



ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÕES ANGULARES DE RAIOS CÓSMICOS ULTRAENERGÉTICOS

Palavras-Chave: RAIOS CÓSMICOS ULTRAENERGÉTICOS, OBSERVATÓRIO PIERRE AUGER, MODULAÇÃO DIPOLAR.

Autores:

JUAN FELIPE SERIGHELLI, IFGW – UNICAMP

Prof^a. Dr^a. CAROLA DOBRIGKEIT CHINELLATO (orientadora), IFGW - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A radiação cósmica, i.e., todo tipo de radiação que provém do cosmos inclusos os raios ultraenergéticos, é um fluxo de partículas de alta energia que chega até nosso planeta [1]. Essas partículas são originadas em eventos cataclísmicos como, possivelmente, em núcleos de galáxias ativas, galáxias-berçário e erupções de raios gama, ainda a serem identificados [2]. Elas atingem continuamente a Terra depois de sofrer diversas acelerações em campos magnéticos cósmicos durante seu percurso.

No estudo de anisotropias com o objetivo de encontrar as fontes de aceleração de raios cósmicos de ultra-alta energia, busca-se fazer um estudo em várias escalas angulares nas direções de chegada das partículas à Terra. Nas procuras em regime de largas escalas angulares, há evidência de uma modulação dipolar no fluxo dos raios cósmicos com energias acima de 8 EeV, com a amplitude da modulação dipolar aumentando com a energia [3].

OBJETIVOS:

O objetivo deste projeto de pesquisa de iniciação científica, sabendo que os dados obtidos pelo Observatório Pierre Auger interessam para os estudos de anisotropias de raios cósmicos com energias de 10^{18} eV, é analisar os eventos e fazer a expansão do fluxo observado em função das variáveis angulares em séries de Fourier, a fim de obter a contribuição do termo dipolar.

Especificamente, é necessário fazer a leitura e separação dos eventos coletados pelo Observatório nos diferentes intervalos de energia, realizar a plotagem de diversos histogramas, a saber, o histograma das energias, o das ascensões retas, o dos quadrados dos cossenos dos

ângulos zenitais locais e dos ângulos azimutais locais. Por fim, fazer a expansão em séries de Fourier, em uma variável, para encontrar o primeiro termo dipolar.

METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Primeiramente, foi realizada a leitura dos dados dos eventos coletados pelo Observatório desde 1º janeiro de 2004 até 31 de agosto de 2018 [4], em seguida foram separados em dois grupos a depender da energia do evento, entre 4 e 8 EeV e acima de 8 EeV, com 88325 e 36927 eventos, respectivamente. Posteriormente, foram plotados os histogramas de energia, ou melhor, do logaritmo da energia dos eventos, para melhor serem observados uma vez que o número de eventos cai rapidamente com o aumento da energia, para os dois intervalos, como é possível observar na Figura 1.

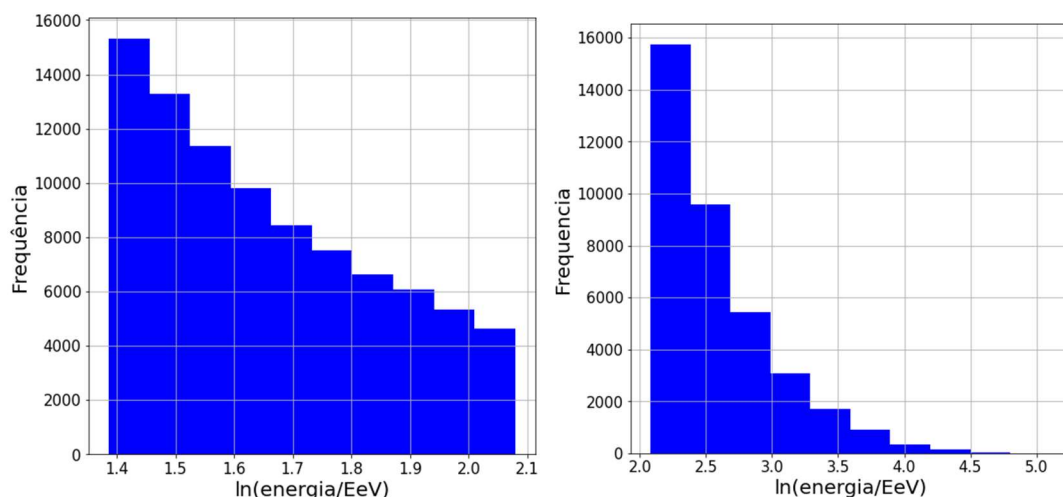


Figura 1: À esquerda - histograma do logaritmo neperiano da energia dos eventos no intervalo de 4 a 8 EeV. À direita - histograma do logaritmo neperiano da energia dos eventos acima de 8 EeV.

Em seguida, foram plotados os histogramas do $\cos^2(\theta)$, θ sendo os ângulos zenitais locais (Figura 2).

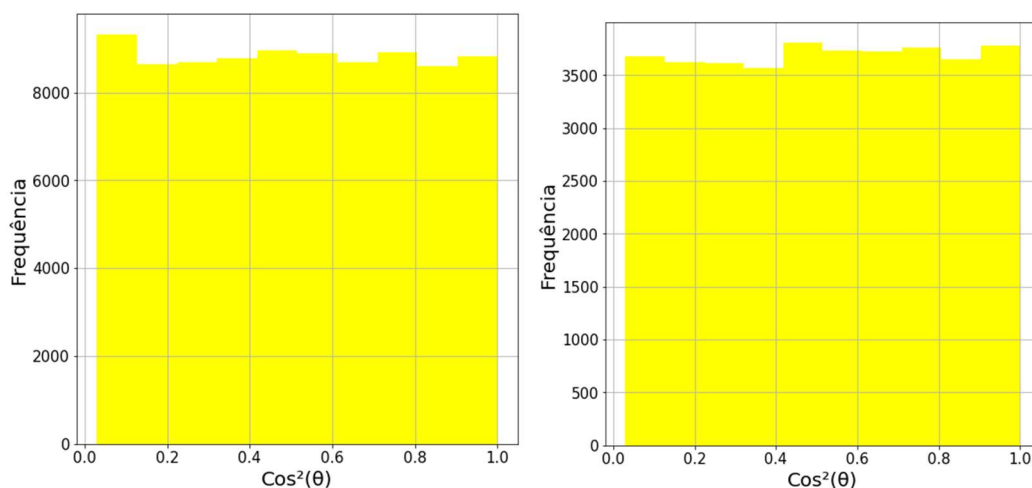


Figura 2: À esquerda - histograma de $\cos^2(\theta)$ para o intervalo de 4 a 8 EeV. À direita - eventos com energias acima de 8 EeV

Após, foram plotados os histogramas de ascensão reta, em radianos. A ascensão reta é a coordenada que usa como plano de referência o equador celeste e são os ângulos medidos em torno do equador celeste, com sentido para leste a partir do equinócio vernal. Abaixo, na Figura 3, podemos verificar os histogramas para ambos intervalos. Após, plotamos o histograma dos ângulos azimutais locais ϕ (Figura 4).

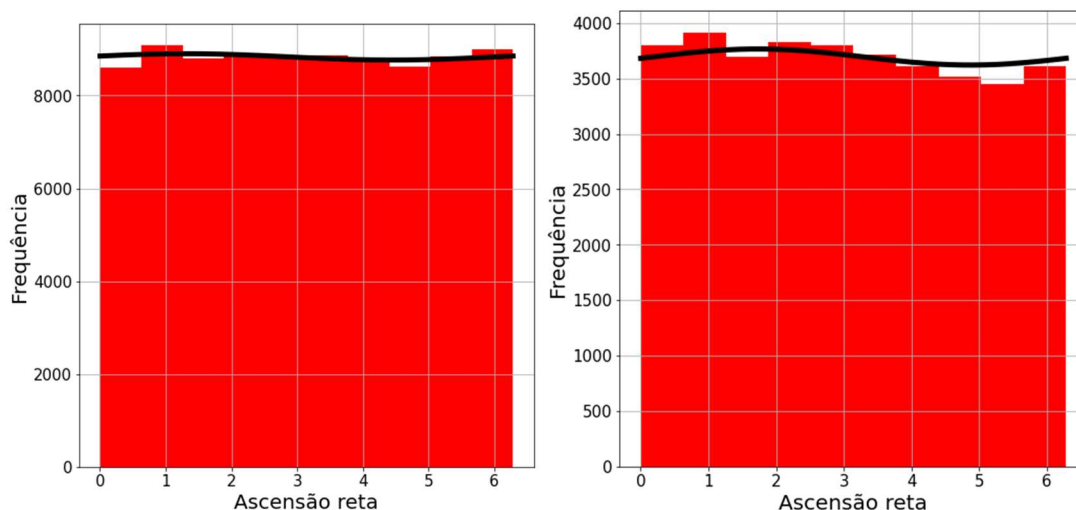


Figura 3: À esquerda - histograma dos ângulos de ascensão reta para eventos com intervalo de energia de 4 a 8 EeV. À direita - histograma da ascensão reta para eventos acima de 8 EeV.

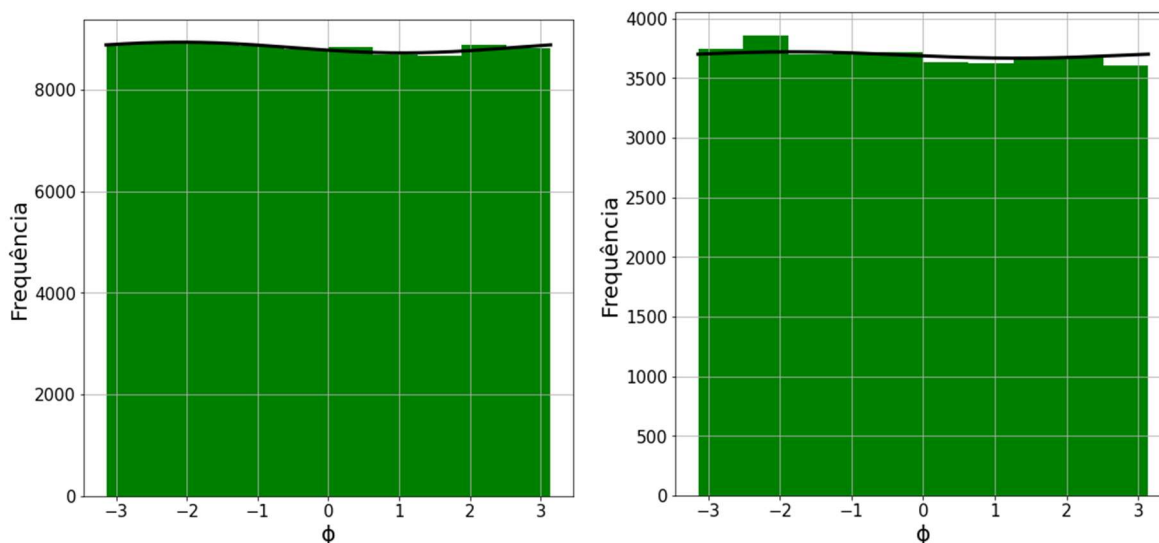


Figura 4: À esquerda - histograma de ϕ para eventos no intervalo de 4 a 8 EeV. À direita - para eventos acima de 8 EeV.

Podemos observar nas figuras 3 e 4 que há uma função, em preto, modulando as barras dos histogramas, que decorre da expansão em série de Fourier das ascensões retas e dos ângulos azimutais locais. Podemos usar a Eq. (1) como aproximação para a série de Fourier de primeira ordem

$$f(\alpha) = \frac{A_0}{2} + A\cos(\alpha) + B\sin(\alpha) \quad (1)$$

sendo que em análise de anisotropia de raios cósmicos, podemos reescrever a Eq. (1) da seguinte maneira (Eq. 2)

$$f(\alpha) \approx N_0[1 + a\cos(\alpha) + b\sen(\alpha)] \quad (2)$$

onde $N_0 = \frac{A_0}{2} = \frac{N}{n}$, e as constantes a e b de acordo com as equações (3) e (4). Analogamente, a expansão para o ângulo azimutal ϕ , apenas trocando a variável α por ϕ

$$a = \frac{A}{N_0} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \cos(\alpha_k) \quad (3)$$

$$b = \frac{B}{N_0} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \sen(\alpha_k) \quad (4)$$

sendo N o número total de eventos do intervalo. Inserimos todos os valores de ascensão reta (α) e dos ângulos azimutais locais (ϕ) para encontrar a e b e, com isso, podemos achar, finalmente, a expansão de Fourier até a primeira ordem, em cada variável, que descreve as distribuições.

CONCLUSÕES:

O estudo da anisotropia de raios cósmicos de ultra-alta energia requer um passo a passo no seu desenvolvimento que busque entender os dados que são captados e gerados nos detectores do Observatório Pierre Auger. Neste caso, foi realizada a análise da distribuição das variáveis angulares dos raios cósmicos detectados, fazendo:

- i. Acesso e leitura dos milhares de eventos captados pelo Observatório Pierre Auger e disponibilizados ao público em seu site.
- ii. Feita a separação dos eventos em dois intervalos de energia, entre 4 a 8 EeV e acima de 8 EeV.
- ii. Feitos os histogramas da distribuição dos eventos em ângulos zenital local (θ), ascensão reta (α) e dos ângulos azimutais locais (ϕ).
- iv. Feita a expansão de Fourier das distribuições dos eventos para α e ϕ , realizando suas modulações dipolares.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BUSTAMANTE, Martha Cecilia. **A descoberta dos raios cósmicos ou o problema da ionização do ar atmosférico**. Revista Brasileira de Ensino de Física, Paris, v. 35, n. 2, p. 2603-2609, 24 abr. 2013.
- [2] SOMMERS, Paul. **Cosmic ray anisotropy analysis with a full-sky observatory**. Astroparticle Physics, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 271-286, jan. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0927-6505\(00\)00130-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0927-6505(00)00130-4).
- [3] FRANCO, Danelise Oliveira. **Estudo Da Anisotropia Dipolar De Raios Cósmicos Detectados No Observatório Pierre Auger e de Sua Dependência Da Declinação**. 2018. 140 f. Dissertação (mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Física, IFGW - UNICAMP, Campinas.
- [4] Pierre Auger Observatory. Disponível em: <https://auger.org/outreach/public-data/data-2>. Acesso em 13 abr. 2023