

# Propagação de raios cósmicos em campos magnéticos galácticos e extragalácticos

Projeto de Iniciação Científica para o Edital UFABC/Propes 01/2020

## *Resumo*

Há muito tempo reconhece-se que os campos magnéticos desempenham um importante papel na astrofísica, mas apesar de grandes esforços terem sido feitos nas últimas décadas, na melhor das hipóteses, a intensidade e a estrutura dos campos magnéticos para além da heliosfera são descritos apenas qualitativamente. Faz-se necessário, portanto, um conhecimento detalhado acerca das propriedades físicas dos campos magnéticos em ambientes galácticos e extragalácticos, fundamentais na modelagem do transporte de raios cósmicos nesses meios. Além disso, os campos magnéticos impactam na determinação das fontes dos raios cósmicos de ultra-alta energia ou de suas anisotropias, bem como em outros estudos cosmológicos, como os envolvendo medidas da radiação cósmica de fundo ou ainda na busca por matéria escura.

Neste projeto de iniciação científica, faremos, inicialmente, um estudo detalhado da física pertinente e dos recentes e importantes avanços na compreensão da propagação de raios cósmicos em campos magnéticos. Paralelamente, faremos uso de simulações da propagação de raios cósmicos em campos magnéticos galácticos e extragalácticos para produzir resultados que possam ser comparados com os da literatura.

**Palavras-chave:** Astropartículas, Propagação, Campos Magnéticos.

**Área e sub-área de conhecimento:** Física (Física de Partículas Elementares e Campos).

## I. INTRODUÇÃO

A natureza dos aceleradores cósmicos é um dos maiores problemas não resolvidos da astrofísica na atualidade [1]. É um tema importante, pois os sítios de aceleração de raios cósmicos (RCs) em nossa galáxia são estritamente correlacionados com a dinâmica de formação de estrelas massivas, com a evolução estelar e, finalmente, com as explosões de supernova. Podemos afirmar também que o estudo da radiação cósmica ajuda a compreender a própria formação do Sistema Solar, nosso clima e a evolução da vida na Terra. Os RCs primários são, principalmente, prótons e núcleos atômicos completamente ionizados de altas energias, produzidos em ambientes astrofísicos que propagam-se pelo espaço intergaláctico e/ou extragaláctico até, eventualmente, chegarem à Terra. Os RCs secundários são as partículas produzidas nas interações dos primários com gases interestelares ou da atmosfera da Terra. Ao interagirem na atmosfera da Terra, os CRs produzem cascatas de partículas secundárias, denominadas *chuveiros atmosféricos extensos* (CAEs) [2] que contêm partículas subnucleares de diferentes naturezas. Os hádrons (como os prótons, nêutrons ou píons) de curta duração levam à produção cascatas de fótons, elétrons e pósitrons de alta energia, a chamada *componente eletromagnética* dos chuveiros, e também de uma componente penetrante de múons, chamada de *componente muônica* dos chuveiros, e de neutrinos. Em geral, as partículas secundárias carregadas interagem com a matéria produzindo radiações de fluorescência, Cherenkov, ondas de rádio ou de micro-ondas que podem ser utilizadas para efetuarem-se medições indiretas das propriedades físicas do primário, tais como suas energias, composições e direções de chegada.

As fontes de RCs de altas energias ou ultra-altas energias ainda não foram identificadas, principalmente, devido à presença dos campos magnéticos galácticos e extragalácticos que defletem as partículas carregadas, ocultando a informação sobre onde elas foram produzidas. Somente as partículas neutras, como os fótons ou os neutrinos, podem inequivocamente apontar para uma potencial fonte ou classe de fontes. Existem, no entanto, diferentes candidatas a fontes astrofísicas de RCs. A partir da década de 1960, foram desenvolvidos modelos de aceleração cósmica em choques astrofísicos. Isso levou a uma espécie de modelo padrão de aceleração de raios cósmicos, conhecido como *modelo de aceleração de choque difusivo*. Neste modelo, cerca de 5-10% da energia cinética não-relativística ligada aos choques, alimentados por explosões de supernovas em nossa Galáxia, é transferida a algumas partículas que tornam-se relativísticas, os raios cósmicos. A característica chave é que um espectro energético de potência do tipo  $\sim E^{-2}$  é produzido. O modelo é consistente com o equilíbrio entre a energia transferida para as partículas aceleradas e a perda de energia devido à fuga de RCs para fora da Galáxia. É plausível que a característica do espectro de RCs a energias  $\sim 10^{15}$  eV, conhecida como *joelho*, represente uma transição entre diferentes classes de aceleradores galácticos. No entanto, parece improvável a existência de objetos galácticos capazes de acelerar RCs a energias superiores a  $\sim 10^{19}$  eV.

A energias ultra-altas ( $> 10^{18}$  eV), enormes arranjos de detectores são necessários para a medição dos RCs [3] que, provavelmente, são de origem extragaláctica. Acima de  $\sim 50$  EeV<sup>1</sup>, as direções de chegada dos RCs já não são significativamente afetadas pelos campos magnéticos galácticos. Porém, a determinação de detalhes acerca dos campos magnéticos extragalácticos é ainda uma questão desafiadora para os métodos astronômicos convencionais.

Concebido para detectar e estudar os RCUAEs, o Observatório Pierre Auger [4] é um detector híbrido, localizado na cidade argentina de Malargüe, constituído por um arranjo de superfície com mais de 1640 tanques Cherenkov, espalhados numa área maior que 3000 km<sup>2</sup>, e por um conjunto de 27 telescópios que detectam a luz de fluorescência gerada na atmosfera sobre o arranjo de superfície. O Auger tem produzido resultados importantes nos últimos anos, como o espectro energético acima de 10<sup>18</sup> eV e indicações de anisotropia nas direções de chegada dos eventos de mais alta energia. O espectro energético dos RCUAEs foi obtido com exposição de 12790 km<sup>2</sup> sr, onde foram identificados o tornozelo do espectro entre 3 – 4 EeV e uma supressão do tipo GZK iniciando entre 20 – 30 EeV (vide figura 1), confirmando as previsões teóricas a respeito do corte GZK, feitas há 40 anos atrás [5] [6]. A colaboração Pierre Auger reportou evidências de anisotropia na distribuição de direções de chegada dos raios cósmicos de ultra-alta energia (RCUAEs) [8] [9]. A energias acima de 55 EeV, os eventos têm possível correlação com as posições de galáxias com núcleos ativos (GNAs) em nossa vizinhança cósmica — a mais próxima delas é a radiogaláxia Centauro A (NGC 5128), que dista cerca de 3,8 Mpc da Via-Láctea. No entanto, resultados mais recentes da colaboração, com uma estatística maior de eventos, não vieram a confirmar a hipótese de anisotropia [10]. A análise feita é a da correlação cruzada e consiste em contar o número de pares de uma determinada separação angular entre eventos de raios cósmicos e objetos em um catálogo de fontes. Para encontrar um excesso, compara-se o número de pares com a expectativa de uma simulação isotrópica. Foram analisados vários limiares de energia entre 40 EeV até 80 EeV e em escala angular entre 1° e 30°. Para as fontes (GNAs) dos catálogos [11] [12] [13] foram impostos cortes de distância máxima, podendo variar de 10 Mpc até 200 Mpc em passos de 10 Mpc. Alguns destes resultados estão apresentados na figura 2. Note que, para o gráfico da direita, os dados de separação angular até Centauro A (histograma em preto) se desviam muito pouco, em geral com um nível de confiança menor que  $2\sigma$ , da distribuição esperada para isotropia.

---

<sup>1</sup>1 EeV = 10<sup>18</sup> eV.

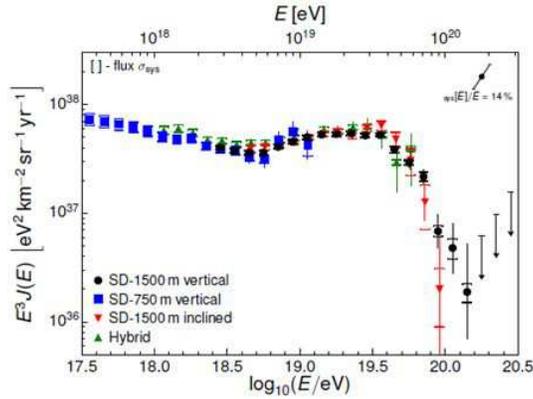


Figura 1: O espectro energético do Auger acima de  $10^{17,5}$  eV[7].

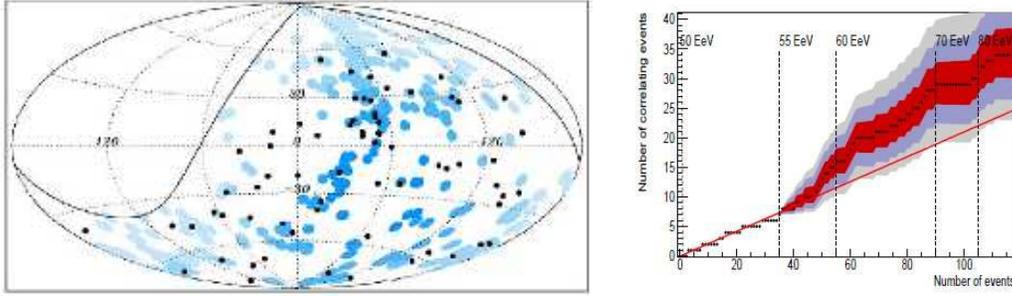


Figura 2: À esquerda: mapa em coordenadas galácticas mostrando os eventos (pontos pretos) com  $E > 58$  EeV juntamente com as GNAs mais brilhantes ( $> 10^{44}$  erg/s) e mais próximas que 130 Mpc (centradas nos círculos azuis de  $18^\circ$  de raio); À direita: número acumulado de eventos ao redor da rádilogaláxia Centauro A, para o limiar de energia  $E_{th} = 58$  EeV, explorando toda a faixa angular indicada no gráfico.

## II. METODOLOGIA

Uma partícula com carga  $q$ , movendo-se em um campo magnético  $\vec{B}$ , é acelerada pela força de Lorentz:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (1)$$

onde, para o caso relativístico, deve-se tomar o momento definido por:  $\vec{p} = m_0\gamma\vec{v}$  e o fator gama de Lorentz é:  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ . Devido à natureza da força magnética, o vetor aceleração  $\vec{a} = d\vec{v}/dt$  é sempre perpendicular à velocidade, provocando aceleração centrípeta e, por conseguinte,  $\vec{v} \cdot \vec{a} = 0$ . Desconsiderando-se as perdas de energia, a velocidade será constante no tempo, assim como o fator  $\gamma$ . Dessa forma, a equação 1 pode ser re-escrita como:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v} \times \vec{\omega}_B, \quad (2)$$

onde  $\vec{\omega}_B = q\vec{B}/m_0\gamma$  é a frequência de giro da partícula.

O raio de Larmor é calculado igualando-se a força centrípeta à força de Lorentz e resulta ser igual à razão entre a velocidade da partícula e a sua frequência de giro no campo magnético:

$$r_L = \frac{m_0\gamma v}{qB} = \frac{v}{\omega_B}. \quad (3)$$

Agora, num regime ultra-relativístico, a energia cinética da partícula é muito maior que a sua massa de repouso. Assim:  $E = \sqrt{(m_0c^2)^2 + (pc)^2} \approx pc$  e, desta maneira:

$$r_L \approx \frac{E}{cqB}. \quad (4)$$

Lembrando que as equações do eletromagnetismo escritas até aqui estão no SI e que para mudar para o sistema gaussiano devemos aplicar as transformações:  $q_{SI} \rightarrow q_G \sqrt{4\pi\epsilon_0}$  e  $B_{SI} \rightarrow B_G \sqrt{\mu_0/4\pi}$ , tal que o produto fica:  $q_{SI}B_{SI} \rightarrow q_GB_G/c$ . Ou seja, no sistema gaussiano a equação 4 torna-se, simplesmente:

$$r_L \approx \frac{E}{qB} = \frac{E}{ZeB}, \quad (5)$$

onde adotamos também a partícula como um núcleo de carga  $Ze$ .

Ademais, define-se a *rigidez magnética* pelo produto do raio de Larmor e a intensidade do campo magnético:

$$R \equiv r_L B = \frac{pc}{Ze} \approx \frac{E}{Ze}, \quad (6)$$

que é uma medida da resistência que a partícula exerce à sua deflexão no campo magnético. Transformando-se a energia para unidades de elétron-Volt, vem a fórmula prática:

$$R = \frac{E[\text{erg}] \cdot 1,6 \times 10^{-12}[\text{eV/erg}]}{Z \cdot 4,8 \times 10^{-10}[\text{statC}]} = \frac{E}{300Z} [\text{V}]. \quad (7)$$

Integrando-se a equação 2, obtém-se a descrição de um movimento circular uniforme, cuja aceleração é centrípeta e, além disso, perpendicular a  $\vec{B}$ . No caso da partícula possuir também uma componente da velocidade paralela a  $\vec{B}$ , esta deverá executar também uma translação uniforme somada ao movimento circular. Desta forma, a solução geral para a velocidade é expressa por:

$$\vec{v}(t) = v_{\parallel}\vec{e}_3 + \omega_B r (\vec{e}_1 - i\vec{e}_2)e^{-i\omega_B t}, \quad (8)$$

onde  $v_{\parallel}$  é a componente da velocidade paralela ao campo,  $\vec{e}_3$  é um vetor unitário paralelo ao campo e  $\vec{e}_1$  e  $\vec{e}_2$  são os outros vetores unitários ortogonais ao campo. A convenção admitida é a de que se tome a parte real da equação. Finalmente, a integração da equação 8 leva ao deslocamento da partícula:

$$\vec{x}(t) = \vec{x}_0 + v_{\parallel}t\vec{e}_3 + ir(\vec{e}_1 - i\vec{e}_2)e^{-i\omega_B t} \quad (9)$$

que descreve uma trajetória helicoidal de raio  $r_L$  e ângulo do passo  $\alpha = \tan^{-1}(v_{\parallel}/r_L\omega_B)$  (vide figura 3).

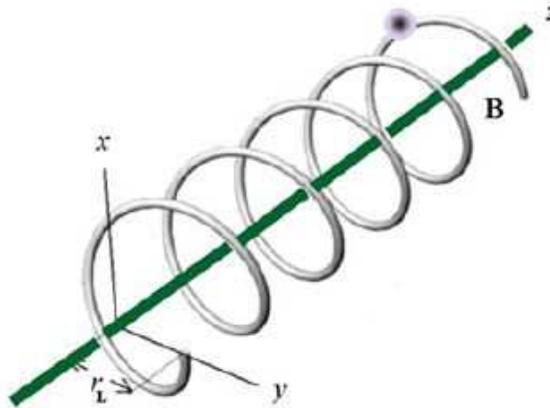


Figura 3: Trajetória de uma partícula carregada num campo magnético uniforme  $\vec{B} = B\hat{z}$ .

### III. OBJETIVOS E METAS

Como atividade principal o aluno aprenderá a utilizar uma das principais simulações da propagação de RCs de diversas energias e composições em campos magnéticos, a **CRPropa** [14]. A CRPropa foi concebida para fazer várias previsões acerca de

RCs primários e secundários, incluindo elétrons, pósitrons, raios gama, radiação síncrotron, etc. Paralelamente, o aluno colaborará no desenvolvimento da simulação do nosso grupo de pesquisa, a **EGCRProp** [15].

Os seguintes passos foram idealizados para o atual projeto de iniciação científica:

1. Instalar e utilizar os códigos CRPropa e EGCRProp e o pacote de análise de dados ROOT [16], em Linux;
2. Desenvolver rotinas de simulação e de visualização de trajetórias;
3. Estudar a estrutura dos campos magnéticos galácticos e extragalácticos;
4. Estudar física de plasmas, magnetohidrodinâmica e difusão de partículas carregadas em campos magnéticos;
5. Estudar física de interações das partículas carregadas com a matéria e cinemática relativística;
6. Confrontar seus resultados com os do Observatório Pierre Auger.

Além das atividades de pesquisa supracitadas, o aluno participará de reuniões periódicas do Grupo de Raios Cósmicos (GRC/UFABC) em que são discutidos aspectos técnicos (teóricos ou experimentais) das pesquisas na área de física de astropartículas. Temos também como metas a apresentação e a publicação dos seus resultados, tanto no Simpósio de Iniciação Científica (SIC/UFABC) quanto em outros encontros de física nacionais ou internacionais.

#### IV. CRONOGRAMA

O cronograma de atividades a serem realizadas no presente projeto de iniciação científica estão descritas na tabela 1:

Mês	Atividades	
1	Instalação dos softwares	
2	Revisão	CRPropa
3	bibliográfica	
4	Análise de dados	
5		
6	Elaboração do relatório parcial	
7	Estudos teóricos	EGCRProp & CRPropa
8		
9		
10		
11		
12	Elaboração do relatório final	

Tabela 1  
Cronograma de atividades da iniciação científica.

#### V. CONCLUSÃO

A propagação de RCs em campos magnéticos galácticos e extragalácticos é um dos grandes problemas em aberto na astrofísica da atualidade. No presente projeto, foram propostas atividades de pesquisa que tratam destes problemas atuais, na vanguarda da física de astropartículas. Os estudos fornecerão a base adequada para o estudante interessado em prosseguir na área. Além disso, temos como objetivo geral a formação de recursos humanos, através do treinamento do candidato em métodos avançados de simulação e de análise de dados. Aproveitando-nos dos vários anos de experiência profissional do orientador nesta área de pesquisa, bem como de sua participação em importantes colaborações científicas, como a do Observatório Pierre Auger, temos plena capacidade de realizar com êxito a orientação proposta com o apoio da ProPes/UFABC

## VI. REFERÊNCIAS

- [1] M. Spurio, *Particles and Astrophysics — A Multi-Messenger Approach*, Springer, Heidelberg (2015).
- [2] T.K. Gaisser, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press, Cambridge (1991).
- [3] P. Sokolsky, *Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics*, Westview Press, Colorado (2004).
- [4] The Pierre Auger Collaboration, *The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory*, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. **A 798** (2015) 172-213.
- [5] K. Greisen, *Phys. Rev. Letters*, **16** (1966) 748.
- [6] G. T. Zatsepin and V. A. Kuz'min, *JETP Lett.*, **4** (1966) 78.
- [7] I. Valiño for the Pierre Auger Collaboration, *The flux of ultra-high energy cosmic rays after ten years of operation of the Pierre Auger Observatory*, Proc. of 34th ICRC (2015); arXiv:1509.03732v1 [astro-ph.HE]
- [8] J. Abraham *et al.* (Auger Collaboration), *Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects*, *Science* **318** 5852 (2007) 938;
- [9] J. Abraham *et al.* (Auger Collaboration), *Correlation of the highest-energy cosmic rays with the positions of nearby active galactic nuclei*, *Astropart. Phys.* **29**(2008) 188.
- [10] J. Aublin for the Pierre Auger Collaboration, *Arrival directions of the highest-energy cosmic rays detected with the Pierre Auger Observatory*, Proc. of 34th ICRC (2015); arXiv:1509.03732v1 [astro-ph.HE]
- [11] W.H. Baumgartner *et al.*, *Astrophys. J. Supp.* **207** (2013) 19.
- [12] J.P. Huchra *et al.*, *Astrophys. J. Supp.* **199** (2012) 26.
- [13] S. van Velzen *et al.*, *Astron. Astrophys.* **544** (2012) A18.
- [14] R.A. Batista *et al.*, *CRPropa 3 - a Public Astrophysical Simulation Framework for Propagating Extragalactic Ultra-High Energy Particles*, JCAP 1605 (2016) 038; arXiv:1603.07142.
- [15] M.A. Leigui de Oliveira, and R.P. Costa Junior. "A Numerical Model for the Propagation of Ultra-High Energy Cosmic Rays through Extragalactic Magnetic Fields", Proc. of the 35th ICRC (ICRC2017), PoS(ICRC2017)477. ECGRProp is available at: <http://pesquisa.ufabc.edu.br/egcrprop/>
- [16] ROOT Data Analysis Framework, <https://root.cern.ch/>