



Procura por evidência de anisotropia em distribuições angulares de raios cósmicos ultraenergéticos

Palavras-Chave: RAIOS CÓSMICOS, SÉRIE DE FOURIER, OBSERVATÓRIO PIERRE AUGER

Autoras:

Jaqueline Germano De Farias Oliveira - IFGW

Prof.^a Dr.^a Carola Dobrigkeit Chinellato (orientadora) DRCC/IFGW

INTRODUÇÃO:

Neste projeto, foi desenvolvido parcialmente o estudo da anisotropia nas coordenadas angulares de raios cósmicos de ultra-altas energias, ou seja, acima de 4 EeV ($1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$). Através da compreensão do processo de aproximação em séries, utilizamos este procedimento matemático para encontrar a direção favorecida no espaço, na qual supostamente, os raios cósmicos têm origem. Para isso, foram usados os dados experimentais do Observatório Pierre Auger^[1] para a elaboração de gráficos (histogramas) dos seguintes ângulos: ascensão reta (α), declinação (δ), ângulo azimutal local (φ) e ângulo zenital local (θ), além da construção gráfica dos espectros de energias dos raios cósmicos. Essas variáveis foram divididas com relação aos valores de energia dos raios cósmicos, sendo 88.325 deles entre 4 e 8 EeV, e 36.927 com energias maiores que 8 EeV. Os dados foram obtidos entre 1º de janeiro de 2004 a 31 de agosto de 2018.

Posteriormente, analisou-se o comportamento do histograma das ascensões retas para energia maiores que 8 EeV, em que a curva aparenta não ser uniforme. Com isso, através de funções trigonométricas contidas na função da série de Fourier^[2,3], foi feita uma aproximação por um valor constante que descreve aproximadamente o comportamento apresentado pelo histograma dos dados experimentais, e, posteriormente, acrescentou-se um termo com dependência em cosseno.

METODOLOGIA:

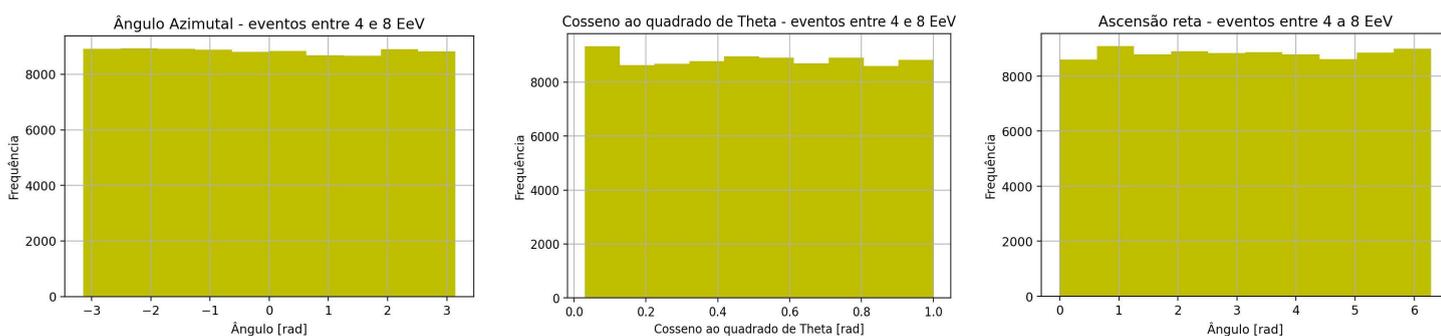
Neste projeto de iniciação científica, tivemos como objetivo investigar a existência do comportamento anisotrópico entre os raios cósmicos ultraenergéticos que chegam à Terra. Testamos a

hipótese de padrão isotrópico na incidência dessas partículas, e fizemos análises mais específicas em características sutis apresentadas por esses gráficos, nesse caso, o comportamento harmônico.

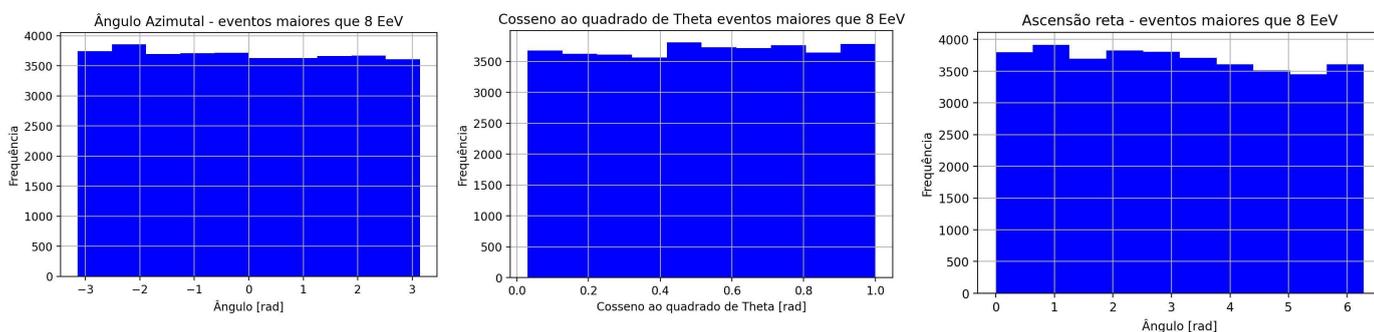
Segundo estudos do Observatório Pierre Auger, comprova-se a anisotropia dos raios cósmicos em para energias acima de 8 EeV^[4]. Isso significa que existe alguma direção favorecida do espaço, da qual mais raios cósmicos vêm.

Inicialmente, foi necessária a compreensão de séries de Fourier, para que fossem aplicadas nos histogramas das coordenadas angulares dos raios cósmicos, de modo a fazermos as análises. Foram usados os dados experimentais do observatório para graficar em Python os histogramas de algumas de suas coordenadas angulares e de suas energias. Primeiro, fizemos o tratamento dos dados dividindo-os entre faixas de energia: um grupo de energias entre 4 e 8 EeV (88.325 eventos) e outro grupo com energias maiores que 8 EeV (36.927 eventos).

Com isso, foram elaborados histogramas nessas faixas de energia, e para cada uma, um histograma dos ângulos azimutais (φ), dos cossenos ao quadrado dos ângulos zenitais [$\cos^2(\theta)$], e dos ângulos das ascensões retas (α), tais como mostrado nas figuras de 1 a 6.



Figuras 1, 2 e 3: Histogramas dos ângulos azimutais (φ), dos cossenos ao quadrado dos ângulos zenitais, e ângulos das ascensões retas (α). Energias entre 4 e 8 EeV.



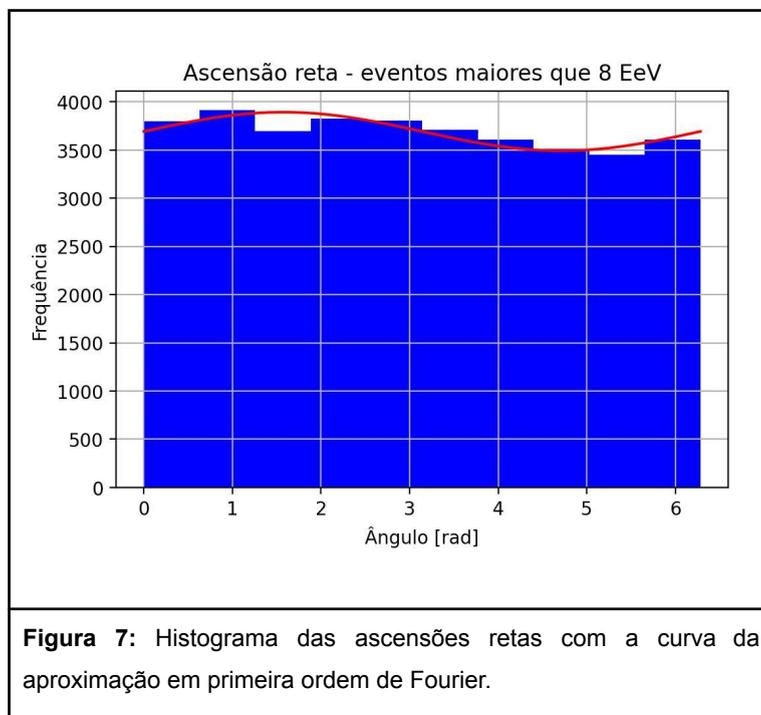
Figuras 4, 5 e 6: Histogramas dos ângulos azimutais (φ), dos cossenos ao quadrado dos ângulos zenitais, e ângulos das ascensões retas (α). Energias maiores que 8 EeV.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Atentando-nos para o histograma da ascensão reta (α) com energias maiores que 8 EeV (figura 7), foi possível notar que sua curva possui sutil comportamento oscilatório. Então, pelas séries de Fourier, dadas pela equação 1:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(nx) \quad (1)$$

fizemos a análise de Rayleigh aplicando tal ângulo na equação em $a_1 = \frac{2}{N^*} \sum_{i=1}^N w_i \cos(x_i)$, usando apenas os termos até $n=1$ (aproximação dipolar), onde x_i pode ser o ângulo de ascensão reta α ou o ângulo azimutal φ , e w_i é o valor dos pesos, obtido pelo fator de normalização $N^* = \sum_{i=1}^N w_i$.



Calculamos o termo a_0 , que é a média dos N eventos distribuídos nos 10 intervalos, sendo, $N = \frac{36927}{10} = 3692,7$ (termo monopolar da série) e os coeficientes a_1 e b_1 são aqueles que fornecem a contribuição dipolar. Observando que as oscilações apresentadas pelo histograma variam entre as frequências de 3.500 a 4.000, estimamos inicialmente um valor para o termo a_1 , de modo a obter a curva que descrevesse este comportamento. Considerando $a_1 = 200$, obtivemos a curva em vermelho na figura 7, que representa a aproximação dipolar através da série de Fourier. Apesar de ter sido feita apenas uma estimativa para a curva, os valores dos termos a_1 e b_1 podem ser calculados por meio da equação 1. Não foi dada continuidade aos cálculos devido a necessidade de interrupção do projeto.

CONCLUSÕES:

Este projeto foi desenvolvido parcialmente, e tivemos como objetivo replicar o estudo do Observatório Pierre Auger, no qual comprovou-se o padrão de anisotropia dos raios cósmicos ultraenergéticos incidentes na Terra. Para isso, usamos como instrumento matemático as séries de Fourier, aplicadas aos ângulos de incidência dos raios cósmicos. Neste projeto, somente foi usado o ângulo de ascensão reta. Trabalhamos com dados obtidos diretamente do Observatório Pierre Auger, e observando o comportamento oscilatório analisado na faixa de energias mais altas, confirmamos parte do estudo, em que os raios cósmicos não incidem de maneira uniforme. Observamos que na faixa de energia acima de 8 EeV há uma região do céu da qual se originam mais raios cósmicos do que de outra.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Aab et al. [The Pierre Auger Collaboration], **"The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory"**, Nucl. Instrum. Meth. A 798 (2015) 172-213.
- [2] ARFKEN, George; WEBER, Hans Hermann. **Física matemática: métodos matemáticos para engenharia e física**. Elsevier, 2007.
- [3] SODRÉ, Ulysses. **Séries de Fourier, Notas de aula**. [S. l.], 25 mar. 2023. Disponível em: <http://www.uel.br/projetos/matessencial/superior/pdfs/sfourier.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2023.
- [4] Esteban Roulet for the Pierre Auger Collaboration, **"Large-scale anisotropies above 0.03 EeV measured by the Pierre Auger Observatory"**, Proceedings da International Cosmic Ray Conference 2019, em Proceedings of Science PoS(ICRC2019)408.