir muito para resolução dos mistérios da Astrofísica, uma vez que se acredita que esses jatos são grandes aceleradores de UHECR.

Capítulo 3

Campo Magnético Galáctico

Em 2012, o modelo de campo magnético Galáctico conhecido como JF2012 foi introduzido por Jansson e Glennys. Esse modelo representa uma melhoria significativa em relação aos seus anteriores, uma vez que incorpora dados do mapa de emissão síncrotron WMAP7 e informações provenientes de medidas de rotação de Faraday [35]. Essas contribuições permitiram ajustar e enriquecer os parâmetros do modelo, incluindo a introdução de componentes estriados de campos magnéticos aleatórios, bem como um componente fora do plano [8].

3.1 A origem do Campo Magnético Galáctico

O estudo do campo magnético Galáctico começou por volta de 1949, com Hannes Alfvén e Fermi, levantando hipóteses de que havia um campo magnético em nossa galáxia com intensidade de $10 \mu G$ que confinava raios cósmicos. Fermi defendia que os raios cósmicos tinham origem interestelar e, conforme Alfvén, o campo que atuava ali era conhecido como campo magnético errante.

Em seguida, Hall e Hiltner comprovaram a polarização da luz interestelar no campo magnético Galáctico. Em 1951, surgiu o primeiro modelo de campo magnético interestelar criado por Davis e Greenstein. Smith e Lyne mediram a densidade de elétrons e o campo magnético utilizando a rotação de Faraday da emissão de rádio polarizada presente nos pulsares.

Davies deu sequência ao estudo e concluiu a presença de um campo magnético regular de larga escala na Via Láctea. Através de dados retirados de um pulsar, por volta de 1973, foram produzidos mapas de vetores ópticos *versus* coordenadas galácticas que mostram a estrutura do

campo magnético Galáctico com *loops* e esporas fora do plano. Explorando esse fato, Beuermann aprofundou-se na emissão síncrotron da galáxia e descobriu que o campo magnético é orientado ao longo do disco, além disso, observou-se mais uma componente de pequena escala. Para compreender melhor os métodos utilizados nessas descobertas, torna-se preciso descrever cada um deles.

3.1.1 Polarização da Luz Estelar

A luz pode ser polarizada através de alguns métodos, tais como: emissão síncrotron, absorção dicróica, espalhamento por elétrons e por campos magnéticos estelares. A polarização da luz estelar acontece com a dispersão de absorção de grãos de poeira relativamente ordenados por um campo magnético. Esses grãos são constituídos, a priori, de hidrogênio com uma porcentagem de ferro. Para realização dos cálculos é utilizada a teoria de Gans, que calcula o espalhamento e a absorção por um grão de uma esfera pequena comparada com o comprimento de onda, com isso a polarização da luz é calculada para uma pequena nuvem de partículas orientadas [36], conforme ilustra a figura 3.1.

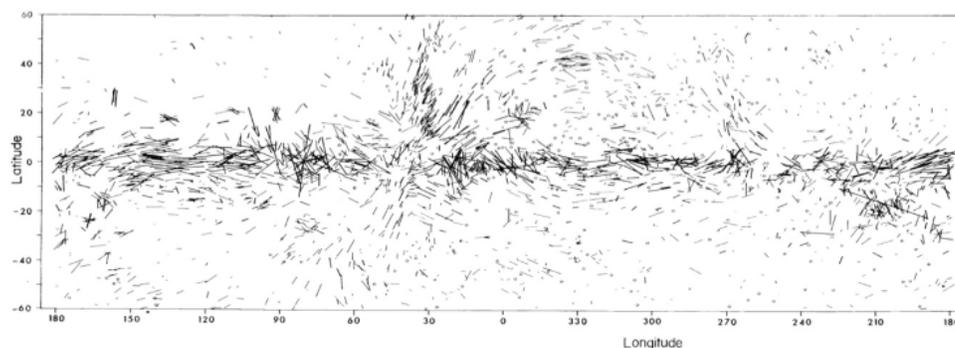


Figura 3.1: Medidas da polarização da luz em coordenadas galácticas. As linhas representam a direção da polarização, onde as estrelas se encontram no centro de cada linha, o comprimento das linhas indicam a porcentagem da polarização. Fonte: Retirado de [37]

3.1.2 Emissão Síncrotron

A radiação síncrotron polarizada se dá através da aceleração de partículas como os elétrons e os pósitrons em torno do campo magnético Galáctico. A intensidade do campo pode ser encontrada conforme a expressão 3.1:

$$B_{\perp} \propto ((1 - k)jv)^{2/\gamma+5}, \quad (3.1)$$

onde B_{\perp} representa a componente perpendicular à direção do campo magnético, o k é a energia total, jv é a emissividade total e γ corresponde ao índice espectral [38].

3.1.3 Rotação de Faraday

A rotação de Faraday caracteriza-se pela propagação da luz em um plasma na presença de campos magnéticos. A rotação pode ser descrita por:

$$\Delta\Theta = RM\lambda^2, \quad (3.2)$$

onde a variação do ângulo de rotação $\Delta\Theta$ é igual a medida de rotação RM multiplicada pelo comprimento de onda ao quadrado λ^2 .

A medida de rotação relaciona a densidade eletrônica com a linha de visada do campo magnético, conforme a expressão 3.3:

$$RM = 0.81 \int n_e B_{\parallel} dl [\text{rad } m^{-2}], \quad (3.3)$$

onde n_e é a densidade eletrônica dada em cm^{-3} , B_{\parallel} é a componente paralela à direção do campo magnético dada em μG . Segue a figura 3.2, apresentando uma imagem ilustrativa da rotação de Faraday:

3.1.4 Efeito Zeeman

Esse efeito evidencia-se pela divisão dos níveis de energia atômica na presença do campo magnético. Basicamente define-se que o momento angular total de um átomo é igual ao *spin* mais o momento orbital, com a divisão Zeeman tem-se $2j+1$ onde j representa um quantum do número associado ao momento angular total J [38]. A expressão 3.4 define a divisão dos níveis da vizinhança:

$$\Delta E = g\mu B, \quad (3.4)$$

onde g é o fator de Lande que relaciona o momento magnético com o angular e μ é conhecido como Bohr magneton. Na pesquisa [39], é possível encontrar mais informações a respeito da descoberta do efeito Zeeman.

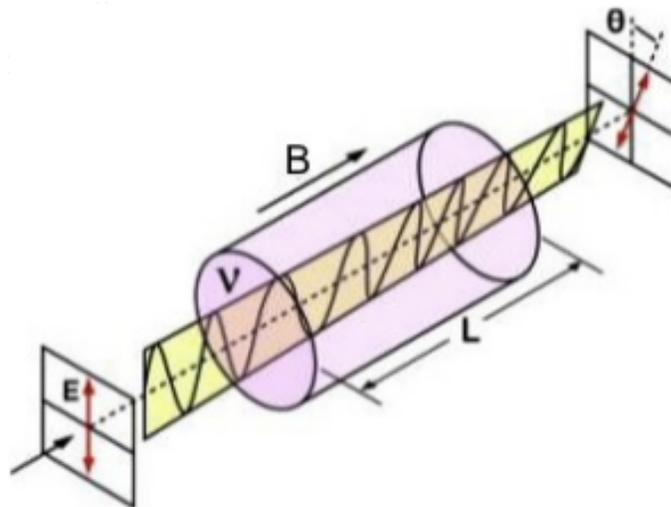


Figura 3.2: Representação de uma onda eletromagnética polarizada em contato com um campo magnético. Fonte: Retirado de [23].

3.2 Os modelos de GMF

Existem vários modelos de campo magnético Galáctico atualmente, esses modelos foram criados através de dados gerados pelos observatórios. Eles apresentam características parecidas, como a existência de um campo magnético turbulento e um componente regular de grande escala. As linhas do campo magnético ficam localizadas nos braços espirais da galáxia, porém a estrutura do campo não é totalmente definida.

Nos modelos *Espiral bissimétrica* (BSS) e *Espiral axissimétrica* (ASS) tem-se a espiral simétrica, que define a simetria do campo magnético, se observado na figura 3.3, as inversões do campo, pode-se concluir que a geometria bissimétrica no campo BSS, já no campo ASS há uma axissimétrica. Chama-se de campo dipolo designado por "A", que representa uma antissimetria quando relacionada à simetria do disco Galáctico e um quadrupolo representado por "S", que indica uma simetria.

Esses dois modelos possuem características diferentes, para o campo bissimétrico BSS a intensidade do campo é dada por:

$$B(\rho, \phi) = B_0(\rho) \cos(\phi - \beta \ln(\rho/\rho_0)), \quad (3.5)$$

onde ρ_0 é a distância galacto cêntrica igual a 10,55 kpc, β é igual a -5.67, ρ é igual a 20 kpc e $\beta_0(\rho)$ é equivalente a $3R/\rho \mu G$.

Já a intensidade do campo ASS é definida por:

$$|B(r, \theta, z)| = |B(r, \theta)|e^{-(|z|/z_0)}, \quad (3.6)$$

onde $z_0 = 1$ kpc para $|z| < 0.5$ kpc e $z_0 = 4$ kpc para $|z| > 0.5$ kpc.

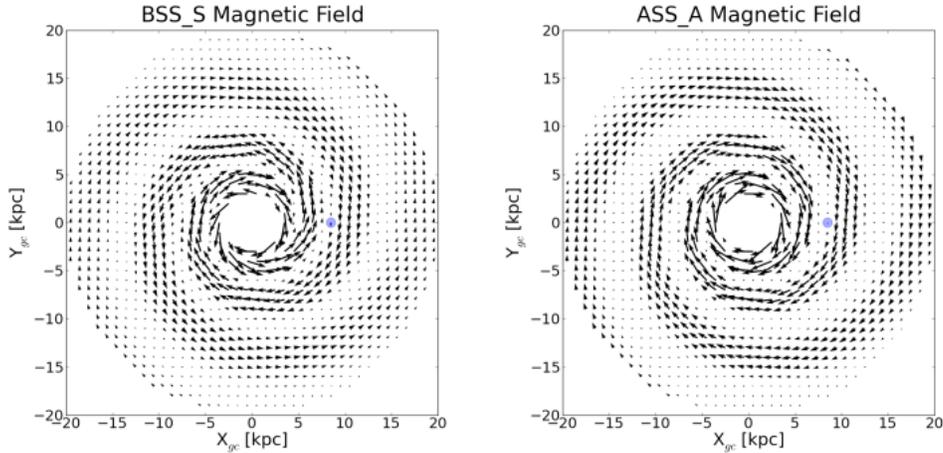


Figura 3.3: Representação da intensidade e das direções dos campos magnéticos BSS e ASS, no disco Galáctico. O ponto em azul representa a localização do Sol. Fonte: Retirado de [23].

Através desses modelos surgiram outros mais aprimorados como o de Pshirkov, apresentado em 2011, e o Jansson-Farrar, o modelo mais atual e mais completo proposto até o momento, o qual é utilizado neste estudo e será discutido com mais detalhes na seção seguinte.

3.3 Modelo de Campo Magnético Galáctico JF2012

Esse modelo de campo magnético Galáctico (GMF) é o mais completo comparado com os anteriores, trata-se de um modelo reajustado, que possui duas componentes a mais, uma componente perpendicular ao plano e outra componente de um campo aleatório "estriado". O modelo JF2012 utiliza o mapa de emissão síncrotron WMAP7 e várias medidas de rotação extragaláctica para reajustar os parâmetros do modelo [40]. A radiação síncrotron e a rotação de Faraday são os mecanismos mais utilizados para restringir os parâmetros no campo magnético Galáctico de grande escala. Esse modelo contempla três tipos de campos magnéticos Galácticos, descritos nos tópicos seguintes, o primeiro é o campo regular de grande escala, o segundo descreve o campo aleatório estriado e o terceiro explica o campo randômico [41].

3.3.1 Campo Regular Only

O campo regular Only de grande escala é estruturado por três componentes, sendo eles: um disco, um halo toroidal e um componente fora do plano, esses componentes são definidos separadamente o que faz com que não haja divergência. Este campo colabora com dados de emissão síncrotron total I, emissão síncrotron polarizadas PI e medida de rotação de Faraday [42].

Disco

O campo do disco é determinado a partir de uma variação de raios de 3 kpc a 20 kpc, no plano (x,y), sendo que para raios de 3 kpc à 5 kpc o campo é azimutal [43]. Acima de 5 kpc até 20 kpc o campo possui oito regiões espirais e suas respectivas linhas são representadas pela seguinte expressão:

$$r = r_{-x} e^{(\phi \tan(90-i))}, \quad (3.7)$$

onde i é igual a $11,5^\circ$ que representa o ângulo de inclinação, o r_{-x} é o valor do raio onde uma espiral cruza o eixo x negativo ($r_{-x} = 5, 1, 6, 3, 7, 1, 8, 3, 9, 8, 11, 4, 12, 7, 15, 5 \text{ kpc}$) para os oito braços.

A intensidade do campo pode ser definida como:

$$\vec{b} = \text{sen}(i)\vec{r} + \text{cos}(i)\vec{\phi}, \quad (3.8)$$

essa intensidade para cada braço é definida em um raio de 5 kpc e cai com $1/r$.

Para encontrar a força do campo no oitavo braço, é utilizada a seguinte expressão:

$$b_8 = - \sum_{i=1}^7 f_i b_i / f_8, \quad (3.9)$$

onde f_i é a área da seção transversal relativa das espirais em um raio fixo. O componente do disco é multiplicado por

$$(1 - L(z, h_{disco}, \omega_{disco})),$$

onde:

$$L(z, h, \omega) = (1 + e^{-2(|z|-h)/\omega})^{-1}, \quad (3.10)$$

onde h define a altura e ω a largura da região de transição.

Halo Toroidal

Esse componente do campo é toroidal ou puramente azimuthal [43], conforme ilustrado na figura 3.4. Ainda, esse campo pode ser definido como:

$$B_{\phi}^{tor}(r, z) = e^{-(|z|/z_0)} L(z, h_{disco}, \omega_{disco}) \times \begin{cases} B_n(1 - L(r, r_n, \omega_h)), & se z > 0 \\ B_s(1 - L(r, r_s, \omega_h)), & se z < 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

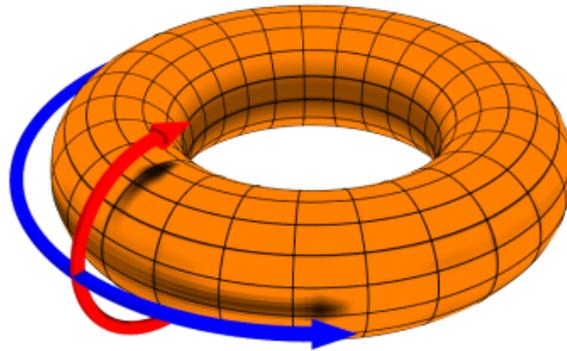


Figura 3.4: A seta vermelha representa a geometria poloidal e a seta azul, a toroidal. Fonte: Retirado de [23].

Componente fora do Plano

Foi adicionado no componente halo na geometria poloidal um componente fora do plano, esse componente também é axissimétrico conforme ilustrado na figura 3.5.

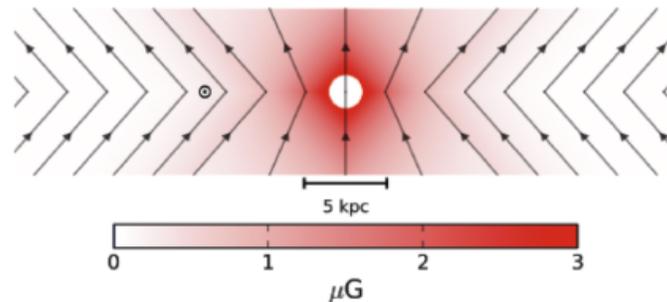


Figura 3.5: Uma fatia xz da galáxia mostrando apenas o componente fora do plano. Este componente também é chamado de componente de campo em forma de X. Fonte: Retirado de [23].

Observa-se um campo em formato de X semelhante a alguns já observados nas bordas das galáxias. O campo em cada posição (r, z) é especificado em termos de r_p , o raio no qual a linha de campo passando por (r, z) cruza o plano $z = 0$. O campo fora de um raio galactocêntrico de 5 kpc tem um ângulo de elevação constante (Θ_X^0) em relação ao plano médio. Para raio menor, o ângulo de elevação é linear com o raio, tornando-se vertical no centro. A intensidade do campo no plano médio é definida por:

$$b_X(r_p, z = 0) = B_X \cdot e^{-r_p/r_x}, \quad (3.12)$$

onde B_x é a amplitude do campo em $(r = 0, z = 0)$.

Na região com ângulo de elevação constante, a intensidade do campo é:

$$b_x(r_p)r_p/r, \text{ com } r_p = r - |z|/\tan(\Theta_X^0). \quad (3.13)$$

Na região com ângulo de elevação variável, a intensidade do campo é:

$$b_x(r_p)(r_p/r)^2, \quad (3.14)$$

para

$$r_p = r r_X^c / (r_X^c + |z|/\tan(\Theta_X^0)) \quad (3.15)$$

e

$$\Theta_X(r, z) = \tan^{-1}(|z|/(r - r_p)) \quad (3.16)$$

Ao todo, o componente fora do plano tem quatro parâmetros livres: B_X , (Θ_X^0) , r_X^c e r_X .

3.3.2 Campo Regular + Estriado

Como já mencionado anteriormente, o modelo Fansson-Farrar adicionou um componente a mais no campo aleatório junto ao campo regular, conhecido como "estriado", seguindo dados teóricos.

Acredita-se que os campos estriados são gerados quando as bolhas de plasma quente sofrem levitações, realizando, assim, o transporte dos campos aleatórios que ficam presos e longe do disco. Outra possível produção de campos estriados é a rotação diferencial que ocorre em campos aleatórios de pequena escala, esses dois processos podem ocorrer simultaneamente [8].

A força do campo estriado é definida como:

$$B_{estri}^2 = \beta B_{reg}^2, \quad (3.17)$$

podendo, assim, dizer que a força do campo estriado é proporcional ao campo regular com um fator β [8].

O modelo JF2012 está implementado dentro de um programa computacional conhecido como CRT (transporte de raios cósmicos), utilizado para realização das simulações neste estudo.

A estrutura do campo estriado dentro do CRT consiste em uma grade cúbica de 100 pc presente na galáxia de 20 kpc de raio, como se houvesse milhares de pequenos cubos e uma incerteza de ± 1 fosse atribuída para verificar a orientação do campo estriado comparado com o regular.

Devido às incertezas em relação às características dos campos estriados dentro da Via Láctea, os dois componentes regular e estriado são combinados.

3.3.3 Campo Randômico

Para melhorar as observações, foi realizado um ajuste no WMAP I através da superposição do campo aleatório em um componente de disco, tendo uma região central e oito braços espirais com a mesma geometria mais um componente de halo estendido.

Os três modelos de campo contribuem para observáveis, entretanto, de maneiras diferentes. O campo aleatório contribui apenas para emissão síncrotron total, representado pela letra I. Outro aspecto que diferencia o campo aleatório (random) dos demais é a força do campo, definida como:

$$B_{rand} = \sqrt{B_{disco}^2 + B_{halo}^2}. \quad (3.18)$$

O componente de disco do campo aleatório Galáctico (GRF) é estruturado com um produto entre o fator radial e um perfil vertical, considerando uma largura gaussiana z_0^{disco} . O fator radial (b_{int}) é constante até 5 kpc, acima disso, a força rms muda de um braço espiral para outro. A 5 kpc a força do i -ésimo braço espiral é definido como b_i e cai com $\sim 1/r$ em raios maiores. Já o campo aleatório de halo é representado pela expressão [43]:

$$B_{halo} = B_0 e^{[-r/r_0]} e^{[-z^2/2z_0^2]}, \quad (3.19)$$

onde, há o produto entre uma exponencial em relação ao raio e uma exponencial gaussiana da direção vertical.

Assim, é preciso compreender como o CRT implementa o modelo de campo JF2012. Primeiramente, o programa gera imagens de campos magnéticos aleatórios, o código que é utilizado no

CRT considera o volume da galáxia como sendo um cubo de 40 kpc, localizado no centro Galáctico (GC) e subdividido em 64 mil blocos, cada um com 1 kpc de um lado. Portanto, pequenas esferas magnéticas são distribuídas aleatoriamente dentro e fora dos blocos. A quantidade de partículas desejada é definida pelo usuário, esse processo de divisão permite rastrear essas partículas dentro da Galáxia. Suas posições são determinadas aleatoriamente em um volume de 20 kpc do GC.

Para calcular o vetor de campo magnético aleatório o CRT relaciona uma lista de vetores de partículas individuais. No processo da geração do campo magnético aleatório, para cada bloco, o programa inclui uma lista de partículas exclusivas contidas nesses blocos. As posições das partículas para um bloco específico de 1 kpc^3 .

Durante o processo de rastreamento, o CRT filtra apenas as células que contribuem com o vetor de campo total, otimizando tempo.

Capítulo 4

Simulações de UHECR

Todas as simulações deste estudo foram conduzidas utilizando o programa CRT, que incorpora a implementação do modelo de campo Jansson-Farrar. Foram realizadas simulações abrangendo três modelos distintos de campos, conforme discutido em seções anteriores [2.3.1, 2.3.2, 2.3.3]. Para conduzir essas simulações, alguns parâmetros foram configurados: o número de partículas, o índice espectral, a energia, as coordenadas galácticas da fonte, a carga e a massa da partícula, bem como a seleção da componente de campo a ser empregada. O CRT rastreou os eventos gerados, fornecendo informações sobre as posições iniciais e finais dessas partículas em unidades de kpc.

4.1 UHECR de Radiogaláxias

A grande dificuldade da astrofísica moderna em encontrar as fontes de raios cósmicos de ultra-alta energia, está na propagação dessas partículas na presença do GMF, ou seja, nesse processo os UHECR sofrem deflexões, impedindo a obtenção das posições exatas de origem dessas partículas. Para uma partícula ultra-relativística como um próton da ordem de $E \sim 10^{19}$ eV, a massa se torna desprezível e sua velocidade passa a ser igual a velocidade da luz. Portanto, pode-se descrever a velocidade de uma partícula com carga relativística em um campo magnético uniforme e constante a partir da força de Lorentz:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{c^2 q}{E} (v \times \mathbf{B}), \quad (4.1)$$

onde, q é a carga da partícula, v sua velocidade e E sua energia; B é o campo magnético do meio.

O que define o quanto um UHECR é defletido na presença do campo magnético Galáctico é a relação de energia por carga, conhecida como rigidez $R = E/Zc$. Para entender melhor sobre o conceito de deflexão, pode-se observar a pesquisa de [44]. Neste estudo consideram-se três radiogaláxias, como possíveis fontes de raios cósmicos ultra energéticos, são elas: Centaurus A, Fornax A e Messier 87, já descritas anteriormente.

Nas análises iniciais das deflexões, simulou-se 500 mil partículas com um índice espectral de 1.7, variando os valores de rigidez, bem como as coordenadas de longitude e latitude das fontes, e empregando o componente do campo regular. A escolha de um índice espectral pequeno foi feita com o objetivo de produzir um espectro com decaimento em energias mais elevadas, dado que o programa não leva em consideração perdas de energia [28]. Essa mesma análise foi conduzida para as três fontes, com o propósito de determinar a distribuição das deflexões pelas energias para avaliar a influência do campo magnético galáctico. É importante mencionar que, devido à falta de consideração de parâmetros extragalácticos no CRT, projetou-se as fontes na borda da galáxia em um disco de 8 kpc no campo de visão da fonte.

A figura 4.1 (a) exibe a análise das deflexões das partículas provenientes da radiogaláxia Centaurus A, com energias variando entre 10 EeV e 100 EeV, detectadas por um detector situado a 0.4 kpc, na presença do campo magnético regular. A deflexão máxima observada para Centaurus A aproximou-se dos 30 graus. Realizou-se uma análise idêntica, com os mesmos parâmetros, para a fonte Fornax A, como representado na figura 4.1 (b). Nesse caso, Fornax A apresentou uma deflexão inferior a 30 graus. Por outro lado, a figura 4.1 (c) apresenta os resultados obtidos na análise da fonte Messier 87. Em comparação com as outras duas fontes, Messier 87 foi a que mais sofreu deflexão, ou seja, foi mais afetada pelo campo magnético Galáctico JF12-reg, com um ângulo superior a 30 graus. O pico de deflexão ocorreu próximo a 20 graus para as três fontes.

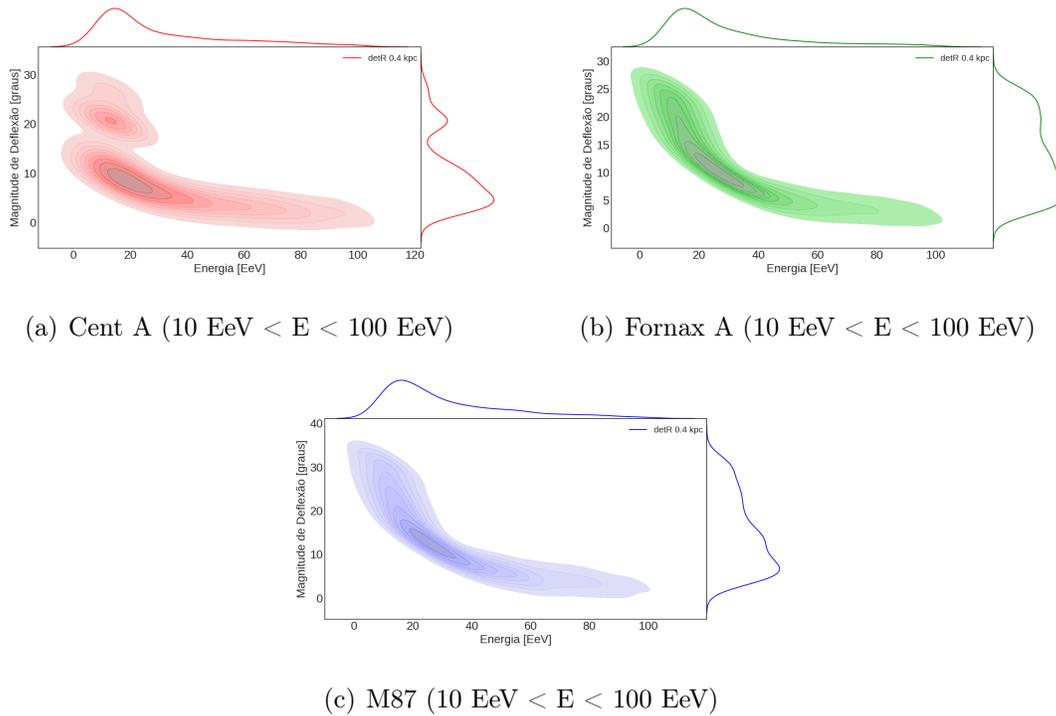


Figura 4.1: Deflexões de UHECR provenientes das regiões das radiogaláxias, na presença do campo regular (JF2012-reg), (a) Centaurus A, (b) Fornax A e (c) Messier 87, no eixo x há a energia na unidade de (EeV), no eixo y, o ângulo de deflexão dado em (graus), as distribuições acima e ao lado direito do plot representam a região onde se concentra o maior número de partículas. Fonte: Autor.

4.1.1 Posições Iniciais dos UHECR na região das fontes

As distribuições das posições iniciais das partículas ao saírem da região da fontes foram estudadas. Para essa análise variou-se o tamanho dos detectores de 0.1 kpc à 0.4 kpc e se utilizou rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV, para as três fontes. Essa análise teve o intuito de verificar a região com maior concentração de partículas próximas à fonte [23].

Selecionou-se o valor de 8 kpc para o raio inicial do disco de injeção, no qual diversas partículas foram inseridas, seguindo uma lei de potência. Os vetores de velocidade iniciais das partículas foram alinhados com a direção da fonte, conforme observado da Terra. Essas partículas então foram propagadas pelo GMF, componente regular em um Forward-Tracking, esse processo ocorre quando uma partícula é injetada de uma fonte extragaláctica e se propaga através do GMF até finalmente atingir o detector centrado na Terra, nesta análise essas partículas foram monitoradas

para determinar se alcançam o detector. Destaca-se que o tamanho do detector desempenhou um papel significativo no número de detecções bem-sucedidas. A figura 4.2 (a) mostra as posições iniciais das partículas próximas à Centaurus A, com rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV e detectores variando de 0.1 kpc a 0.4 kpc.

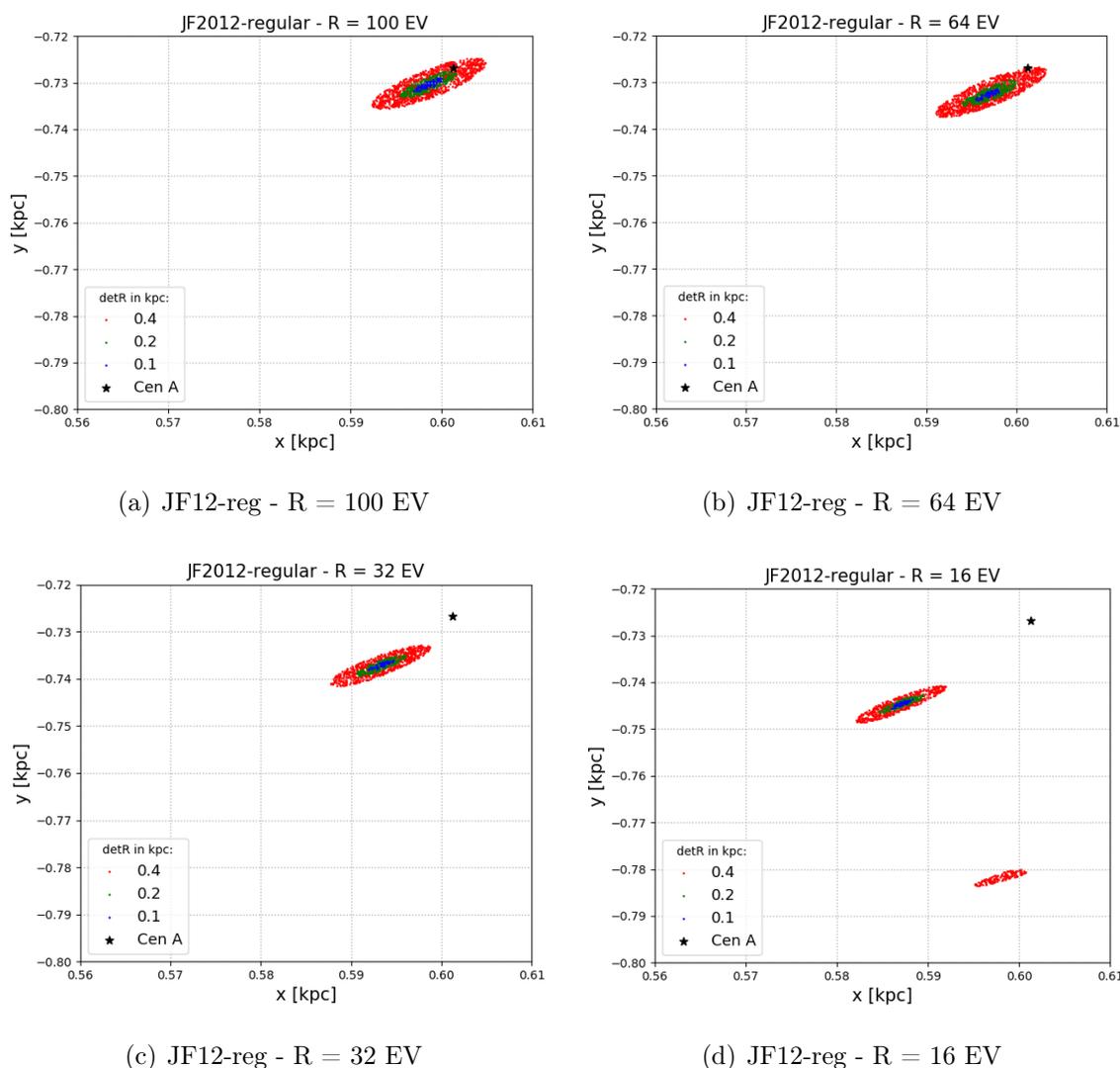


Figura 4.2: Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores, a estrela preta representa a posição do centro de Cen A. Fonte: Autor.

Nessa análise, Centaurus A está no eixo z, o qual é a origem e está ao longo da direção da linha de visada. Observou-se que as partículas com rigidez maior, plot 4.2(a), encontram-se

próximas ao centro da fonte, dessa forma, não foi possível determinar uma região com maior número de concentração de partículas. Com rigidez menores essas partículas sofrem mais a influência do campo magnético Galáctico. Observou-se que para uma rigidez de 64 EV, figura 4.2 (b), a concentração das partículas já não se encontra próxima ao centro da fonte; para uma rigidez ainda menor como a de 32 EV, figura 4.2 (c), as partículas já se encontram mais distantes da fonte. Por fim, para uma rigidez de 16 EV, figura 4.2 (d), identifica-se uma distribuição dessas partículas em regiões distintas, esse efeito ocorre somente para detectores de 0.4 kpc. Dessa forma, pode-se compreender em qual região estão concentrados esses raios cósmicos de diferentes energias e compreender como o GMF interfere na propagação dessas partículas dentro da Galáxia.

Como se optou por investigar as três radiogaláxias, realizou-se as mesmas análises para as três possíveis fontes. A figura 4.3 mostra as posições iniciais dos UHECR provenientes da Fornax A, com uma rigidez de 100 EV figura 4.3 (a), uma rigidez de 64 EV figura 4.3 (b), rigidez ainda menores, como de 32 EV figura 4.3 (c) e 16 EV figura 4.3 (d), novamente, observa-se para a fonte ao longo do eixo z.

A radiogaláxia Fornax A foi a que registrou a menor deflexão angular das partículas detectadas, conforme previamente exposto na figura 4.1 (b). Novamente, nesta análise, nota-se que para valores de rigidez mais elevados, ou seja, 100 EV e 64 EV, os raios cósmicos permanecem próximos, ao centro da fonte. Esses resultados tendem a se assemelhar para as três potenciais fontes de UHECR, devido às altas energias das partículas envolvidas. As figuras 4.3 (c) e (d) ilustram os resultados obtidos com valores de rigidez mais baixa, especificamente, 32 EV e 16 EV. Partículas com energias menores tendem a se afastarem mais da fonte, devido à influência do campo magnético Galáctico regular. Quanto menor a energia, maior a distância das partículas cósmicas em relação ao centro de origem da fonte. Para Fornax A, as partículas detectadas se concentraram em uma única região, ao contrário do que observado para a fonte Centaurus A com rigidez de 16 EV, onde se identificou uma distribuição mais dispersa.

A Messier 87 foi a fonte que mais sofreu a influência do campo magnético Galáctico regular nas análises deste estudo, conforme evidenciado na figura 4.1 (c). A figura 4.4 ilustra que, para uma rigidez de 100 EV, os eventos foram detectados muito próximos ao centro da fonte, um padrão que também se repete nas fontes Centaurus A e Fornax A. Por outro lado, ao considerar uma rigidez de 64 EV, observa-se que, em relação à Centaurus A e Fornax A, os eventos em

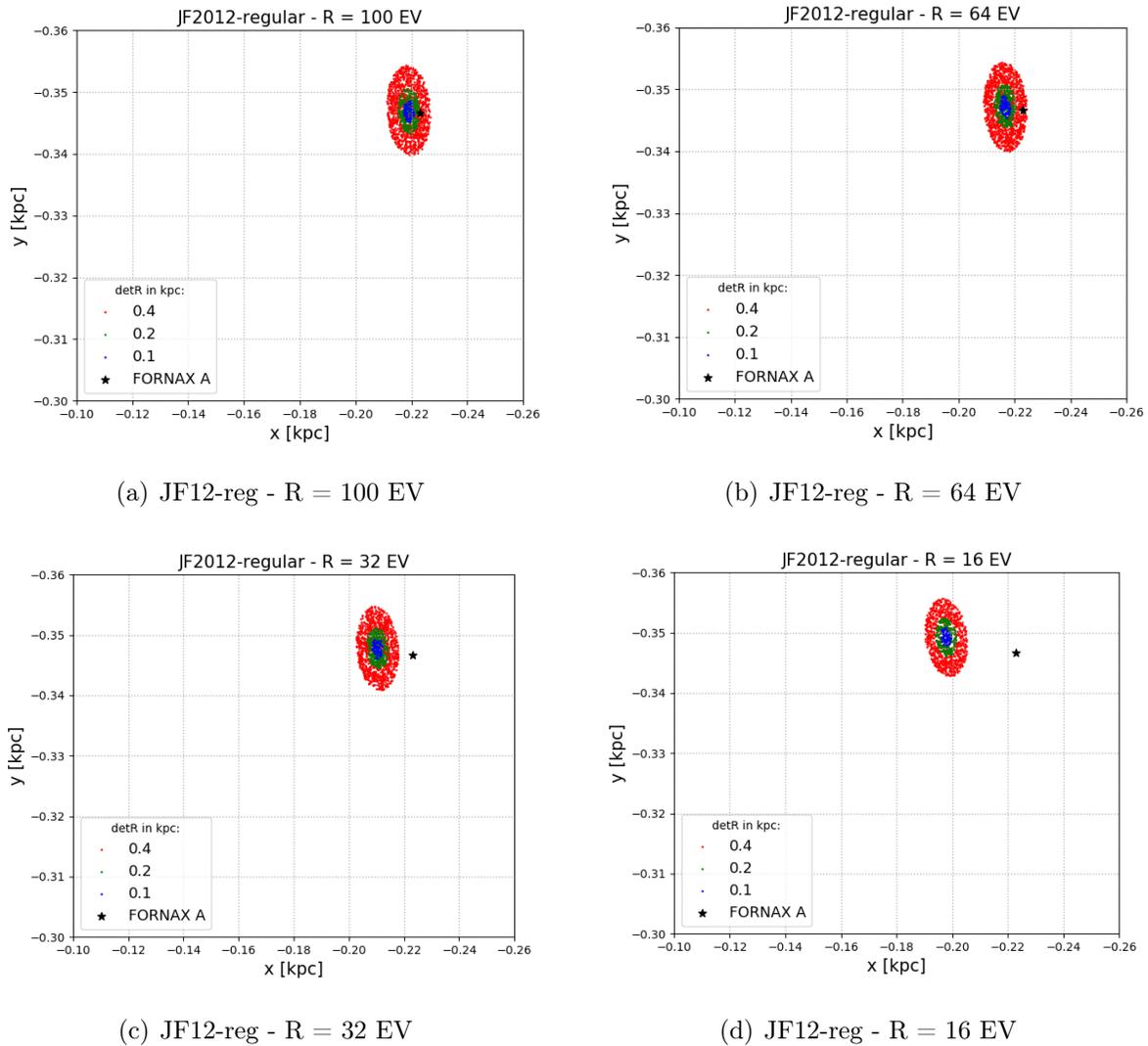


Figura 4.3: Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores, a estrela preta representa a posição do centro de Fornax A. Fonte: Autor.

M87 afastaram-se mais da fonte. As figuras 4.4 (c) e 4.4 (d) destacam claramente que os raios cósmicos provenientes da direção de M87 são expostos a uma deflexão significativamente maior devido à presença do GMF-Regular.

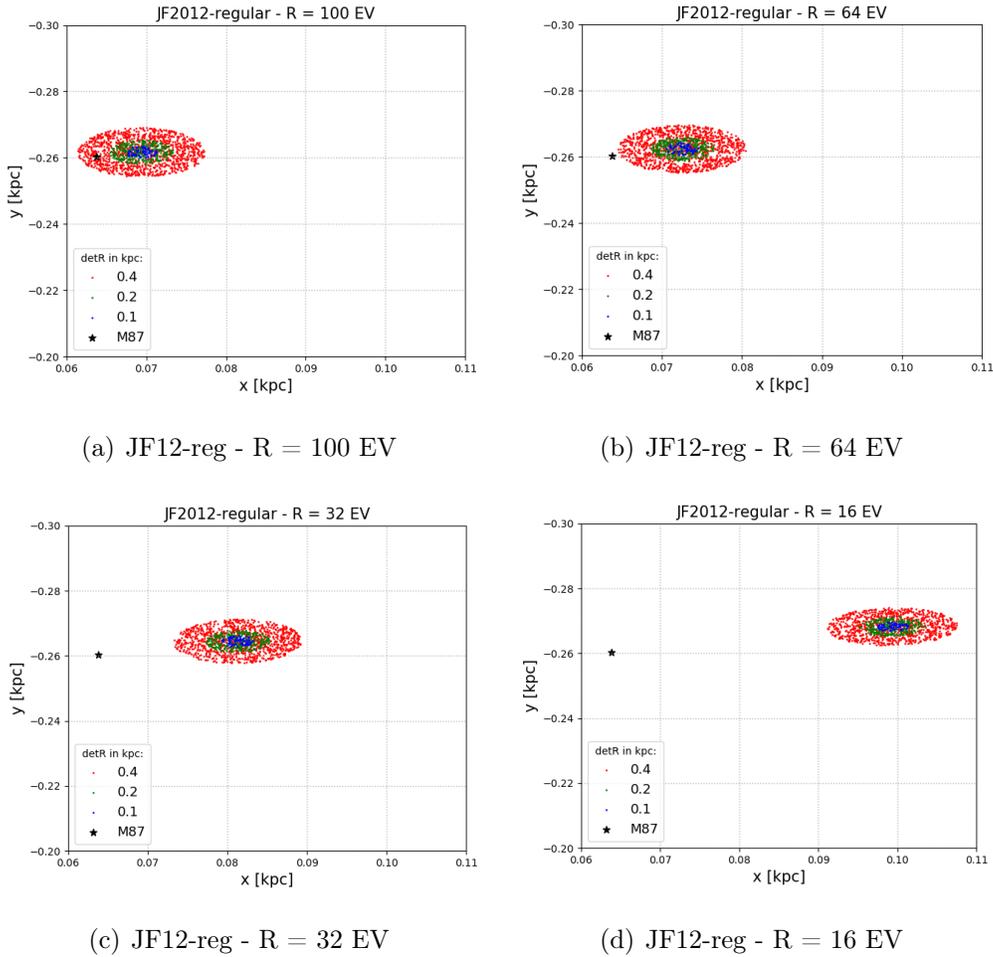


Figura 4.4: Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores, a estrela preta representa a posição do centro de M87. Fonte: Autor.

4.1.2 Posições Finais dos UHECR

As partículas são emitidas das proximidades das fontes, viajam dentro da Galáxia e alcançam o detector situado na Terra. Na seção anterior, investigou-se o impacto do GMF-Regular na propagação de eventos provenientes das regiões das rádio-galáxias. Nesta seção, apresenta-se as distribuições desses UHECR nos detectores, utilizando três tamanhos diferentes para estes, sendo: 0,1 kpc, 0,2 kpc e 0,4 kpc. A análise se concentrou na contribuição da componente regular do campo magnético. A chegada dessas partículas nos detectores determina o rastreamento das posições iniciais, as direções de chegada dos UHECR detectados pelo observatório Pierre Auger

também podem ser vistos em [45]. Portanto, as partículas que emanaram da região de Centaurus A, conforme ilustrado na figura 4.2, estão dispersas em regiões distintas dos detectores, como indicado na figura 4.5. Observa-se que o número de eventos detectados com energias mais baixas é menor, no entanto, as distribuições dos eventos nos detectores são semelhantes.

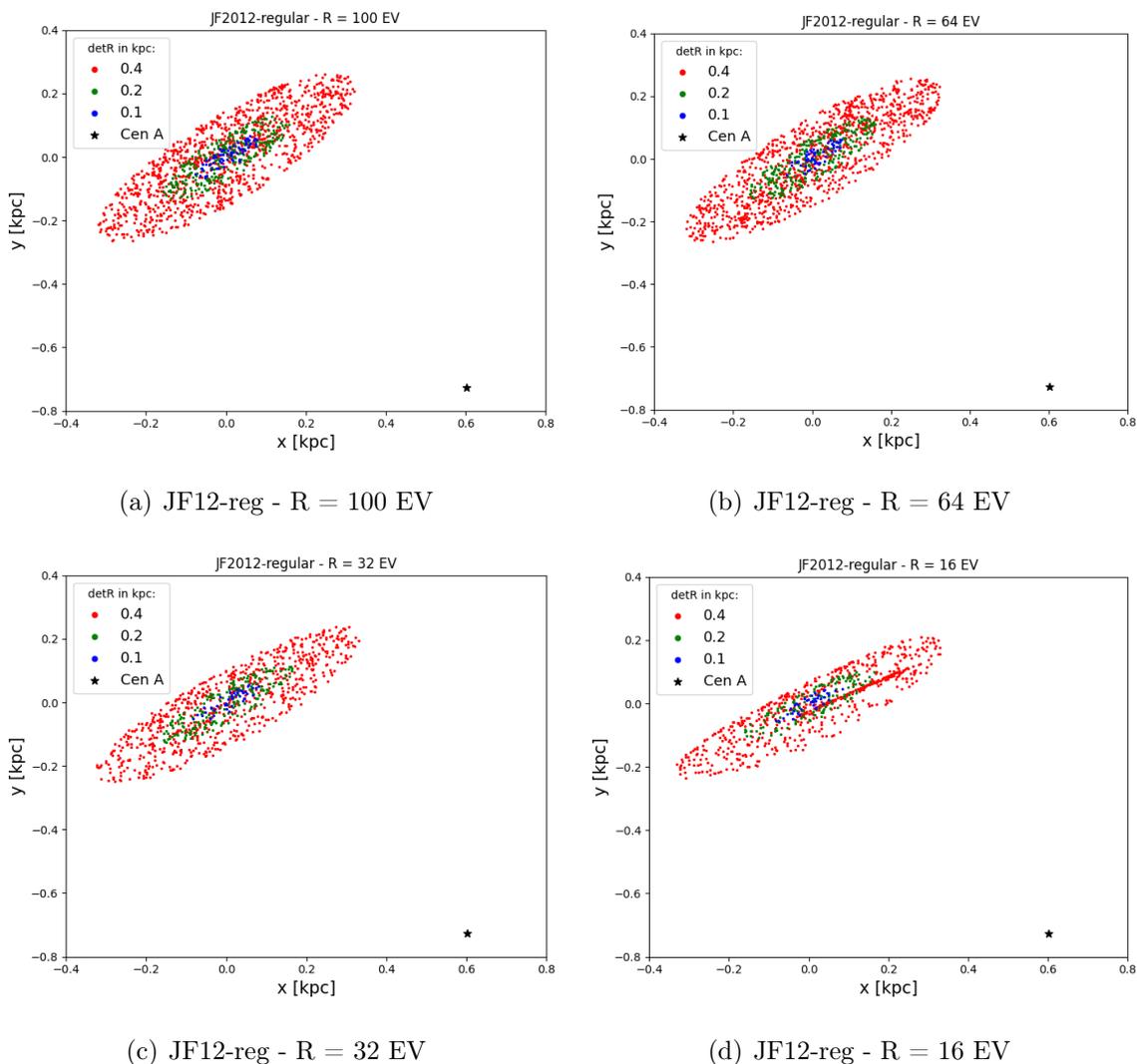


Figura 4.5: Projeção x-y das posições finais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores, a estrela preta representa a posição do centro de Cent A. Fonte: Autor.

Na figura 4.6 apresentam-se as posições de chegada dos UHECR nos detectores provenientes

das regiões próximas à Fornax A. O número de partículas detectadas depende do tamanho do detector e também da rigidez, quanto maior a rigidez menor é a deflexão, portanto maior é o número de partículas com possibilidade de serem detectadas. A estrutura do detector é a mesma para todas as análises deste tópico, o que muda é a posição das fontes e o referencial do observador. O disco está voltado para o campo de visão do leitor. Observa-se claramente uma diminuição no número de eventos para a menor rigidez, figura 4.6 (d).

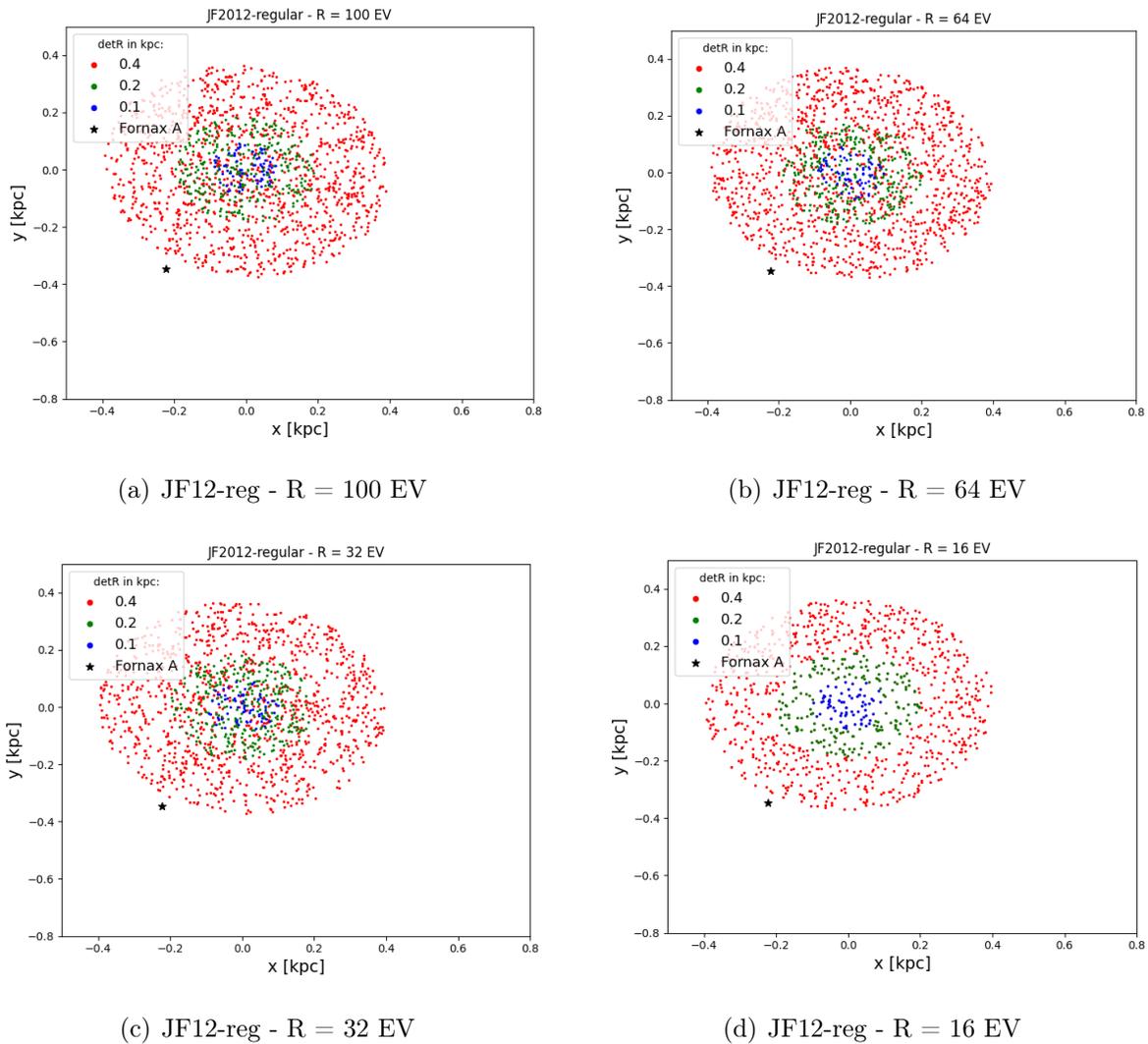


Figura 4.6: Projeção x-y das posições finais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores, a estrela preta representa a posição do centro de Fornax A. Fonte: Autor.

A mesma análise foi conduzida para a Messier 87, como ilustrado na figura 4.7. As distribuições de chegada das partículas no detector são comparáveis, mas estas partículas atingem regiões diferentes dos detectores. As discrepâncias se tornam mais evidentes ao se comparar diferentes componentes do campo JF2012. Além disso, o número de eventos varia consideravelmente, sendo maior em detectores maiores. Conforme mencionado anteriormente, raios cósmicos com maior rigidez sofrem menor deflexão, resultando em uma distribuição mais ampla nos detectores e, conseqüentemente, em um maior número de eventos detectados.

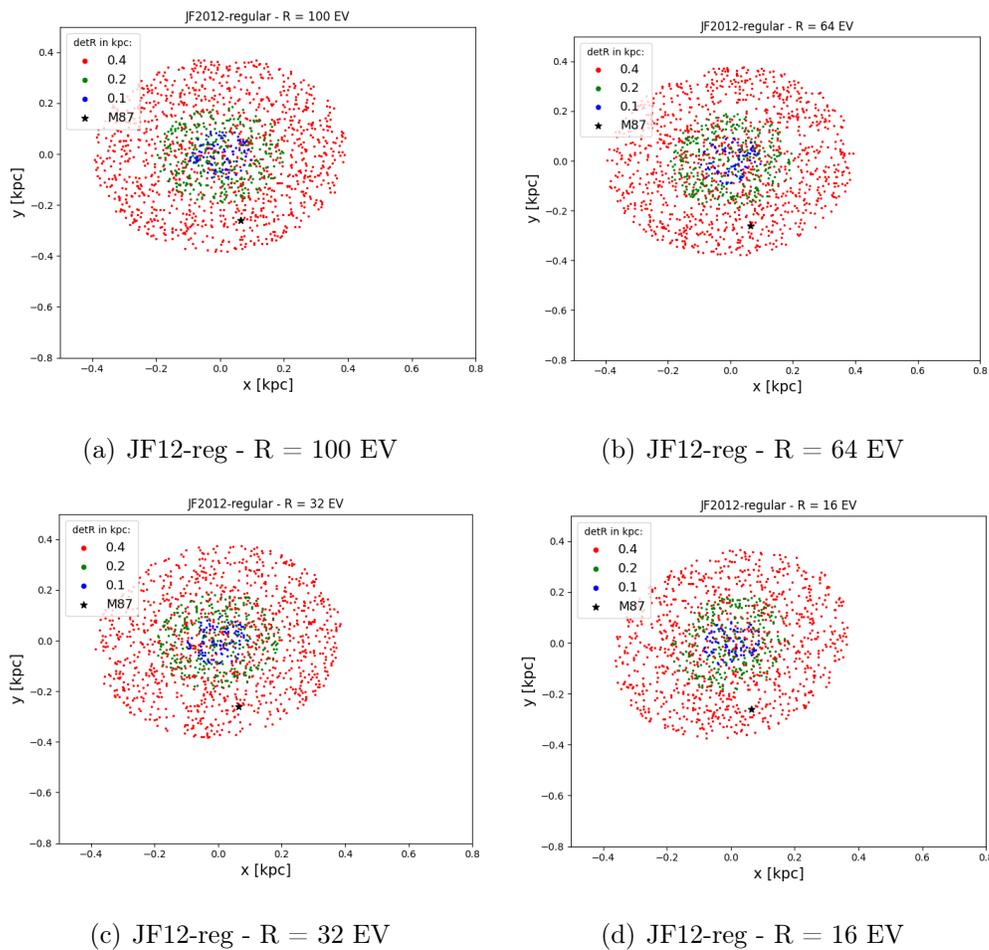


Figura 4.7: Projeção x-y das posições finais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV, 64 EV, 32 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores, a estrela preta representa a posição do centro de Fornax A. Fonte: Autor.

4.1.3 JF2012 - Completo

Na análise 4.1.1 descrevem-se as informações obtidas das posições iniciais/finais dos UHECR nas regiões provenientes das fontes em coordenadas cartesianas utilizando apenas o componente regular do campo JF2012. Nesta seção são apresentados os resultados da distribuição das posições iniciais dessas partículas para as três componentes do campo Jansson-Farrar com uma rigidez de 32 EV, figura 4.8 (a), e duas componentes do campo Jansson-Farrar para 16 EV figura 4.8 (b) em coordenadas cartesianas [kpc], tendo como fonte a radiogaláxia Centaurus A.

Conforme observado anteriormente, o campo regular resulta em uma distribuição de UHECR mais distante da fonte para valores baixos de rigidez. Quando se introduz o campo estriado, as partículas se posicionam um pouco mais próximas à fonte e mais distantes umas das outras. Para o campo randômico, a distribuição dessas partículas varia muito pouco, indicando que esse componente de campo teve pouco impacto nas posições iniciais das partículas. Nesta análise, introduziu-se 500 mil partículas em um disco de 8 kpc projetado na borda da Via Láctea, empregando um detector de 0.4 kpc. O número de partículas detectadas variou ligeiramente, com quase todas as análises resultando em cerca de 1000 UHECR detectados. Observa-se que o tamanho do detector foi o principal fator que influenciou o número de eventos detectados. Esses valores foram selecionados com base em pesquisas anteriores que compararam tamanhos em relação ao raio da Via Láctea, conforme demonstrado em [23].

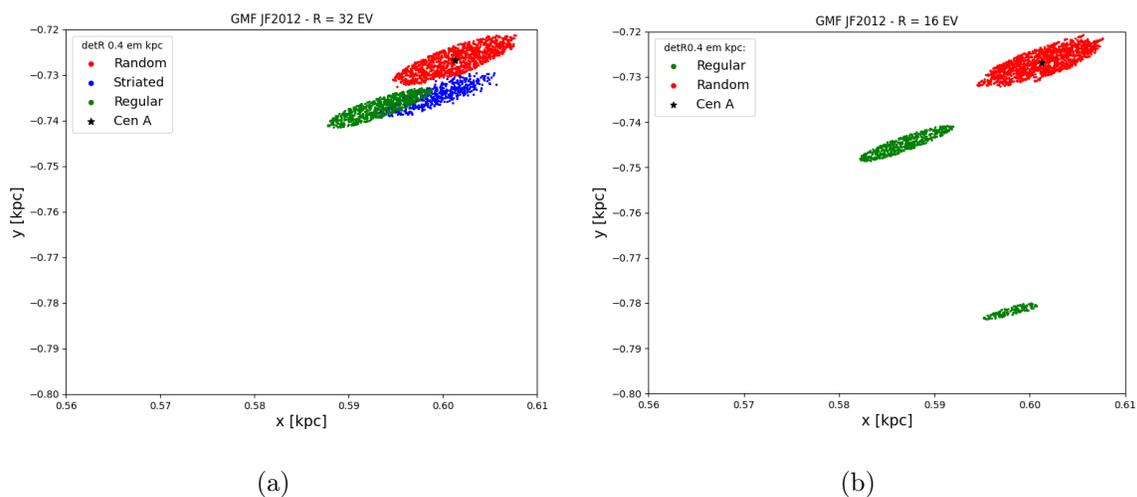


Figura 4.8: Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados com rigidez de 32 EV e com as três componentes do modelo de campo magnético Galáctico JF2012 (a) e rigidez de 16 EV com duas componentes do GMF JF2012 (b). Ambos utilizando um detector de 0.4 kpc. A estrela preta representa a posição do centro de Cen A. Fonte: Autor.

A descrição das posições de chegada das partículas no detector permite rastrear suas posições iniciais. A figura 4.9 (a) exhibe os resultados das posições finais no detector considerando as diferentes componentes do campo. Observa-se uma distribuição mais aleatória dessas partículas, como era esperado. O mesmo ocorre com a componente estriada. No entanto, na figura 4.9 (b) fica evidente que as partículas tendem a se concentrar mais no centro do detector quando o campo regular está presente. Tal situação leva a compreender a influência da estrutura e intensidade do campo nesse processo de propagação dos UHECR.

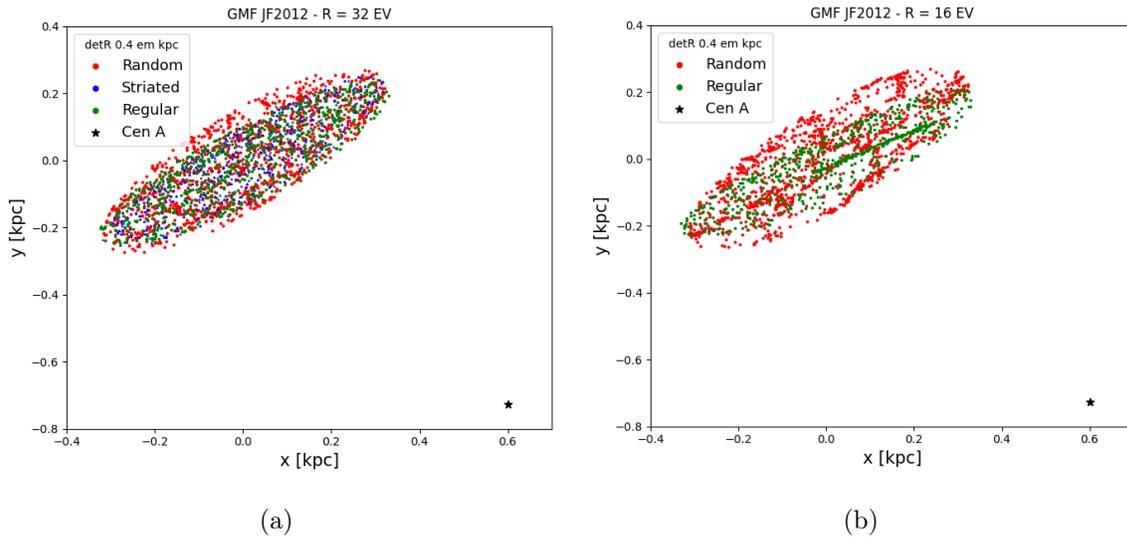


Figura 4.9: Projeção x-y das posições finais dos eventos simulados com rigidez de 32 EV e com as três componentes do modelo de campo magnético Galáctico JF2012 (a) e rigidez de 16 EV com duas componentes do GMF JF2012 (b). Ambos utilizando um detector de 0.4 kpc. A estrela preta representa a posição do centro de Cen A. Fonte: Autor.

4.1.4 Campo Randômico em Coordenadas Galácticas

Explorou-se o efeito do campo magnético Galáctico nas direções observadas dos eventos detectados em coordenadas galácticas para o componente randômico e rigidez de 32EV e 16EV, por meio dos dados obtidos nas simulações deste estudo. Centaurus A, nesta análise, está localizada em latitude de 19.4° e longitude de -50.4° , Fornax A está centralizada em uma latitude de 56° e longitude de $\sim 119^\circ$ e a M87 está em uma latitude de $\sim 74^\circ$ e longitude de $\sim -76^\circ$.

A figura 4.10 exhibe as direções observadas dos UHECR detectados em coordenadas galácticas na presença do modelo GMF JF2012 randômico, com rigidez de 32 EV e 16 EV, para as fontes Centaurus A, Fornax A e Messier 87. Pode-se observar de forma mais clara o efeito do campo randômico na distribuição dessas partículas em diferentes níveis de rigidez. Para uma rigidez de 16 EV, nota-se que as partículas se distribuem de forma mais aleatória, sugerindo indícios de que as partículas de energia mais alta podem ter origem no centro das fontes extragalácticas.

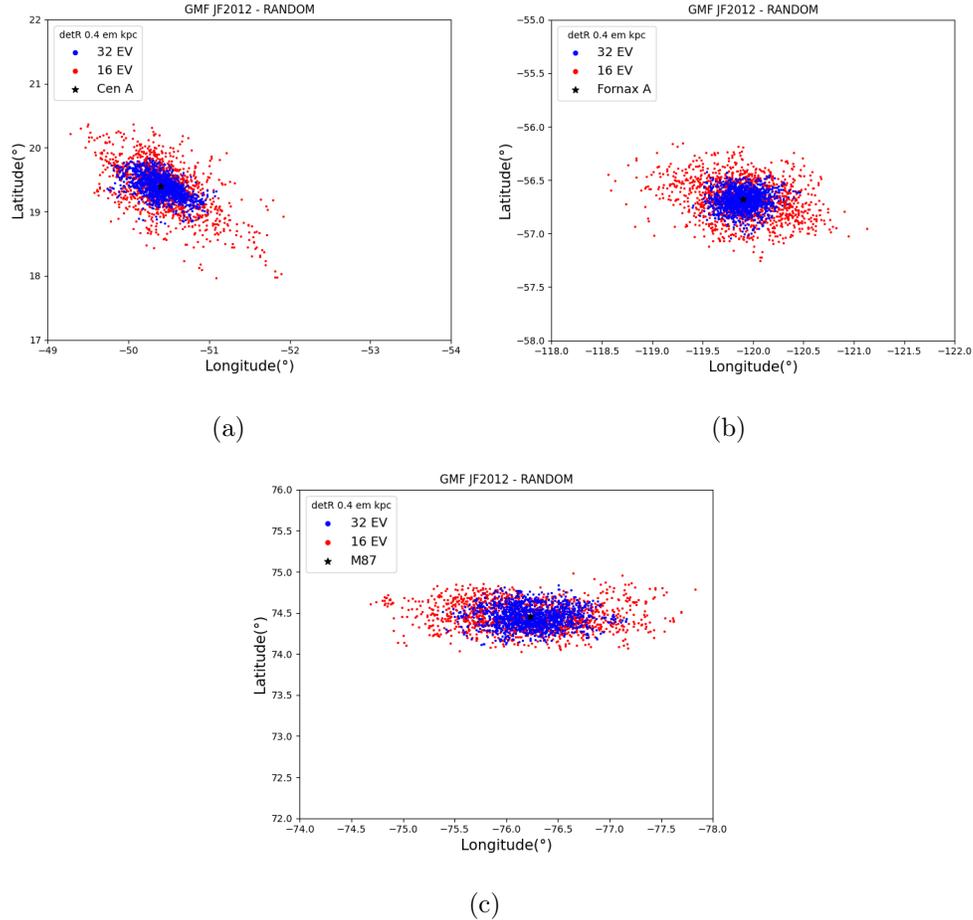


Figura 4.10: Direções observadas dos eventos detectados em coordenadas Galácticas utilizando o modelo de campo JF2012, para rigidez de 32 EV e 16 EV, para as três radiogaláxias. Fonte: Autor.

4.2 Deflexões em *Skymaps*

As informações sobre a distribuição final dessas partículas detectadas em coordenadas cartesianas também podem ser obtidas em coordenadas galácticas em *skymap*, permitindo uma visualização ampla do efeito do campo. Para reforçar os resultados sobre as posições finais dessas partículas, realizou-se verificações em coordenadas galácticas com as mesmas rigidezes anteriores, além de rigidezes ainda menores, como 10 EV e 4 EV. A figura 4.11 apresenta um *skymap* com a representação das posições finais das partículas para energias mais altas, variando de 32 EV a 100 EV. Os resultados são análogos à análise anterior, com a possibilidade de observar as três fontes juntas. Na região de Centaurus A, pode-se observar partículas de energia mais

baixa próximas à fonte em comparação com as outras duas fontes. Na região da Fornax A, as partículas de 4 EV estão localizadas bem distantes da fonte, enquanto na M87, as partículas de energia mais baixa, como 4 EV, não são detectadas, vide figura 4.12.

Ao observar as figuras 4.11 e 4.12, conclui-se que os raios cósmicos de ultra-alta energia devem ser originados de regiões próximas às fontes extragalácticas na hipótese de não haver processos de perda de energia, conforme a análise. No entanto, essa situação muda quando se analisam raios cósmicos com energia mais baixa, os quais são muito afetados pelo campo magnético Galáctico. Isso leva à conclusão que no estudo de propagação de UHECR é necessário considerar o efeito do GMF e, em especial, a componente regular do campo.

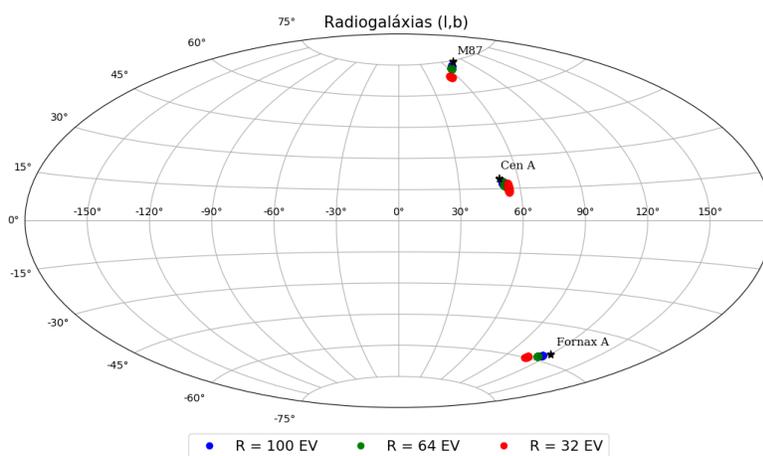


Figura 4.11: Posições finais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos de 100 EV, 64 EV e 32 EV, as estrelas pretas representam as radiogaláxias, os pontos as posições das partículas detectadas com suas respectivas energias. Fonte: Autor.

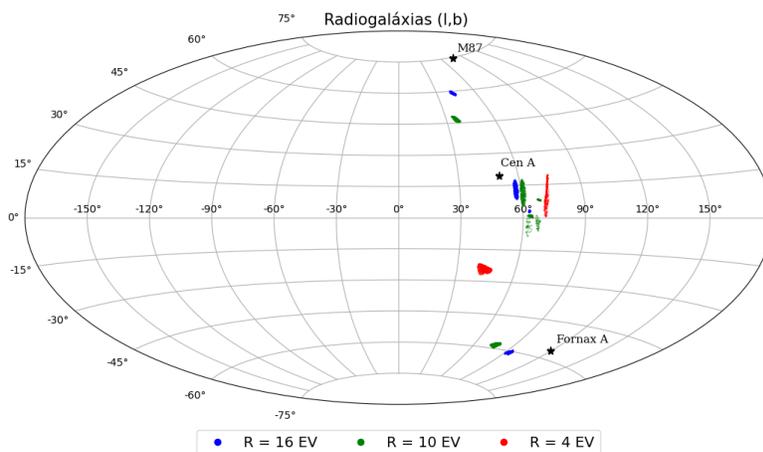


Figura 4.12: Posições finais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos de 16 EV, 10 EV e 4 EV, as estrelas pretas representam as radiogaláxias, os pontos as posições das partículas detectadas com suas respectivas energias. Fonte: Autor.

4.3 Análises gerais de Deflexões de UHECR

Este estudo teve como objetivo investigar o efeito do GMF na propagação de partículas ultra energéticas quando estas entram na Galáxia. Foram simuladas 1 milhão de partículas isotropicamente, incluindo núcleos como He, N, Si e Fe, sendo analisadas apenas as partículas que adentram à Galáxia na região das radiogaláxias. Durante esse processo, também se considerou um espectro na fonte com índice espectral de 1.7 e energia máxima e mínima variando. Nesta análise adotou-se as três componentes do campo Jansson-Farrar [28].

A figura 4.13 apresenta as posições de origem de UHECR que foram detectados ao redor das fontes de Centaurus A, Fornax A e M87. Neste plot há uma energia variando entre 40 EeV e 316 EeV. Limitou-se uma região de até 2 graus ao redor de cada fonte, as partículas mais leves, como de He e de N, encontram-se centradas em regiões bem próximas às fontes, já as partículas com núcleos mais pesados, como o Si e o Fe, estão mais distribuídas em regiões distantes. Realizou-se a mesma análise anterior, considerando raios de 5° e 8° ao redor de cada fonte, figuras 4.14 e 4.15. Claramente o número de eventos detectados foram maiores, mostrando regiões de onde as partículas poderiam originarem-se.

Observou-se que as partículas de núcleos mais pesados se encontram em posições bastante aleatórias, quando aumentado o raio para 8° percebeu-se que a dispersão é bem maior, figura 4.15. Para uma análise mais precisa das regiões próximas às fontes o raio de 2° torna-se mais

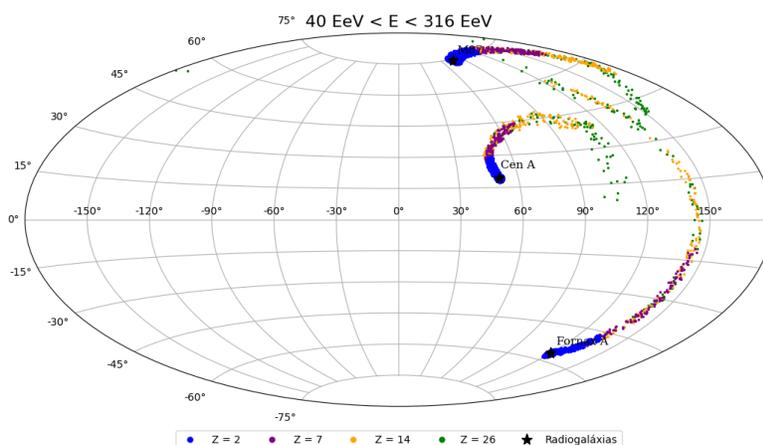


Figura 4.13: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $40 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor.

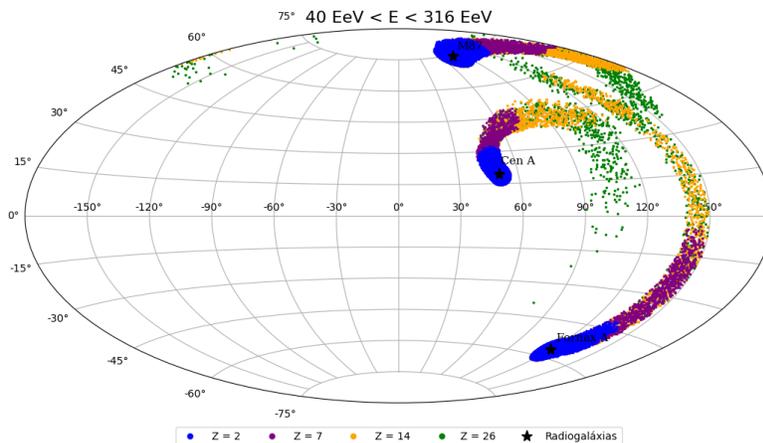


Figura 4.14: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $40 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor.

relevante.

Sabe-se que as partículas de menores energias sofrem maiores deflexões, em razão disso avaliou-se a variação de energia na simulações. Nos próximos plots a mesma análise foi rea-

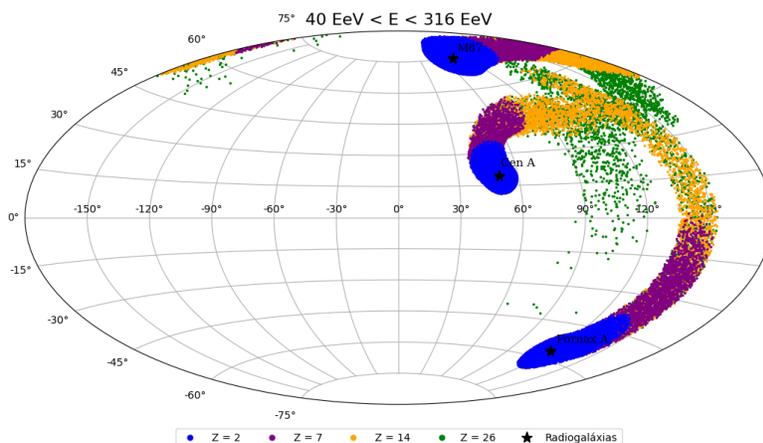


Figura 4.15: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 8 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $40 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor.

lizada com energias a partir de 70 EeV e 100 EeV, respectivamente. A figura 4.16 ilustra essa análise com um raio inicial de 2° ao redor da fonte e energias variando entre $70 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Núcleos mais leves como de He desintegram-se e não sobrevivem a energias altas, por conta disso, o elemento He não se faz relevante para as faixas de energia de $70 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$ e também a de $100 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$ [28].

Para uma faixa de altíssima energia como $E \leq 10^{11} \text{ GeV}$ as contribuições são de núcleos mais pesados apenas, como o Si e o Fe, devido ao efeito de fotodesintegração dos núcleos mais leves [28]. Isso explica a distribuição dos UHECR ilustrada nas figuras 4.19 a 4.22, com raios de 2, 5 e 8 graus, respectivamente. Essas partículas saem dessas regiões e chegam até a fonte, as simulações trazem informações de onde essas partículas vieram e quais são as possíveis posições iniciais delas no *skymap*. Para núcleos mais pesados é possível avaliar apenas altíssimas energias devido ao grande efeito do campo magnético Galáctico.

As partículas que se encontram em suas posições iniciais nas fontes podem chegar até à Terra e serem detectadas. Quando essas partículas entram na galáxia elas sofrem a influência do GMF e, após esse contato com o campo magnético Galáctico, essas partículas são distribuídas por toda Galáxia, algumas acabam escapando devido à intensidade do campo magnético [28]. A figura

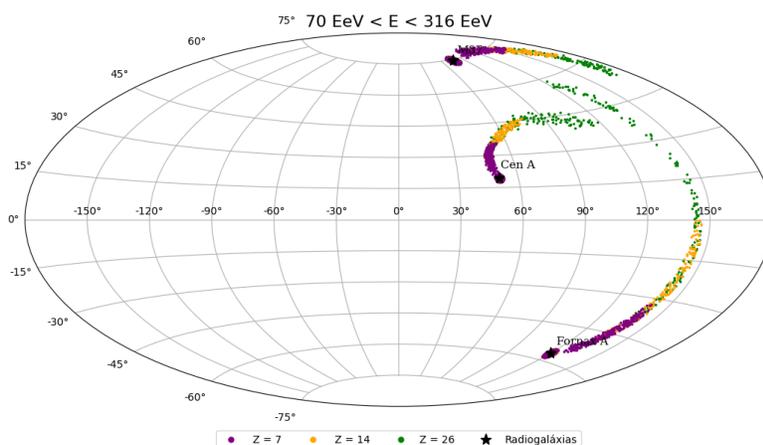


Figura 4.16: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $70 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor.

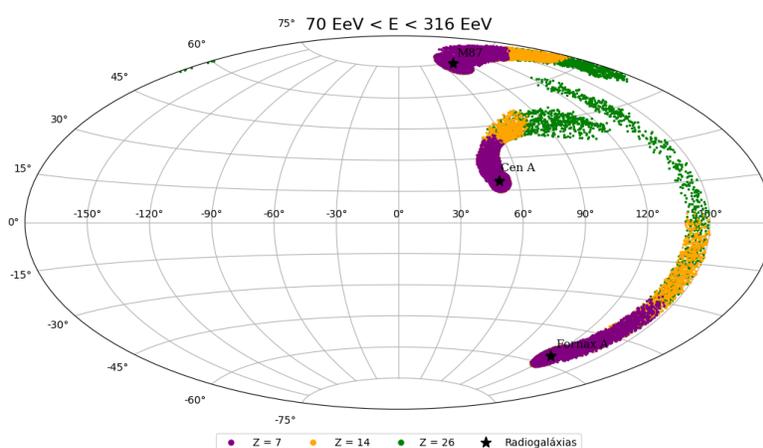


Figura 4.17: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $70 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor.

4.22 ilustra as posições finais das partículas que entraram na Galáxia na direção das radiogaláxias aqui estudadas. Comparando os plots 4.13 e 4.22, observa-se que não existe correlação entre a entrada da partícula e sua detecção próxima à região da fonte, isto mostra o efeito do campo na propagação das partículas dentro da Galáxia e sua importância no estudo de identificação de fontes de raios cósmicos de altas energias.

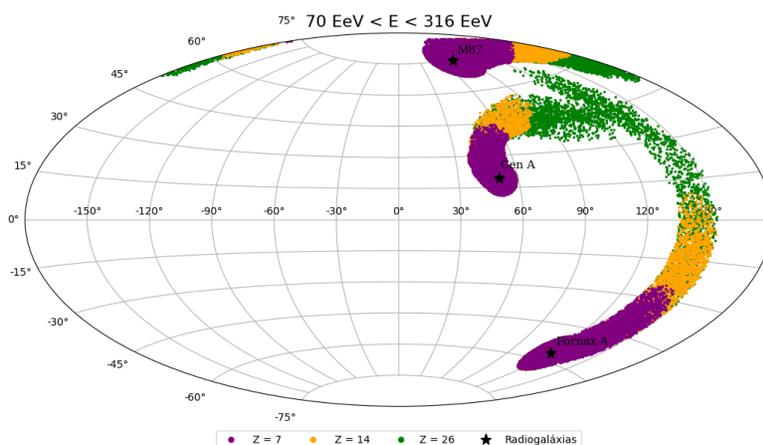


Figura 4.18: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 8 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $70 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor.

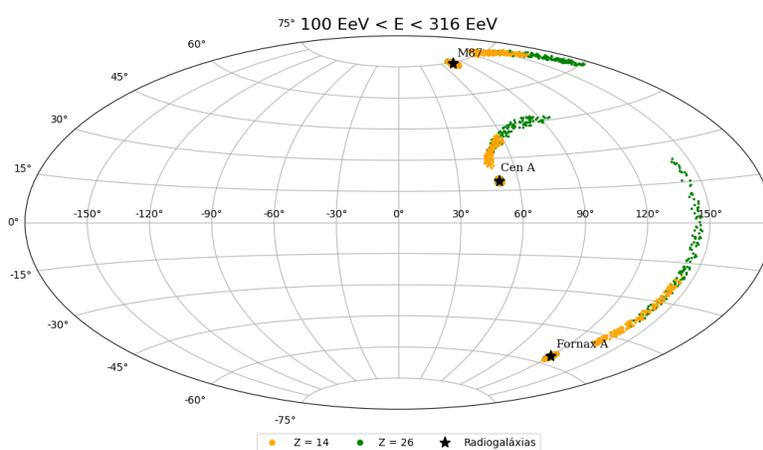


Figura 4.19: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $100 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor.

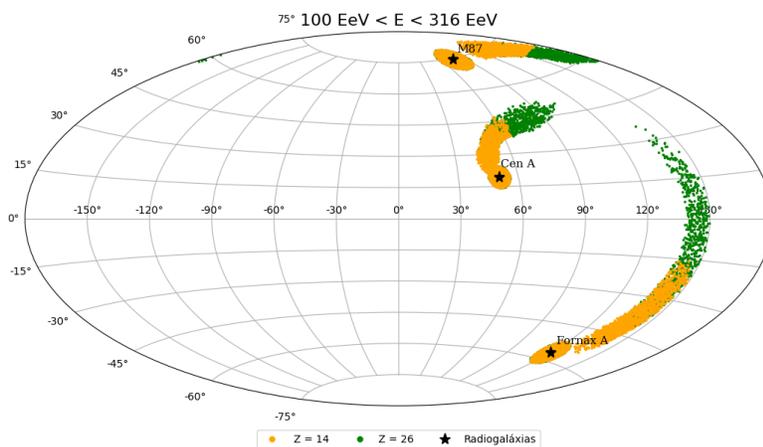


Figura 4.20: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $100 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor.

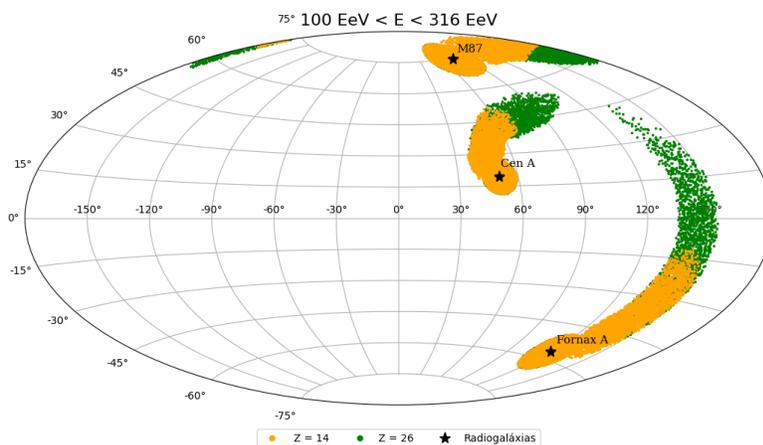


Figura 4.21: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 8 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $100 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Autor.

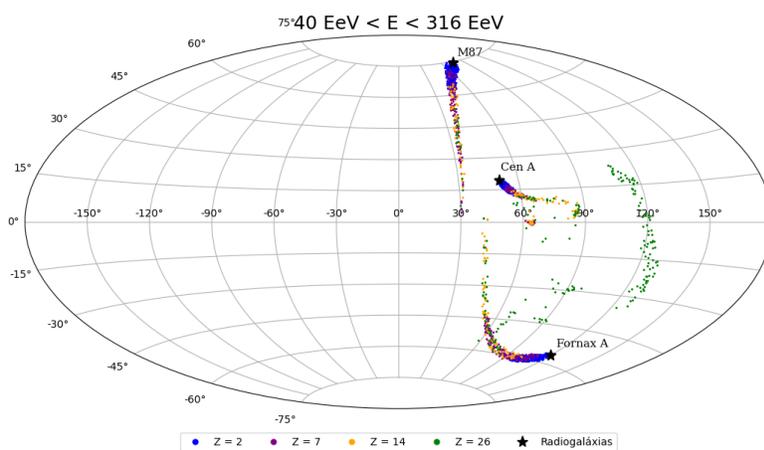


Figura 4.22: Posições finais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos que entraram na Galáxia na posição das radiogaláxias, considerando um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $40 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Fonte: Retirado de [28].

Considerações Finais

Na presente dissertação, explorou-se as possíveis fontes de raios cósmicos de ultra-altas energias, levando em consideração dados das distribuições de direções de chegada dessas partículas, nas regiões das rádiogaláxias. Estudou-se a respeito dos modelos de campos magnéticos galácticos e foi aplicado o mais atual e mais aprimorado nas simulações, o modelo JF2012.

Abordou-se, primeiramente, no Capítulo 1 uma revisão que envolve a propagação dos UHECR, desde a importância do espectro de energia até a contribuição do Observatório Pierre Auger. Ainda apresentou-se a composição dessas partículas e a análise da anisotropia, mencionando, também, o diagrama de Hillas que relaciona o processo de aceleração desses UHECR e as possíveis fontes destas partículas.

No Capítulo 2, foram estudadas e descritas as três possíveis fontes de UHECR, sendo elas: Centaurus A, Fornax A e M87, escolhidas através de dados obtidos pelo Observatório Pierre Auger, que mostra a relevância do estudo de UHECR nessas regiões.

Investigou-se o comportamento das partículas provenientes das possíveis fontes, com a presença do modelo do campo magnético galáctico Jansson Farrar descrito no Capítulo 3. Obteve-se informações das distribuições das posições iniciais dessas partículas nas fontes ou próximas às fontes, e também dados de ângulo de deflexões dessas partículas ao entrarem na Via Láctea.

No Capítulo 4 discorreu-se todo processo de análise dessa dissertação. Os primeiros dados obtidos foram a respeito da deflexão de UHECR, utilizando uma rigidez de 100 EV e um detector de 0.4 kpc, onde no eixo y do plot tem-se o ângulo de magnitude dado em graus e no eixo x a energia em EeV, nesta análise foi utilizado a componente regular do modelo JF2012.

Os mesmos parâmetros foram utilizados nas três possíveis fontes e se observou que a radiogaláxia Fornax A foi a que menos defletiu, ou seja, sofreu pouca influência do campo magnético galáctico, apresentando também uma boa distribuição de partículas de mais alta energia por

energia. Por sua vez, as partículas detectadas originizadas da Centaurus A, sofreram uma maior deflexão comparada com a Fornax A, porém a distribuição de partículas de mais alta energia foi maior, sendo detectadas partículas de até 100 EV, a M87 entre as outras duas foi a que mais sofreu a influência do campo magnético galáctico tendo uma deflexão maior e uma distribuição de partículas de mais altas energias, assim como a Fornax A.

A segunda análise deu-se com intuito de verificar as posições iniciais dessas partículas detectadas na fonte em coordenadas cartesianas, neste processo variou-se a rigidez e os tamanhos dos detectores. As partículas de rigidez maior, como de 100 EV e 64 EV, mostraram-se próximas às fontes, em rigidezes menores as partículas se encontram ao redor das fontes. A Centaurus A e a Fornax A apresentaram resultados parecidos, já a M87 mostrou, novamente, que sofre bastante as influências do campo JF2012, nessas regiões as partículas se encontram distantes da fonte. Como já discutido anteriormente, o programa utilizado fornece as posições iniciais e finais das partículas. Analisando-se as posições finais observou-se a distribuição dessas partículas em termos de concentrações e as diferenças devido às posições das fontes e do referencial de observação.

A terceira análise expõe as posições finais dos UHECR próximos as radiogaláxias em coordenadas galácticas e, novamente, para rigidezes maiores essas partículas se concentram próximas às fontes e rigidezes menores se mostram distantes, a M87 para um rigidez de 4 EV não apresenta nenhuma partícula detectada, assim, acredita-se, que a intensidade do campo seja maior nessa região.

A última análise fecha a discussão desta dissertação, apresentando-se uma análise das posições de entrada na Galáxia e finais de eventos isotrópicos simulados em Skymap. Filtraram-se os UHECR nas direções das fontes na entrada da Galáxia, utilizando raios de 2° , 5° e 8° ao redor de cada fonte, obtendo-se informações que mostram a posição final destas partículas. O contrário também foi realizado, a partir das posições finais aos redor das galáxias aqui estudadas, de eventos simulados isotropicamente, obteve-se sua posição inicial ao entrarem na Via Láctea. A análise mostrou que as partículas de núcleos mais pesados se encontram distantes das fontes, o que já era esperado, no entanto, as duas análises destacam resultados bem diferentes, deixando claro a randomicidade do campo magnético galáctico.

Em futuros estudos pretende-se explorar mais as análises aqui descritas, assim como outras componentes do campo magnético galáctico Jansson Farrar. O objetivo é explorar o efeito do campo magnético para assim contribuir com a descoberta de fontes de UHECR.

Referências Bibliográficas

- [1] BUSTAMANTE, M. C. A descoberta dos raios cósmicos ou o problema da ionização do ar atmosférico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 2, 2603, 2013. 9
- [2] LINSLEY, J. **Phys. Lett.** 10. 146 (1963). 9
- [3] BATISTA, R. A. et al. Open Questions in Cosmic-Ray Reserarch at ultrahigh energies. **Front. Astron. Space Sci.** v. 6, n.23, 2019. [<https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00023>]. 9
- [4] RIEGER, F. M. **Active Galactic Nuclei as Potential Sources of Ultra-High Energy Cosmic Rays**. 2022. [arXiv:2211.12202v1]. 9
- [5] 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. 4, e20190118, 2019. 9, 12, 13
- [6] OBSERVATORY Pierre Auger. **The Pierre Auger Observatory and its Upgrade**. Argentina, 2020. 14
- [7] The Pierre Auger Collaboration et al. Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above 8×10^{18} eV. **Science**, v. 357, p. 1266-1270, 2017. [DOI:10.1126/science.aan4338]. 10
- [8] FARRAR, G. R.; JANSSON, R. A new model of the galactic magnetic field. *The Astrophysical Journal*, v. 757, n. 1, p. 5-11, 2012. 10, 29, 36, 37
- [9] SUTHERLAND, M. S.; BAUGHMAN, B. M.; BEATTY, J. J. CRT: A Numerical Tool for Propagating Ultra-High Energy Cosmic Rays Through Galactic Magnetic Field Models. *Astroparticle Physics*, v. 34, n. 4, p.2-3, 2010. 10

- [10] STANEV, T. **High energy cosmic rays**. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 12
- [11] DOVA, M. **Ultra-High-Energy Cosmic Rays**. CERN, 2015. Disponível em: <<https://cds.cern.ch/record/2019742>>. Acesso em: 4 ago. 2023. 13
- [12] PTUSKIN, V.; STRELNIKOVA, O.; SVESHNIKOVA, L. **On leaky-box approximation to GALPROP**. 2009. 13
- [13] EVOLI, C. **The Cosmic Ray Spectrum**. [10.5281/zenodo.4396125]. vi, 13
- [14] OWEN, E. R. et al. Ultra high-energy cosmic rays from beyond the Greisen-Zatsepin-Kuz'min horizon. **The Astrophysical Journal**, v. 922, n. 1. Draft version July 28, 2021. [arXiv:2107.12607v1]. 13
- [15] AUGER, P. Observatório. Disponível em: <<https://visitantes.auger.org.ar/index.php/detectores-de-fluorescencia/>>. Acesso em: 7 jun. 2023. vi, 14, 15
- [16] ANJOS, R. C. **Propagação de raios cósmicos extragaláticos**. São Carlos: [s.n.], 2014. 15 16
- [17] ARMAND, J. P. **Anisotropias no Fluxo de Raios Cósmicos de Ultra Altas Energias**. São Paulo, 2018. 16
- [18] OLIVEIRA, C. **Fontes locais de raios cósmicos ultra energéticos**. São Carlos, 2021. 17, 26
- [19] BATISTA, R. A. **Open Questions in Cosmic-Ray Research at Ultrahigh Energies**. 2019.[<https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00023>]. vi, 18
- [20] ANCHORDOQUI, L. A. Ultra-high-energy cosmic rays. **Physics Reports**, v. 801, p. 1-93, 2019. 19
- [21] EHLERT, S. R.; et al. Limits on X-Ray Polarization at the Core of Centaurus A as Observed with the Imaging X-Ray Polarimetry Explorer. **The Astrophysical Journal**, 935:116 (10pp), 2022 August 20. 19
- [22] RIEGER, F. M. Active Galactic Nuclei as Potential Sources of Ultra-High Energy Cosmic Rays. *Universe* 2022, 8, 607. [<https://doi.org/10.3390/universe8110607>]. 19

- [23] KEIVANI, Azadeh. "Magnetic deflections of ultra-high energy cosmic rays from **Centaurus A**"(2013). LSU Doctoral Dissertations. 2426. vi, vii, 19, 32, 33, 35, 41, 49
- [24] FARRAR, G. R.; JANSSON, R.; FEAIN, I. J.; GAENSLERC, B. M. **Galactic magnetic deflections and Centaurus A as a UHECR source**. [arXiv:1211.7086v1][astro-ph.HE] 29 Nov 2012. 20
- [25] AUGER, P. **Arrival Directions of Cosmic Rays above 32 EeV from Phase One of the Pierre Auger Observatory**. 2022. [arXiv:2206.13492v2]. vi, 20
- [26] CEDIC, Team. **Chilescope**. HUBL, B. Disponível em: <<https://apod.nasa.gov/apod/ap180712.html>>. Acesso em: 20 jun. 2023. vi, 22
- [27] LORENZI, M.; LAU, A.; TSE, T. **Centaurus A: Uma Ilha Peculiar de Estrelas**. Disponível em: <<https://apod.nasa.gov/apod/ap230503.html>>. Acesso em: 20 jun. 2023. vi, 22
- [28] ANJOS, R. C. et al. Ultrahigh-Energy Cosmic Ray Composition from the Distribution of Arrival Directions. **Phys. Rev. D.**, v. 98, n. 12, p. 123018, 2018. vi, ix, x, 23, 24, 40, 54, 56, 60
- [29] MATTHEWS, J. H.; BELL, A. R.; BLUNDELL, K. M.; ARAUDO, A. T. Fornax A, Centaurus A and other radio galaxies as sources of ultra-high energy cosmic rays. **MNRAS**, v. 479, n. 1, p. L76–L80, 2018. [arXiv:1805.01902v2]. x, 23, 24
- [30] ASABERE, B. D.; HORELLOU, C.; JARRETT, T. H. WINKLER, H. Mid-infrared dust in two nearby radio galaxies, NGC 1316 (Fornax A) and NGC 612 (PKS 0131-36). **Astronomy & Astrophysics**, v. 592, p. A20, 2016. 25
- [31] NASA, ESA, Hubble Heritage Team. Disponível em: <<https://hubblesite.org/content/media/images/2005/11/1671-Image.html?>>>. Acesso em: 12 jun. 2023. vi, 25
- [32] NASA, Hubble Heritage Team. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/messier-87>>. Acesso em: 12 jun. 2023. vi, 26, 27
- [33] Instituto de Física, USP. Disponível em: <<https://portal.if.usp.br/imprensa/pt-br/node/1920>>. Acesso em: 24 ago. 2023. 27

- [34] NEVES, S. C. J. O buraco negro e sua sombra. Revista **Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0216>. 27
- [35] OLIVEIRA, C.; SOUZA, V. Magnetically Induced Anisotropies in the Arrival Directions of Ultra-highenergy Cosmic Rays from Nearby Radio Galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 925, n. 1, p. 42, 2022. 29
- [36] DAVIS JR, L.; GREENSTEIN, J.L. The Polarization of Starlight by Aligned Dust Grains. **Astrophysical Journal**, v. 114, p. 206, set. 1951. 30
- [37] MATHEWSON, D. S.; FORD, V. L. Polarization Observations of 1800 Stars. **Memoirs of the Royal Astronomical Society**, v. 74, p. 139, jan. 1970. vi, 30
- [38] LAWRENCE, M. W. Origin of galactic and extragalactic magnetic fields **Reviews of Modern Physics**, v. 74, n. 3, p. 775, 2002. 31
- [39] VERSCHUUR, G. L. 1969, Fundamentals of Cosmic Physics. *The Astrophysical Journal*, 861. 1979, , 5, 113. 31
- [40] FARRAR, G. R. The Galactic magnetic field and its lensing of ultrahigh energy and Galactic cosmic rays. *Astronomy in Focus*, XXIXB, **Focus Meeting 18 XXIXth IAU General Assembly**, August 2015 Piero Benvenuti, ed. 33
- [41] FARRAR, G. R. **The Galactic magnetic field and ultrahigh-energy cosmic ray deflections**. Published by Elsevier Masson SAS on behalf of Académie des sciences, 2014. 33
- [42] UNGER, M.; FARRAR, G. R. New Models of the Coherent Galactic Magnetic Field. 38th **International Cosmic Ray Conference (ICRC2023)** 26 July - 3 August, 2023 Nagoya, Japan. 34
- [43] JANSSON, R.; FARRAR, G. R.; The Galactic Magnetic Field. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 761, p. L11 (5pp), 2012, December 10. 34, 35, 37
- [44] BATISTA, R. A. **Da Deflexão de Raios Cósmicos Ultra-Energéticos no Campo Magnético Galáctico**. fev. 2012. 120 p. Dissertação (Mestrado) Ð Universidade Estadual de Campinas - Instituto de Física “Gleb Wataghino”, Campinas, fev. 2012. 40

- [45] OLIVEIRA, J. S. **Estudo em multirresolução de anisotropias nas direções de chegada dos raios cósmicos detectados no Observatório Pierre Auger**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Fluminense, Instituto de Física, Niterói, 2016. Bibliografia: p.147-156. 46