

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

Larissa Cristina Santos¹ e Rita de Cássia dos Anjos^{1,2}

¹Universidade Federal da Integração Latino-Americana

²Universidade Federal do Paraná

Resumo

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 radiogaláxias 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 da energia, 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.

Abstract

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 radio 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: energy rigidity, distance from the source to the 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.

Palavras-chave: astrofísica extragaláctica, raios cósmicos, campos magnéticos

Keywords: extragalactic astrophysics, cosmic rays, magnetic fields

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44960](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44960)

1 Introdução

O estudo de raios cósmicos iniciou-se aproximadamente em 1900 e seu marco deu-se em 1912, com o físico Austríaco Victor Hess. Hess realizou experimentos 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 primei-

ros 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. 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, em sua maioria, são provenientes de fontes Galácticas, como supernovas, já os UHECR ainda não possuem fontes totalmente definidas, mas, através de estudos já realizados [3, 4] é possível analisar as prováveis fontes dessas partículas.

2 Raios cósmicos de energia ultra-alta (UHECR)

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 próximas [4, 5]. O espectro de energia de raios cósmicos permite analisar o fluxo de partículas por energia e é representado através de uma lei de potência [6], conforme a expressão:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha}, \quad (1)$$

onde α representa o índice espectral. As partículas de altas energias, ou seja, na faixa de 10^{18} eV (EeV) estão localizadas na região conhecida como “tornozelo” [6]. Para o estudo dos UHECR utilizam-se os dados do Observatório Pierre Auger, localizado em uma região conhecida como Pampa Amarilla, na Argentina. Este Observatório é o maior na detecção de partículas altamente energéticas, a sua área de detecção fica concentrada em Mendoza, na Argentina. No processo de detecção, o observatório utiliza principalmente dois métodos independentes: detectores de superfície e de fluorescência [7].

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 varia, indo de núcleos considerados mais “leves”, até núcleos mais “pesados”, como exemplo, Ni, Si e Fe. Essas partículas interagem com outros núcleos durante sua propagação, o que gera decaimentos e geração de partículas secundárias [8]. Com a chegada dessas partículas na atmosfera terrestre ocorre a formação dos chuviscos atmosféricos, que são detectados pelos observatórios. O fluxo por energia dessas partículas presentes nos chuviscos está associado às informações sobre a composição desses UHECR [7].

A anisotropia diz respeito ao comportamento dos raios cósmicos ultra energéticos em determinadas direções. Há uma dificuldade em se detectar partículas aqui na Terra devido a influência dos campos magnéticos Galáctico e extragaláctico. 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 [9].

3 Fontes de UHECR

Em dados obtidos pelo Observatório Pierre Auger constatou-se que existe uma correlação na direção de chegada de eventos na região ao redor das radiogaláxia Centaurus A, Fornax A e M87. Os resultados das observações e as regiões onde se encontram estas galáxias as tornam possíveis fontes de grande interesse, por esse motivo decidiu-se explorá-las neste estudo [5, 10]. As informações do observatório para um número de eventos observados com $E \leq 55$ EeV conforme mostrado na pesquisa [11], é a motivação para o aprofundamento dessas análises, através das simulações nestas regiões em diferentes faixas de energia.

Centaurus A é a Galáxia mais próxima, estando a uma distância de 3.84 Mpc, também conhecida como NGC 5128, é uma radiogaláxia que foi descoberta por James Dunlop, em 1826, estando localizada na constelação de Centauro, tendo seu formato elíptico, sendo bastante massiva [12].

A Fornax A também conhecida como NGC 1316, está localizada a aproximadamente 20.9 Mpc, apresentando um formato elíptico. Possui uma luminosidade de aproximadamente $8,3 \times 10^{40}$ erg/s [13].

A M87 também conhecida como NGC 4486 é uma radiogaláxia elíptica presente no aglomerado de Virgem, está a aproximadamente 18.4 Mpc. Possui uma luminosidade estimada em $7,6 \times 10^{40}$ ergs/s. A Messier 87 tem em seu centro um buraco negro supermassivo responsável pelo jato de partículas ultra alta energéticas que emergem dessa região [14].

4 Modelo de campo magnético galáctico JF2012

O modelo Campo Magnético Galáctico - JF2012 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 [15].

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 [16].

4.1 Campo regular

O campo regular de grande escala é estruturado por três componentes, sendo eles: um disco, um halo toroidal e uma 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 [17].

4.1.1 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 [18]. Acima de 5 kpc até 20 kpc o campo possui oito regiões espirais e suas respectivas linhas são representadas pela seguinte expressão:

$$r = r_{-x} e^{(\phi \operatorname{tg}(90-i))}, \quad (2)$$

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:

$$\vec{b} = \operatorname{sen}(i)\vec{r} + \operatorname{cos}(i)\vec{\phi}, \quad (3)$$

essa intensidade para cada braço é definida em um raio de 5 kpc e cai com $1/r$. Para encontrarmos a força do campo no oitavo braço, é utilizada a seguinte expressão:

$$b_8 = - \sum_{i=1}^7 f_i b_i / f_8, \quad (4)$$

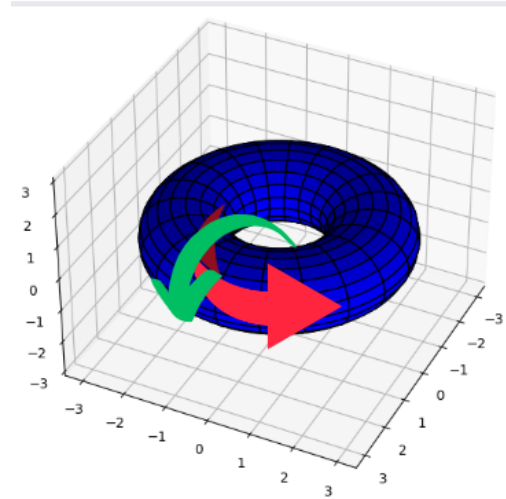


Figura 1: Geometrias da componente de halo: poloidal representada pela seta verde e toroidal representada pela seta vermelha.

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:

$$L(z, h, \omega) = (1 + e^{-2(|z|-h)/\omega})^{-1}, \quad (5)$$

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

4.1.2 Halo toroidal

Esse componente do campo é toroidal ou puramente azimutal [18], ver Figura 1. Ainda, esse campo pode ser definido como:

$$B_{\phi}^{tor}(r, z) = e^{-(|z|/z_0)} L(z, h_{disco}, \omega_{disco}) \times \begin{cases} B_n(1 - L(r, r_n, \omega_n)) \\ B_s(1 - L(r, r_s, \omega_s)) \end{cases} \quad (6)$$

4.1.3 Componente fora do plano

Foi adicionado à componente halo na geometria poloidal uma componente fora do plano, esta componente também é axissimétrica, ou seja, possui simetria apenas no eixo x.

4.2 Campo regular + estriado

Como já mencionado anteriormente, o modelo Jansson-Farrar adicionou uma 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 estão distantes 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 [19]. A força do campo estriado é definida como:

$$B_{estri}^2 = \beta B_{reg}^2, \quad (7)$$

podendo, assim, dizer que a força do campo estriado é proporcional ao campo regular por um fator β [19].

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 o 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:

$$b_x(r_p) = B_x e^{-r_p/r_x}, \quad (8)$$

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:

$$b_x(r_p)r_p/r, \text{ com } r_p = r - |z|/\tan(\Theta_x^0). \quad (9)$$

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

$$b_x(r_p)(r_p/r)^2, \quad (10)$$

para

$$r_p = r r_x^c / (r_x^c + |z|/\tan(\Theta_x^0)) \quad (11)$$

e

$$\Theta_x(r, z) = \tan^{-1}(|z|/(r - r_p)). \quad (12)$$

Ao todo, a componente fora do plano tem quatro parâmetros livres: B_x , (Θ_x^0) , r_x^c e r_x .

Onde B_x é a intensidade do campo na origem, (Θ_x^0) é o ângulo de elevação em $z = 0$ e $r > r_x^c$, r_x^c é o raio onde $\theta_x = (\Theta_x^0)$ e r_x é o comprimento da escala exponencial.

4.3 Campo randômico

Para melhorar as observações, o modelo realizou um ajuste no WMAP I através da superposição do campo aleatório em uma componente de disco, tendo uma região central e oito braços espirais com a mesma geometria, mais uma componente de halo estendido. Os três modelos de campo contribuem de maneira diferente. 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:

$$B_{rand} = \sqrt{B_{disco}^2 + B_{halo}^2}. \quad (13)$$

A componente de disco do campo aleatório Galáctico (GRF) é estruturado como 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 [18]:

$$B_{halo} = B_0 e^{[-r/r_0]} e^{[-z^2/2z_0^2]}, \quad (14)$$

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

Assim, é preciso compreender como o programa computacional Cosmic Ray Transport - CRT implementa o modelo de campo JF2012 [20]. 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.

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 é de

1 kpc. Durante o processo de rastreamento, o CRT filtra apenas as células que contribuem com o vetor de campo total, otimizando desta forma o tempo [20].

5 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 de campos magnéticos, ou seja, nesse processo os UHECR sofrem deflexões, impedindo a obtenção das posições exatas da 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:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{c^2 q}{E} (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (15)$$

onde, q é a carga da partícula, v sua velocidade e E sua energia e 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 $R = E/Zc$.

Nas análises iniciais das deflexões, simulou-se 500 mil partículas com um índice espectral de 1.7, energia mínima de 10 EeV e energia máxima de 100 EeV, bem como as coordenadas de longitude e latitude de acordo com as fontes, e empregando o componente do campo regular. A escolha de um índice espectral baixo tem o objetivo de produzir um espectro com decaimento em energias altas energias, dado que o programa não leva em consideração perdas de energia [4].

Essa 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. Devido à falta 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 2(a) exibe a análise das deflexões das partículas provenientes da radiogaláxia Centaurus A, 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

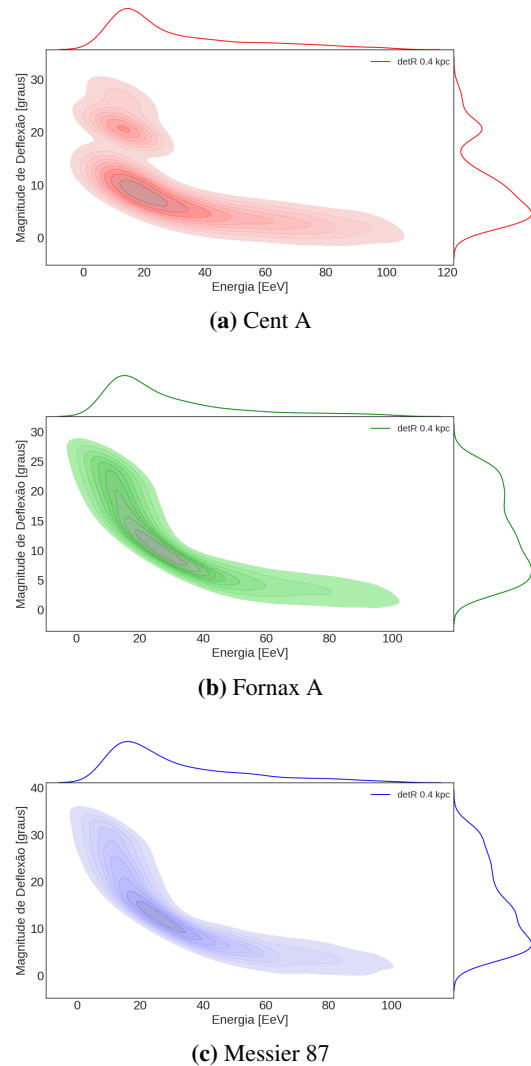


Figura 2: Deflexões de UHECR provenientes das regiões das radiogaláxias na presença do campo regular (JF2012-reg) para (a) Centaurus A, (b) Fornax A e (c) Messier 87. O eixo x apresenta a distribuição de energia em unidades de (EeV) e o eixo y o ângulo de deflexão em (graus). As distribuições acima e ao lado direito do plot representam a região onde se concentra o maior número de partículas.

30 graus. Realizou-se uma análise idêntica, com os mesmos parâmetros, para a fonte Fornax A, como representado na figura 2(b). Nesse caso, Fornax A apresentou uma deflexão inferior a 30 graus. Por outro lado, a figura 2(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, conforme ilustrado nas linhas acima do gráfico.

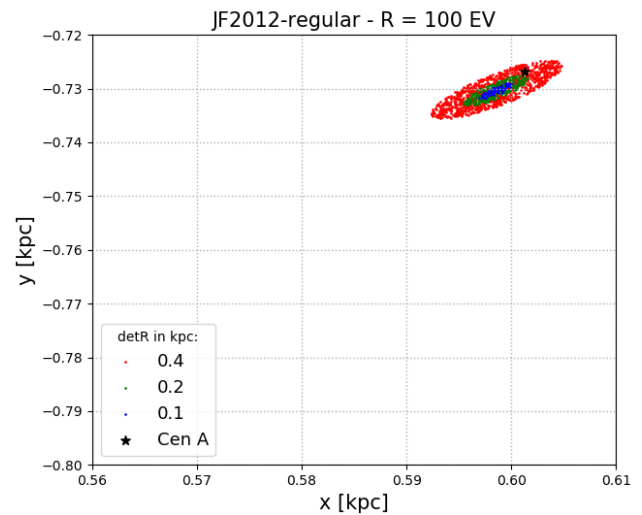
5.1 Posições iniciais dos UHECR na região das fontes

As distribuições das posições iniciais das partículas ao saírem da região da fontes foram estudadas. Para essa análise variou-se o tamanho dos detectores entre 0.1 kpc e 0.4 kpc e se utilizou rigidez de 16 EV e 100 EV, para as três fontes. Essa análise teve o intuito de verificar a região com maior concentração de partículas próximas à fonte [11].

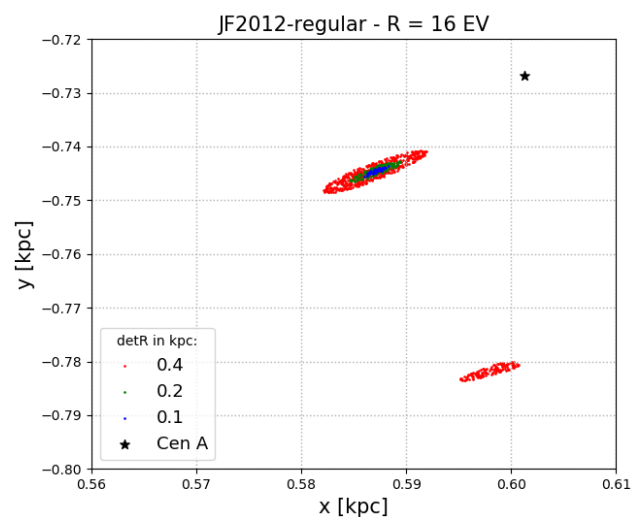
Selecionou-se o valor de 8 kpc para o raio inicial do disco de injeção, no qual diversas partículas foram inseridas, seguindo uma lei de potência com índice espectral de 1.7. Os vetores de velocidade iniciais das partículas foram alinhados com a direção da fonte, conforme observado da Terra. Essas partículas 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. As figuras 3(a) e 3(b) mostram as posições iniciais das partículas próximas à Centaurus A, com rigidez de 100 EV figura 3(a) e 16 EV figura 3(b), com detectores variando de 0.1 kpc a 0.4 kpc.

Nesta análise, Centaurus A está no eixo z, o qual é a origem e encontra-se ao longo da direção da linha de visada. Observou-se que as partículas com rigidez maior, figura 3(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 menor, essas partículas sofrem mais a influência do campo magnético Galático. Observou-se que para uma rigidez de 16 EV, figura 3(b), 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 mostra as posições iniciais dos UHECR provenientes da Fornax A, com uma rigidez de 100 EV figura 4(a) e uma rigidez de 16 EV figura



(a) Cen A - 100 EV



(b) Cen A - 16 EV

Figura 3: Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV e 16 EV, para diferentes tamanhos de detectores. A estrela preta representa a posição do centro de Cen A.

4(b). A radiogaláxia Fornax A foi a que registrou a menor deflexão angular das partículas detectadas, conforme previamente exposto na figura 4(b). Novamente, nota-se que para uma rigidez de 100 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.

Partículas com energias menores tendem a se afastarem mais da fonte, devido à influência do campo magnético Galático regular, como mostra a figura 4(b). Quanto menor a energia, maior a distância das

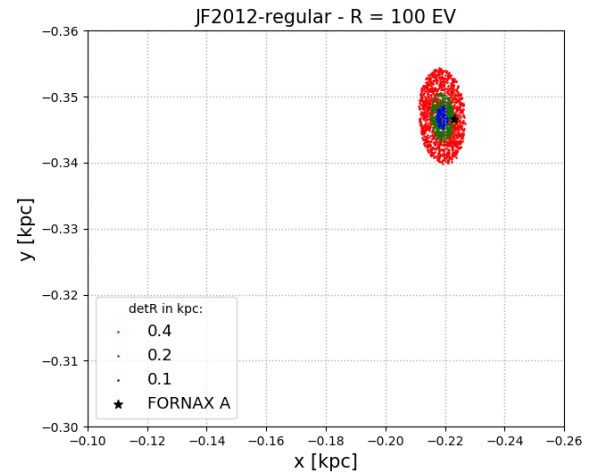
partículas cósmicas em relação ao centro de origem da fonte. Para Fornax A, as partículas detectadas se concentraram em uma única região, ao contrário do observado para a fonte Centaurus A com rigidez de 16 EV, onde se identificou uma distribuição mais dispersa.

A Messier 87 foi a fonte que mais sofreu a influência do campo magnético Galáctico regular nas análises deste estudo, conforme evidenciado na figura 5. A figura 5(cima) 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 16 EV, observa-se que, em relação à Centaurus A e Fornax A, os eventos em M87 afastaram-se mais da fonte. A figura 5(baixo) destaca claramente que os raios cósmicos provenientes da direção de M87 são expostos a uma deflexão significativamente maior devido à presença do GMF-Regular.

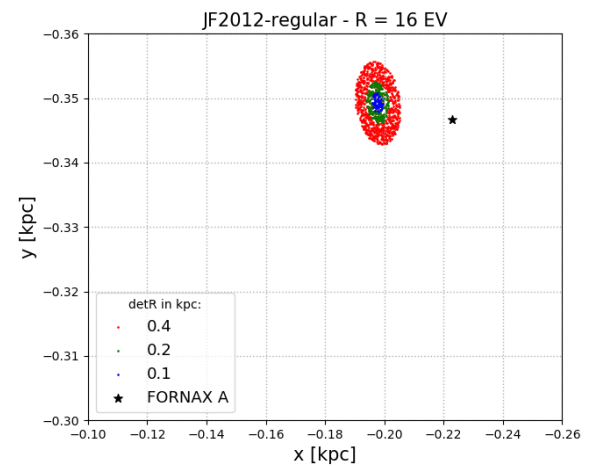
6 Deflexões em mapa celeste

As informações sobre a distribuição final dessas partículas detectadas em coordenadas cartesianas também podem ser obtidas em coordenadas galácticas em mapa celeste, 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 6 apresenta um mapa celeste 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 7.

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



(a) Fornax A - 100 EV



(b) Fornax A - 16 EV

Figura 4: Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados.

das radiogaláxias. Durante esse processo, também se considerou um espectro na fonte com índice espectral de 1.7 e energia máxima e mínima variando. A escolha do índice espectral de 1.7 foi devido ao fato do programa CRT não considerar a perda de energia, com isso há um decaimento maior do espectro, facilitando assim a análise dos dados. Essa análise fisicamente é definida por uma lei de potência conforme mostra a equação 16. Nesta análise adotou-se as três componentes do campo Jansson-Farrar [4].

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha} \quad (16)$$

A figura 8 apresenta as posições de origem de UHECR que foram detectados ao redor das fontes de

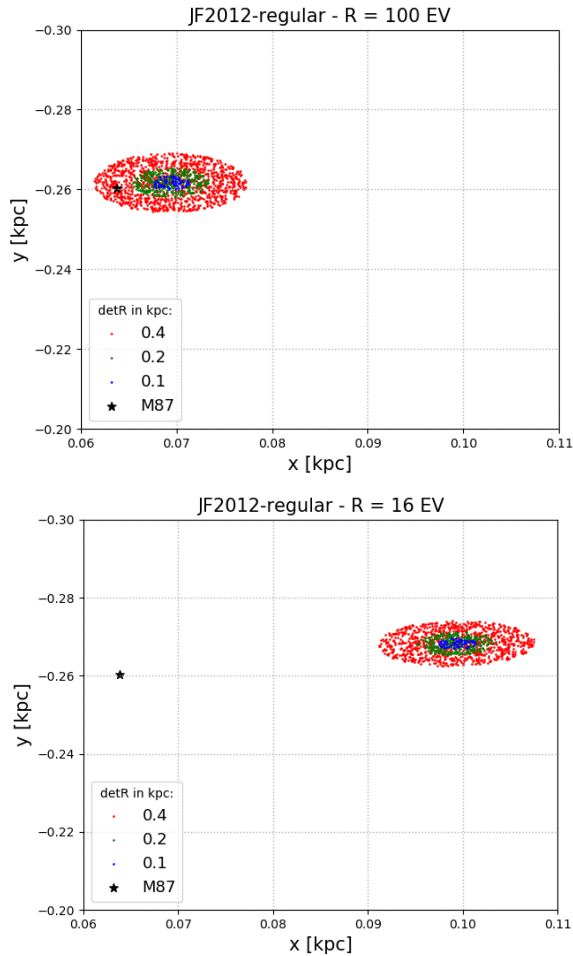


Figura 5: Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores. A estrela preta representa a posição do centro de M87.

Centaurus A, Fornax A e M87. Nesta figura a energia varia 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° graus ao redor de cada fonte, figuras 9 e 10. Claramente o número de eventos detectados foram maiores, mostrando regiões de onde as partículas poderiam se originar. 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 10. Para uma análise mais precisa das regiões próximas às fontes, o raio de 2° torna-se mais rele-

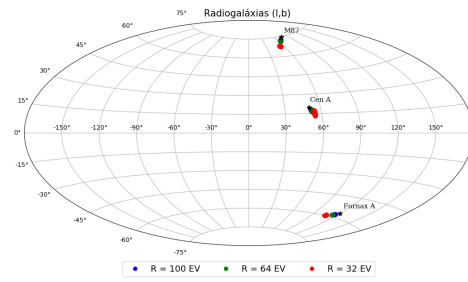


Figura 6: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre 40 EeV < E < 316 EeV.

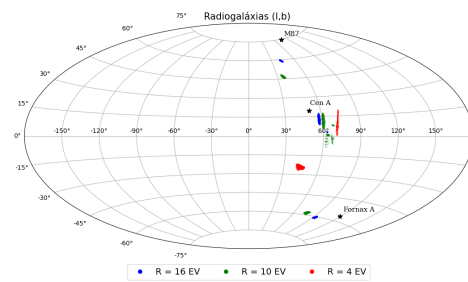


Figura 7: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre 40 EeV < E < 316 EeV.

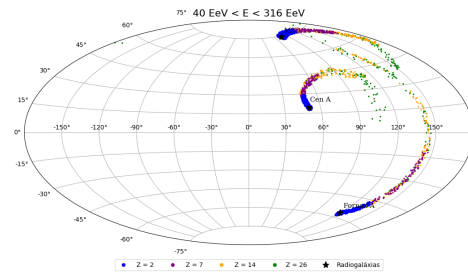


Figura 8: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre 40 EeV < E < 316 EeV.

vante.

Sabe-se que as partículas de menor energias sofrem maiores deflexões, em razão disso avaliou-se a variação de energia na simulações. Nas próximas figuras a mesma análise foi realizada com energias a partir de 70 EeV e 100 EeV, respectivamente. A figura 11 ilustra essa análise com um raio inicial de 2° ao redor da fonte e energias variando entre 70 EeV < E < 316 EeV, e para um raio de 5° (figura 12)

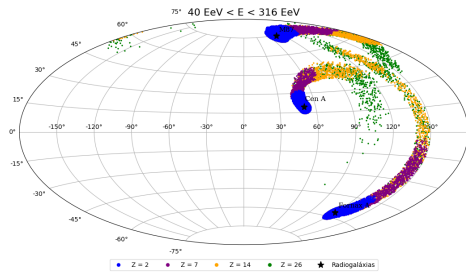


Figura 9: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $40 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$.

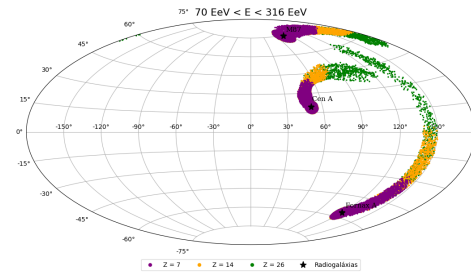


Figura 12: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte.

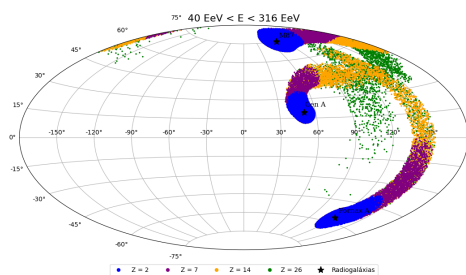


Figura 10: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 8 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $40 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$.

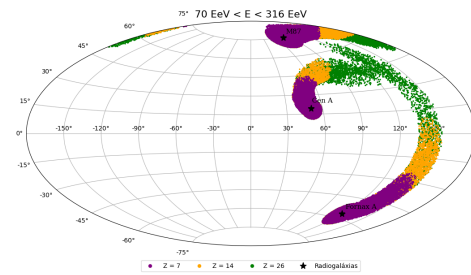


Figura 13: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 8 graus ao redor de cada fonte.

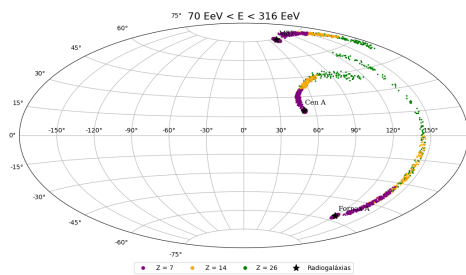


Figura 11: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte.

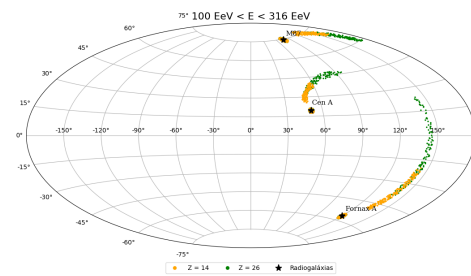


Figura 14: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte.

e 8° (figura 13). 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 $100 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$ [4].

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 foto-desintegração dos núcleos mais leves [4]. Isso explica a distribuição dos UHECR ilustrada nas figuras 14, 15 e 16, com raios de 2, 5 e 8 graus, respectiva-

mente. Essas partículas saem dessas regiões e chegam até a fonte, as simulações trazem informações de onde essas partículas originaram-se ou quais são as possíveis posições iniciais delas no mapa celeste. 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 aca-

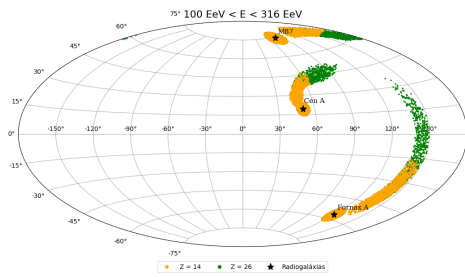


Figura 15: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte.

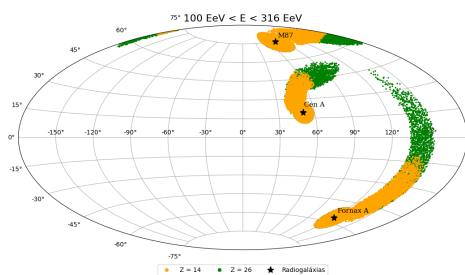


Figura 16: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 8 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $100 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$.

bam escapando devido à intensidade do campo magnético [4]. A figura 17 ilustra as posições finais das partículas que entraram na Galáxia na direção das radiogaláxias aqui estudadas. Comparando os plots 8 e 15, 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.

7 Considerações finais

Na presente estudo, 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 radiogaláxias [5]. 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, uma revisão que envolve a propagação dos UHECR, desde a importância do espectro de energia até a contribuição do Observató-

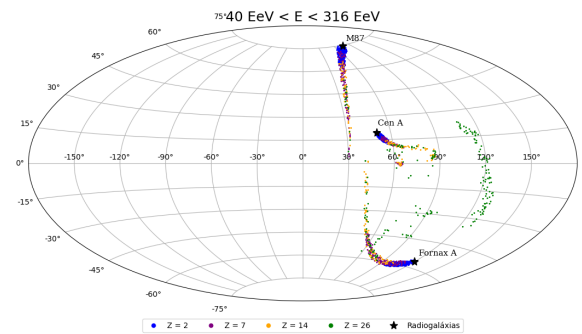


Figura 17: Posições finais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos que entraram na Galáxia na posição das radiogaláxias, considerando um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre $40 \text{ EeV} < E < 316 \text{ EeV}$. Retirado de [4].

rio Pierre Auger.

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 [4]. Investigou-se o comportamento das partículas provenientes dessas possíveis fontes, com a presença do modelo do campo magnético Galáctico Jansson Farrar. 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.

Discorreu-se todo processo de análise desse estudo. Os primeiros dados obtidos foram a respeito da deflexão de UHECR, utilizando uma energia máxima de 100 EeV e um detector de 0.4 kpc , onde no eixo y da figura 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 menor influência do campo magnético Galáctico, apresentando também uma boa distribuição de partículas de mais alta energia.

Por sua vez, as partículas detectadas originalizadas 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 EeV , 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, mostraram-se próximas às fontes, em rigidezes menores as partículas se encontram ao redor das fontes. 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 deste trabalho, apresentando-se uma análise das posições de entrada na Galáxia e finais de eventos isotrópicos simulados em mapa celeste. 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.

As simulações aqui apresentadas parcialmente de acordo com os dados observados [4, 11, 17], porém, a inclusão de futuros trabalhos para comparações utilizando as três componentes de campo e em diferentes direções de fontes são relevantes para uma melhor análise e compreensão do efeito do campo Galáctico na propagação de UHECR. Em futuros estudos pretende-se explorar mais as análises aqui descritas,

assim como outras componentes do campo magnético Galáctico JF2012 [19]. O objetivo é explorar o efeito do campo magnético para assim contribuir com a descoberta de fontes de UHECR.

Agradecimentos

LCS agradece a bolsa de pesquisa do programa de pós-graduação em Física Aplicada da Universidade Federal da Integração Latino-Americana. A pesquisa da RCA é apoiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq): 307750/2017-5 e 401634/2018-3. As autoras agradecem ao Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC/MCTI, Brasil) pelo fornecimento de recursos de HPC do supercomputador SDumont (<http://sdumont.lncc.br>), que contribuíram para os resultados da pesquisa relatados neste artigo.. RCA também agradece ao Projeto FAPESP nº 2015/15897-1. RCA e LCS agradecem o apoio financeiro do NAPI “Fenômenos Extremos do Universo” da Fundação de Apoio à Ciência, Tecnologia e Inovação do Paraná.

Sobre as autoras

Larissa Santos (lc.santos.2021@aluno.unila.edu.br) possui graduação em Licenciatura em Ciências Exatas (habilitação em Física) na instituição UFPR - Universidade Federal do Paraná (2020). Estudou na instituição UNIPAR - Universidade Paranaense o curso superior de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas, durante 1 ano (2014 - 2015). Possui mestrado em Física Aplicada pela instituição UNILA - Universidade Federal da Integração Latino Americana (2023). Trabalha no projeto de pesquisa sobre Raios Cósmicos de ultra-energia UHECR. Atualmente leciona Física e Matemática na rede pública de ensino do Paraná.

Rita de Cássia dos Anjos (ritacassia@ufpr.br) possui graduação em Física Biológica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2007) e mestrado (2009) e doutorado (2014) em Física pela Universidade de São Paulo, São Carlos. Desde agosto de 2014 é professora doutora da Universidade Federal do Paraná no Setor Palotina. Trabalha com raios cósmicos de energias até 100 EeV (Observatório Pierre Auger) e energias entre 10 GeV e 100 TeV (Che-

renkov Telescope Array - CTA). Tem experiência na área de astropartículas, com ênfase na propagação de raios cósmicos, aceleração e interações de partículas cósmicas e fontes de partículas multimessageiras: supernovas, Galáxias Starburst e rádio, AGNs e objetos compactos. É membro do Observatório de Raios Cósmicos Pierre Auger, em Malargue, na Argentina, desde 2014 é membro do Observatório Cherenkov Telescope Array - CTA desde 2015. Em 2020 foi vencedora do prêmio Programa para Mulheres na Ciência, promovido pela L'Oréal Brasil, Unesco Brasil e Academia Brasileira de Ciências. Em 2021 tornou-se membro afiliado da Academia Brasileira de Ciências. Em 2022 conquistou o Prêmio Anselmo Salles Paschoa, da Sociedade Brasileira de Física. Em 2023 recebeu homenagem da UFR na categoria pesquisadora destaque.

Referências

- [1] M. C. Bustamante, *A descoberta dos raios cósmicos ou o problema da ionização do ar atmosférico*, [Revista Brasileira de Ensino de Física](#) **35**(2), 2603 (2013).
- [2] J. Linsley, *Evidence for a Primary Cosmic-Ray Particle with Energy 10^{20} eV*, [Phys. Rev. Lett.](#) **10**, 146 (1963).
- [3] R. Alves Batista et al., *Open Questions in Cosmic-Ray Research at Ultrahigh Energies*, [Frontiers in Astronomy and Space Sciences](#) **6** (2019).
- [4] R. C. dos Anjos et al., *Ultrahigh-energy cosmic ray composition from the distribution of arrival directions*, [Phys. Rev. D](#) **98**, 123018 (2018).
- [5] J. H. Matthews et al., *Fornax A, Centaurus A, and other radio galaxies as sources of ultrahigh energy cosmic rays*, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#) **479**(1), L76 (2018). [ArXiv:1805.01902](#).
- [6] Y. B. Bandeira e L. F. Mackedanz, *Mecanismos de limitação da energia de raios cósmicos durante sua propagação*, [Revista Brasileira de Ensino de Física](#) **41**(4), e20190118 (2019).
- [7] A. Castellina, *AugerPrime: the Pierre Auger Observatory Upgrade*, [EPJ Web of Conferences](#) **210**, 06002 (2019).
- [8] R. C. Anjos, *Propagação de raios cósmicos extragalácticos*, Tese de Doutorado, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (2014).
- [9] J. P. Armand, *Anisotropias no fluxo de Raios Cósmicos de Ultra Altas Energias*, Dissertação de Mestrado, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo (2018).
- [10] F. M. Rieger, *Active Galactic Nuclei as potential sources of ultra-high energy cosmic rays*, [Universe](#) **8**(11), 607 (2022).
- [11] A. Keivani, G. R. Farrar e M. Sutherland, *Magnetic deflections of ultra-high energy cosmic rays from Centaurus A*, [Astroparticle Physics](#) **61**, 47–55 (2015).
- [12] S. R. Ehlert 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**(2), 116 (2022).
- [13] B. Duah Asabere et al., *Mid-infrared dust in two nearby radio galaxies, NGC 1316 (Fornax A) and NGC 612 (PKS 0131-36)*, [Astronomy & Astrophysics](#) **592**, A20 (2016).
- [14] C. d. OLIVEIRA, *Fontes locais de raios cósmicos ultra energéticos*. (2021).
- [15] G. Farrar, *The Galactic Magnetic Field and its lensing of Ultrahigh Energy and Galactic Cosmic Rays*, in *IAU General Assembly* (2015), vol. 29, 2258479.
- [16] G. R. Farrar, *The Galactic magnetic field and ultrahigh-energy cosmic ray deflections*, [Comptes Rendus Physique](#) **15**(4), 339 (2014), ultrahigh-energy cosmic rays: From the ankle to the tip of the spectrum.
- [17] M. Unger e G. Farrar, *The Coherent Magnetic Field of the Milky Way* (2023). [ArXiv:2311.12120](#).
- [18] R. Jansson e G. R. Farrar, *The galactic magnetic field*, [The Astrophysical Journal](#) **761**(1), L11 (2012).
- [19] R. Jansson e G. R. Farrar, *A New Model of the Galactic Magnetic Field*, [The Astrophysical Journal](#) **757**(1), 14 (2012). [ArXiv:1204.3662](#).

- [20] M. S. Sutherland, B. M. Baughman e J. J. Beatty, *CRT: A numerical tool for propagating ultra-high energy cosmic rays through Galactic magnetic field models*, *Astroparticle Physics* **34**(4), 198 (2010). [ArXiv:1010.3172](#).