

# Propagação de raios cósmicos de ultra-alta energia no campo magnético galáctico

Projeto de Iniciação Científica para o Edital UFABC/Propes 04/2022

## *Resumo*

Raios cósmicos são partículas subatômicas altamente energéticas e eletricamente carregadas que são defletidas nos campos magnéticos, presentes nos meios galáctico e extragaláctico, no decorrer de suas propagações. Como as estruturas e os valores dos campos magnéticos nesses meios são limitadamente conhecidos, torna-se difícil a reconstrução das fontes astrofísicas que deram origem aos eventos de raios cósmicos detectados na Terra. Formula-se, assim, um dos grandes problemas da astrofísica da atualidade, ainda não totalmente resolvido, para o qual são necessários estudos detalhados, seja dos processos físicos ocorridos no transporte de raios cósmicos nos ambientes galáctico e extragaláctico, seja das propriedades físicas dos campos magnéticos destes meios.

Neste projeto de iniciação científica, lançaremos mão de diferentes modelos para os campos magnéticos galácticos e, de posse de simulações computacionais da propagação de partículas carregadas em campos magnéticos, produziremos os efeitos das chamadas “lentes magnéticas”, com uso da técnica de retropropagação. Finalmente, compararemos nossos resultados com os obtidos na literatura.

**Palavras-chave:** Raios Cósmicos, 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 grandes problemas ainda não resolvidos na astrofísica da atualidade. Fontes de raios cósmicos (RCs) de energias altas ou ultra-altas não foram identificadas inequivocamente, principalmente, devido à presença de campos magnéticos que defletem as partículas carregadas de sua direção original. Somente partículas neutras — como fótons ou neutrinos — podem apontar para as potenciais fontes. Acredita-se que a característica do espectro de RCs, a energias  $\sim 10^{15}$  eV, conhecida como *joelho* do espectro, represente uma transição entre diferentes classes de aceleradores galácticos (vide figura 1). Ademais, é improvável a existência de objetos galácticos capazes de acelerar RCs a energias superiores a  $\sim 10^{19}$  eV. A energias  $> 10^{18}$  eV, enormes arranjos de detectores são necessários para a medição dos RCs [1] 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.

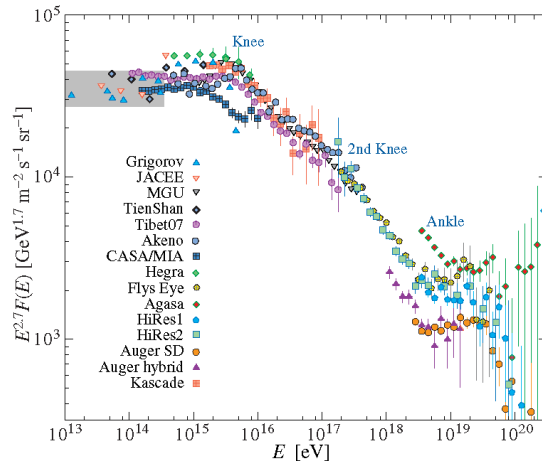


Figura 1: O espectro energético de RCs primários na Terra, medido por diversos experimentos. Note as mudanças de inclinação do espectro, conhecidas como o *joelho* e o *tornozelo* do espectro.

As medidas de intensidades e estruturas dos campos magnéticos para além da heliosfera são limitadas pela precisão dos métodos experimentais (como a rotação de Faraday) que por sua vez dependem de outras incertezas acerca do meio (como a densidade de elétrons). Desta forma, faz-se necessário um conhecimento detalhado das propriedades físicas dos campos magnéticos no ambiente galáctico e extragaláctico, fundamentais na modelagem do transporte de RCs. O conhecimento dos campos magnéticos cósmicos impactam diretamente na determinação das fontes dos raios cósmicos de ultra-alta energia (RCUAEs), nas suas anisotropias e são também determinantes em medidas da radiação cósmica de fundo (RCF), na busca por matéria escura e na maioria dos modelos cosmológicos [2].

## II. METODOLOGIA

Dada uma partícula com carga  $q$ , movendo-se em um campo magnético  $\vec{B}$ , sabe-se que ela 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  $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  é o *fator de Lorentz*. Devido à natureza da força magnética, o vetor aceleração  $\vec{a} = d\vec{v}/dt$  é sempre perpendicular à velocidade (aceleração centrípeta) e, por conseguinte,  $\vec{v} \cdot \vec{a} = 0$ . Assim, desconsiderando-se as perdas de energia, a velocidade será constante no tempo, bem como o fator  $\gamma$ . Dessa forma, a equação (1) pode ser re-escrita como:

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

<sup>1</sup>1 EeV =  $10^{18}$  eV.

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

E o *raio de Larmor* pode ser calculado igualando-se a força centrípeta à força de Lorentz e, consequentemente, é igual à razão entre a velocidade da partícula e a sua frequência de giro no campo magnético:

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

Retomando-se a equação (2), nota-se que ela descreve um movimento circular, cuja aceleração é perpendicular a  $\vec{B}$ . Mas 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 pode ser expressa por:

$$\vec{v}(t) = v_{\parallel}\vec{e}_3 + \omega_B r_L (\vec{e}_1 - i\vec{e}_2)e^{-i\omega_B t}, \quad (4)$$

onde  $v_{\parallel}$  e  $\vec{e}_3$  são a componente da velocidade e um versor ambos paralelos ao campo  $\vec{B}$  e  $\vec{e}_1$  e  $\vec{e}_2$  são os outros dois versores ortogonais ao campo  $\vec{B}$ . A convenção admitida aqui é a de que se tome a parte real da equação. Finalmente, a integração da equação (4) leva ao deslocamento da partícula:

$$\vec{x}(t) = \vec{x}_0 + v_{\parallel}t\vec{e}_3 + ir_L(\vec{e}_1 - i\vec{e}_2)e^{-i\omega_B t}, \quad (5)$$

a qual descreve uma trajetória helicoidal de raio  $r_L$  (vide figura 2).

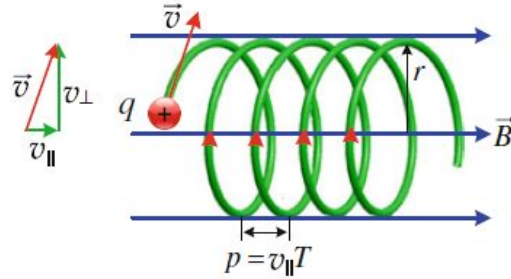


Figura 2: Trajetória de uma partícula carregada num campo magnético uniforme  $\vec{B} = B\hat{x}$ .

Desenvolvemos uma simulação computacional que consiste na implementação numérica das fórmulas (4) e (5), em passos temporais  $\delta t \ll 2\pi/\omega_B$ , e diferentes formulações de campos magnéticos foram testadas:  $\vec{B}$  uniforme,  $\vec{B}$  variável e  $\vec{B}$  dipolar; e, ao final das simulações, produzidas as trajetórias das partículas em 3 dimensões (vide figura 3).

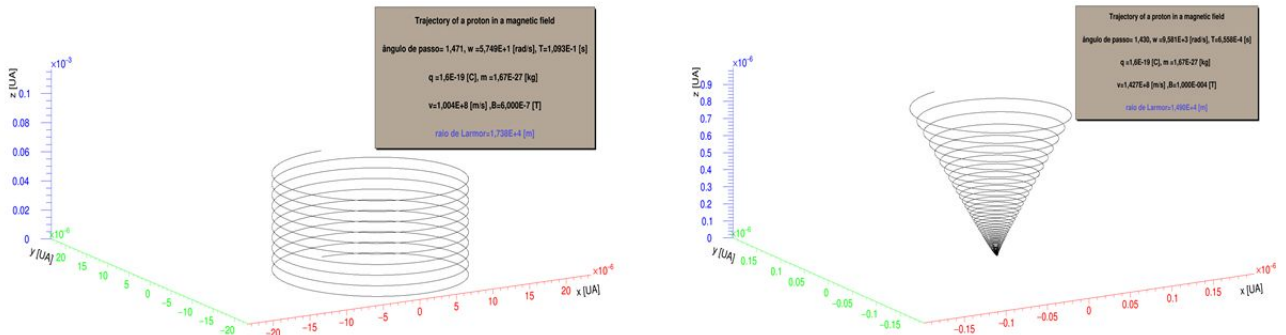


Figura 3: Trajetórias de prótons em campos magnéticos (à esquerda) uniforme, com  $\vec{B} = B\hat{z}$ , e (à direita) variável, com  $\vec{B} = \left(\frac{B_0}{r/r_0}\right)\hat{z}$ .

Na iniciação científica (IC), atualmente em andamento, o aluno desenvolveu os próprios códigos computacionais, rodou suas simulações e produziu os seus dados e gráficos, tendo aprendido a utilizar Linux, a programar em C++ e a utilizar o sistema de análise de dados ROOT [3]. Seu próximo passo, o de estudar as configurações de campos e simular a propagação de RCs no caso galáctico, será dado durante a execução deste projeto.

### III. OBJETIVOS E METAS

O objetivo principal do presente projeto é o de estudar os modelos que descrevem os campos magnéticos na nossa Galáxia e estender as simulações computacionais para o caso da propagação de raios cósmicos galácticos (RCGs). Como resultado, serão obtidos mapas das deflexões sofridas pelos RCGs, em diversas configurações de energia e de composição química. Na figura 4 temos as representações no plano galáctico dos dois modelos de  $\vec{B}$ : (a) configuração axissimétrica (ASS), em que as linhas de campo seguem as orientações dos braços da Galáxia, sempre apontando para dentro (paridade ímpar) e (b) configuração bissimétrica (BSS), em que as linhas de campo seguem as orientações dos braços da Galáxia, alternadamente apontando para dentro e para fora (paridade par). E, na figura 5, temos as deflexões esperadas (linhas vermelhas) para prótons, em mapas de coordenadas galácticas, para cada caso de campo, respectivamente. As linhas contínuas representam regiões de diferentes exposições relativas do Observatório Pierre Auger [4].

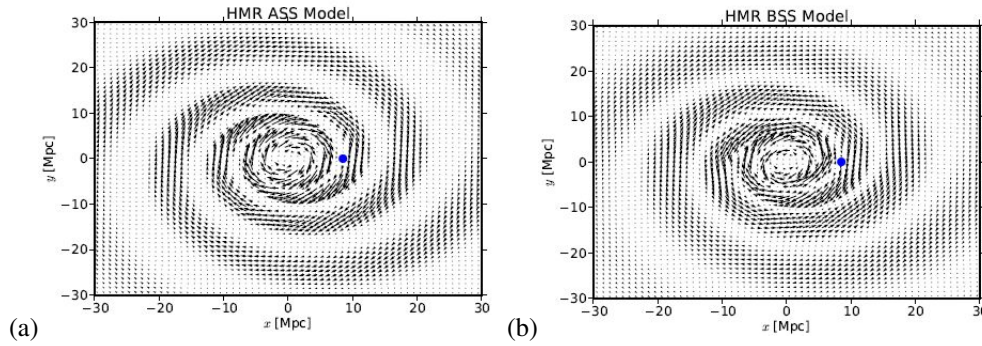


Figura 4: Modelos para o campo magnético galáctico: (a) axissimétrico; e (b) bissimétrico. A posição da Terra está indicada por um círculo azul. Ref.: [5].

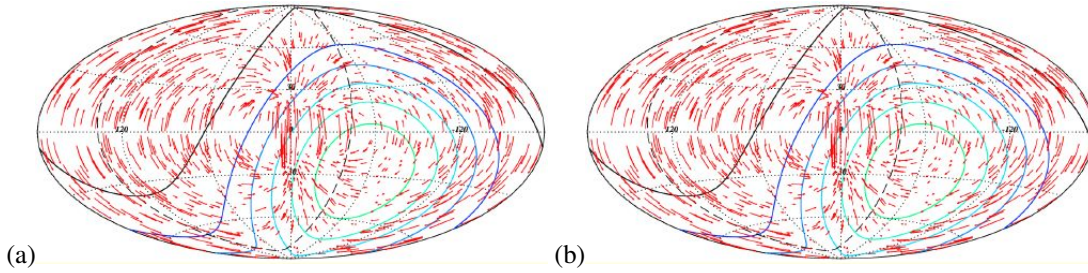


Figura 5: Mapas de deflexões para prótons nos casos: (a) axissimétrico; e (b) bissimétrico. Ref.: [6].

Posteriormente, o aluno utilizará uma das principais simulações da propagação de RCs de diversas energias em campos magnéticos galácticos, a **CRPropa 3.0** [7]. A **CRPropa** foi concebida para fazer várias previsões acerca de RCs primários e secundários, incluindo elétrons, pósitrons, raios gama, radiação síncrotron, etc., em meios galácticos ou extragalácticos.

Nesta linha, as seguintes metas específicas foram idealizadas para o atual projeto de IC:

1. Estudar os modelos de estrutura e intensidade dos campos magnéticos galácticos;
2. Implementar os dois modelos de campos galácticos nas simulações;
3. Instalar e utilizar o pacote **CRPropa 3.0**;
4. Estudar magnetohidrodinâmica;
5. Efetuar a análise dos resultados obtidos, à luz da bibliografia.

### A. Viabilidade do projeto

O projeto apresentado tem total viabilidade de ser concluído com êxito, uma vez que possui nível adequado a um estudante de graduação em suas pesquisas na área de astrofísica. Ademais, o projeto trata da continuação da pesquisa que já vem sendo bem executada pelo candidato em IC anterior. O projeto demanda apenas de computadores pessoais e de conectividade entre o estudante e o orientador. Além das atividades de pesquisa supracitadas, o estudante deverá participar de reuniões periódicas do Grupo de Raios Cósmicos (GRC) da UFABC, com o orientador, em que serão discutidos aspectos técnicos, teóricos ou experimentais, das pesquisas na área. Temos também como metas as apresentações de seus resultados nas reuniões do GRC, no Simpósio de Iniciação Científica (SIC) da UFABC, bem como em encontros nacionais e/ou internacionais de Física de Astropartículas.

## IV. CRONOGRAMA

As atividades a serem realizadas no presente projeto de IC estão apresentadas no cronograma abaixo:

Mês	Atividades
1	Revisão bibliográfica
2	Implementação dos campos galácticos (ASS e BSS)
3	
4	
5	
6	Elaboração do relatório parcial
7	Instalação do CRPropa
8	
9	Produção dos mapas de deflexão
10	
11	Análises finais
12	Elaboração do relatório final

## V. CONCLUSÃO

A propagação dos RCUAes em campos magnéticos galácticos é um dos grandes problemas em aberto da astrofísica na atualidade. No presente projeto de IC, foram propostas atividades de pesquisa que tratam de problemas na vanguarda da física de astropartículas. Os estudos fornecerão a base adequada para o estudante interessado em prosseguir seus estudos na área, promovendo assim a formação de recursos humanos pelo treinamento do candidato em métodos avançados de simulação e de análise de dados na física de partículas. 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 no âmbito do programa de IC da UFABC.

## VI. REFERÊNCIAS

- [1] P. Sokolsky, *Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics*, Westview Press, Colorado (2004).
- [2] M. Spurio, *Particles and Astrophysics — A Multi-Messenger Approach*, Springer, Heidelberg (2015).
- [3] ROOT Data Analysis Framework, <https://root.cern.ch/>
- [4] The Pierre Auger Collaboration, *The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory*, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. **A 798** (2015) 172-213.
- [5] P. Schiffer, *Constraining Cosmic Magnetic Fields by a Measurement of Energy-Energy-Correlations with the Pierre Auger Observatory*, PhD Thesis, Aachen University (2011).
- [6] S. Vorobiov, M. Hussain, and D. Veberic, *UHECR propagation in the Galactic Magnetic Field*, arXiv:0901.1579v1, [astro-ph.GA] 12 Jan 2009.
- [7] R.A. Batista et al., *CRPropa 3 - a Public Astrophysical Simulation Framework for Propagating Extraterrestrial Ultra-High Energy Particles*, JCAP 1605 (2016) 038; arXiv:1603.07142.