



ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÕES ANGULARES DE DIREÇÕES DE RAIOS CÓSMICOS ULTRAENERGÉTICOS

Palavras-Chave: anisotropia, raios cósmicos, análise de Rayleigh

Autoras:

Geovanna Macedo de Moura, DRCC– IFGW

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

INTRODUÇÃO:

Para a pesquisa em raios cósmicos, estuda-se a direção de chegada deles à Terra a fim de obter informação sobre sua origem e propagação no universo. Em regime de larga escala angular, foram encontradas evidências de uma modulação dipolar no fluxo de raios cósmicos, ou seja, as direções de chegada são de caráter anisotrópico, com o dipolo indicando, de forma observacional, qual pode ser a origem dos raios cósmicos de mais altas energias. Assim, o objetivo deste trabalho é analisar os dados de direções dos raios cósmicos detectados pelo Observatório Pierre Auger a fim de estudar o caráter anisotrópico nessas condições angulares, com base na expansão do fluxo em harmônicos esféricos e na comparação com os estudos feitos pela Colaboração Pierre Auger.

METODOLOGIA:

Primeiramente, vamos analisar um conjunto de dados de raios cósmicos que chegaram à Terra e foram detectados no Observatório Pierre Auger entre 1º de janeiro de 2004 e 31 de agosto de 2018, com os ângulos zenitais do raio cósmico primário (que ao atravessar a atmosfera dá origem a um chuva atmosférica que é detectado no observatório) indo até aproximadamente 80°, para energias no intervalo entre 4 e 8 EeV (1 EeV = 10¹⁸ eV) e para energias acima de 8 EeV. Depois, vamos ver se a distribuição da ascensão reta apresenta a característica de uma função dipolar. Estudaremos então a expansão das distribuições angulares da ascensão reta, visando obter os termos significativos do fluxo observado de raios cósmicos em harmônicos esféricos. Para isso, utilizaremos a análise de Rayleigh na ascensão reta α e no ângulo azimutal ϕ , a fim de cobrir toda a esfera e que tem como base a série de Fourier, utilizando como variáveis os ângulos α e ϕ .

Inicialmente, temos que entender a distribuição de direções de chegada dos raios cósmicos na Terra, que é dada pela convolução do fluxo de raios cósmicos em uma direção no céu e a exposição do detector do Observatório. O fluxo é dado por

$$\Phi(\theta, \phi) = \sum_l \sum_m a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi).$$

Podemos aproximar a expansão do fluxo e iniciar admitindo que apenas os termos de dipolo sejam significativos, admitindo o vetor unitário \hat{u} numa direção do céu dada, determinada pela ascensão reta e declinação tal que, se levamos apenas em consideração o termo mais significativo de dipolo, tem-se

$$\Phi(\hat{u}) = \frac{\Phi_0}{4\pi}(1+\mathbf{d}\cdot\hat{u}),$$

onde \mathbf{d} seria nosso vetor dipolo. Já a exposição $\omega(\hat{u})$ depende da área para a detecção da chegada de raios cósmicos, sendo uma função da declinação δ , além da localização geográfica do observatório que, no nosso caso, tem a latitude geográfica $l_{obs} = -35,2^\circ$. A exposição mostra que o Observatório Pierre Auger não cobre a detecção de todo o céu, sendo uma consideração importante para a análise da expansão em harmônicos esféricos. Portanto, a distribuição das direções de chegada dos raios cósmicos é

$$\frac{dN}{d\Omega}(\hat{u}) = \Phi(\hat{u})\omega(\hat{u}).$$

Integrando em relação a ascensão reta, temos

$$\int_0^{2\pi} N(\alpha)d\alpha = N_{total}$$

que nos dá a média da distribuição dos eventos, ou seja, o N_{total} de eventos dividido pelo número de intervalos n .

Agora podemos partir para a análise harmônica, que é feita ponderada com a exposição, considerando a série de Fourier com a_0 sendo a média das distribuição dos eventos. As amplitudes da primeira harmônica na análise de Rayleigh podem ser obtidas a partir das relações

$$a_1^x = \frac{2}{N'} \sum_{i=1}^N w_i \cos(x_i) \quad \text{e} \quad b_1^x = \frac{2}{N'} \sum_{i=1}^N w_i \sin(x_i),$$

onde x pode representar a variável ascensão reta ou a variável ângulo azimutal, e x_i representa a ascensão reta ou o ângulo azimutal do i -ésimo raio cósmico, N é o número de eventos no intervalo considerado de energia e w_i são os respectivos pesos, de modo que N' é o fator de normalização dado pela soma de w_i . Com isso, obtemos a amplitude r_1^x e a fase de modulação φ_1^x do termo dipolar na distribuição da ascensão reta (análogo para ângulo azimutal), ou seja, no plano equatorial celeste, sendo

$$r_1^x = \sqrt{(a_1^x)^2 + (b_1^x)^2} \quad \text{e} \quad \varphi_1^x = \arctan\left(\frac{b_1^x}{a_1^x}\right).$$

Para uma análise inicial, iremos considerar os pesos todos iguais, simplificando os nossos cálculos a

$$f(\alpha) = a_0 + r_1^x \cos(\alpha - \varphi_1^x),$$

onde

$$a_1^x = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \cos(\alpha_i) \quad \text{e} \quad b_1^x = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \sin(\alpha_i).$$

Além disso, calcula-se a probabilidade de uma amplitude maior ou igual a r_1^x apresentar anisotropia ou não, dada por

$$P(\geq r_1^x) = e^{-k_0}, \quad \text{onde} \quad k_0 = \frac{N(r_1^x)^2}{4},$$

ou seja, quanto maior a probabilidade, maior é a chance de a distribuição estudada ser isotrópica.

Para o cálculo do vetor dipolo \mathbf{d} , iremos decompô-lo nas componentes: d_{\perp} , do plano equatorial

celeste, e d_z , ao longo do eixo de rotação da Terra. Logo, a amplitude do vetor dipolo é calculada da seguinte forma

$$d = \sqrt{(d_{\perp})^2 + (d_z)^2}, \text{ com } d_{\perp} \approx \frac{r_1^{\alpha}}{\langle \cos \delta \rangle} \text{ e } d_z \approx \frac{b_1^{\phi}}{\cos l_{obs} \langle \sin \theta \rangle},$$

onde $\langle \cos \delta \rangle$ é média dos cossenos das declinações, $\langle \sin \theta \rangle$ é a média dos senos dos ângulos zenitais e $\cos l_{obs}$ é o cosseno da latitude geográfica do observatório. Para calcular as coordenadas equatoriais (α_d, δ_d) da direção para a qual aponta o vetor dipolo, fazemos

$$\alpha_d \approx \phi_d^{\alpha} \text{ e } \tan \delta_d \approx \frac{d_z}{d_{\perp}}.$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Assim, para raios cósmicos com energias no intervalo entre 4 e 8 EeV, obtemos as figuras 1, 2 que mostram, respectivamente, as distribuições da ascensão reta e dos ângulos azimutais.

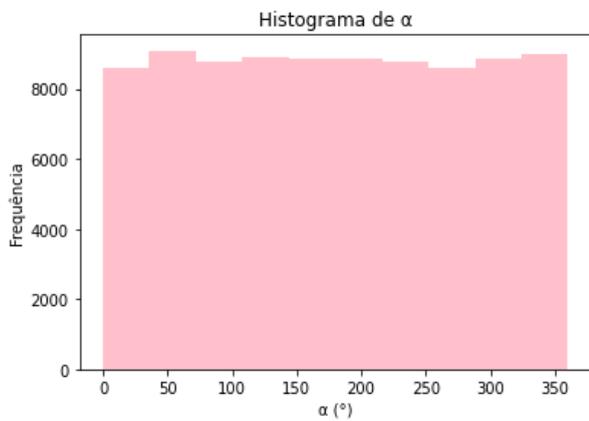


Figura 1.: Histograma de ascensão reta dos raios cósmicos com energias entre 4 EeV e 8 EeV.

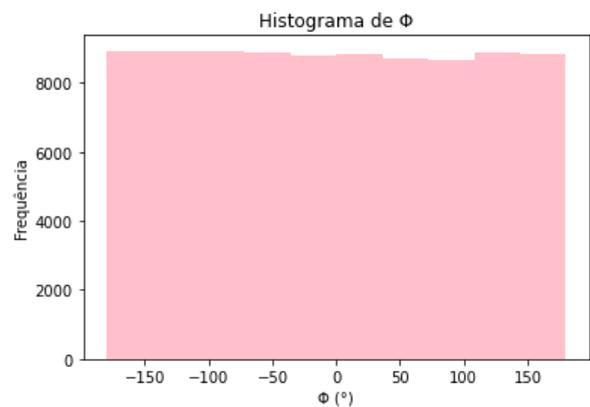


Figura 2.: Histograma do ângulo azimutal dos raios cósmicos com energias dos raios cósmicos entre 4 EeV e 8 EeV.

Vemos que as distribuições das ascensões retas α , dos ângulos azimutais ϕ são aproximadamente uniformes. Contudo, a distribuição do segundo conjunto, em que $E > 8$ EeV, vemos que não há uma uniformidade nas figuras 3 e 4 que mostram, respectivamente, as distribuições da ascensão reta e dos ângulos azimutais para energias $E > 8$ EeV dos raios cósmicos.

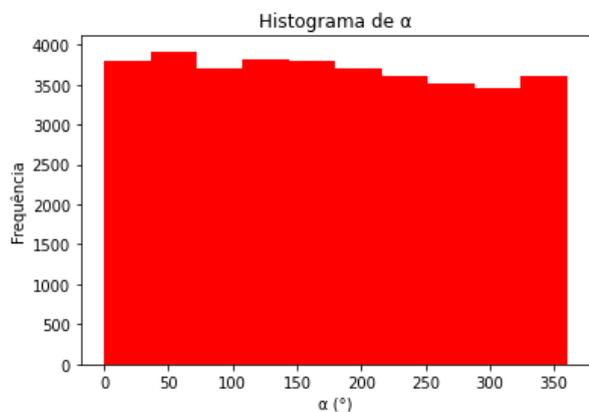


Figura 3 - Histograma da ascensão reta para $E > 8$ EeV. Nota-se, de forma mais visível, o padrão da função dipolar, com maior número de eventos à esquerda do histograma do que à direita.

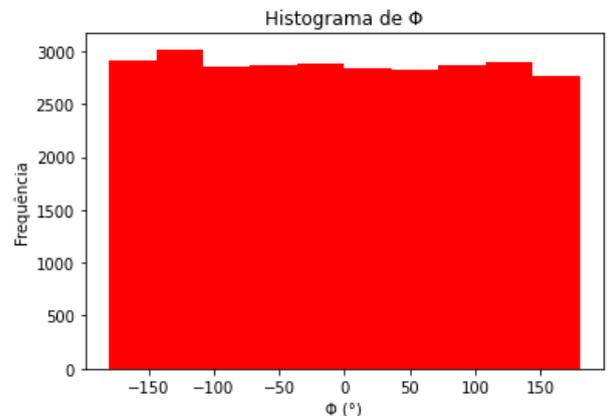


Figura 4 - Histograma do ângulo azimutal para $E > 8$ EeV. Assim como para as energias entre 4 EeV e 8 EeV, há uma distribuição aproximadamente uniforme para ϕ .

Vamos mostrar a análise primeiramente da figura 3, em que temos $N_{total} = 36927$ eventos. Logo, a média da distribuição dos eventos será $\frac{N_{total}}{n} = \frac{36927}{10} = 3692,7 = a_0$ da série de Fourier, com a análise harmônica nos dando $a_1^\alpha = -0,0075$ e $b_1^\alpha = 0,046$, sendo a incerteza das componentes calculados por $\sigma = \sqrt{\frac{2}{N_{total}}}$, o resultado nos dá

$$r_1^\alpha = 0,046 \pm 0,007 \text{ e } \varphi_1^\alpha = (99 \pm 9)^\circ.$$

Por fim, obtemos os seguintes resultados nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Resultados para ascensão reta α .						
Energia (EeV)	Número de eventos N	a_1^α	b_1^α	r_1^α	φ_1^α ($^\circ$)	Probabilidade ($\geq r_1^\alpha$)
[4,8]	88325	$0,002 \pm 0,005$	$0,007 \pm 0,005$	$0,008 \pm 0,005$	75 ± 35	0,27
≥ 8	36927	$-0,008 \pm 0,007$	$0,046 \pm 0,007$	$0,046 \pm 0,007$	99 ± 9	$1,5 \cdot 10^{-9}$

Tabela 1 - Resultados do número de eventos, componentes da amplitude r e da modulação φ em relação ao ângulo ascensão reta, além da probabilidade de isotropia para valores maiores que a amplitude, tanto para energia entre 4 e 8 EeV quanto para acima de 8 EeV.

Tabela 2: Resultados para ângulo azimutal ϕ .						
Energia (EeV)	Número de eventos N	a_1^ϕ	b_1^ϕ	r_1^ϕ	φ_1^ϕ ($^\circ$)	Probabilidade ($\geq r_1^\phi$)
[4,8]	88325	$-0,006 \pm 0,005$	$-0,010 \pm 0,005$	$0,012 \pm 0,005$	-120 ± 23	0,04
≥ 8	36927	$-0,004 \pm 0,007$	$-0,017 \pm 0,007$	$0,017 \pm 0,007$	-105 ± 24	0,064

Tabela 2 - Resultados do número de eventos, componentes da amplitude r e da modulação φ em relação ao ângulo azimutal, além da probabilidade de isotropia para valores maiores que a amplitude, tanto para energia entre 4 e 8 EeV quanto para acima de 8 EeV.

Analisando a Tabela 1, vemos que para energias entre 4 e 8 EeV para a ascensão reta, a probabilidade é maior de isotropia do que anisotropia. Já para energias acima de 8 EeV, a probabilidade de anisotropia aumenta consideravelmente. Na Tabela 2, para ângulo azimutal, vemos um comportamento similar, mas não tendo a mesma discrepância que a ascensão reta.

Agora, calculando os dados do dipolo, obtemos os resultados dados na tabela 3.

Tabela 3: Resultados das componentes do dipolo d .					
Energia (EeV)	d_z	d_\perp	d	δ_d ($^\circ$)	α_d ($^\circ$)
[4,8]	$-0,020 \pm 0,019$	$0,012 \pm 0,013$	$0,023 \pm 0,023$	-59 ± 12	75 ± 35
≥ 8	$-0,031 \pm 0,019$	$0,060 \pm 0,013$	$0,067 \pm 0,023$	-28 ± 12	99 ± 35

Tabela 3 - Resultados das componentes e do dipolo d e das coordenadas equatoriais do dipolo, tanto para energia entre 4 e 8 EeV quanto para acima de 8 EeV.

CONCLUSÕES:

Comparando os resultados aqui obtidos com os apresentados pela Colaboração Pierre Auger no seu artigo “Large-scale anisotropies above 0.03 EeV measured by the Pierre Auger Observatory” (2019), vemos que os resultados obtidos são aproximadamente os mesmos do artigo, fazendo com que a nossa primeira aproximação esteja consistente com os resultados publicados pela Colaboração, como mostra a tabela 4.

Tabela 4.: Resultados do artigo das componentes do dipolo d .					
Energia (EeV)	d_z	d_{\perp}	d	δ_d (°)	α_d (°)
[4,8]	$-0,016 \pm 0,009$	$0,010^{+0,007}_{-0,004}$	$0,019^{+0,009}_{-0,006}$	-57^{+24}_{-20}	69 ± 46
≥ 8	$-0,028 \pm 0,014$	$0,060^{+0,010}_{-0,009}$	$0,066^{+0,012}_{-0,008}$	-25 ± 11	98 ± 9

Tabela 4 - Resultados retirados do artigo “Large-scale anisotropies above 0.03 EeV measured by the Pierre Auger Observatory” (2019).

Logo, a fim de aprimorar a análise de Rayleigh, o próximo passo a ser tomado seria fazer uma correção na nossa análise, ou seja, considerar os pesos w_i nos cálculos. Contudo, já conseguimos encontrar o caráter anisotrópico em nossas análises nas condições angulares apresentadas (ângulos zenitais dos eventos indo até aproximadamente 80°) para energias entre 4 e 8 EeV e para acima de 8 EeV, principalmente para o ângulo de ascensão reta na faixa de energias maiores. Com base nisso, podemos entender melhor a direção de chegada e confirmar a indicação da origem extragaláctica dos raios cósmicos na Terra.

BIBLIOGRAFIA

THE PIERRE AUGER COLLABORATION. **The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory**. (21 de outubro de 2015). Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215008086?via%3Dihub>> Acesso em: 10 de março de 2023.

THE PIERRE AUGER COLLABORATION. **Observation of a Large-scale Anisotropy in the Arrival Directions of Cosmic Rays above 8×10^{18} eV**, A. Aab et al. , Science 357 (2017) 1266-1270. Disponível em: <<https://doi.org/10.1126/science.aan4338>>. Acesso em: 10 de março de 2023.

WIKIPÉDIA, **Série de Fourier**. 2023. Disponível em:

<https://pt.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9rie_de_Fourier> Acesso em: 4 de março de 2023.

FRANCO, Danelise de Oliveira. **Estudo da Anisotropia Dipolar de Raios Cósmicos detectados no observatório Pierre Auger e da sua dependência da declinação**. Tese de Mestrado, UNICAMP 2018. Disponível em:

<<https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/1060346>>.

ROULET, Esteban for the Pierre Auger Collaboration. **Large-scale anisotropies above 0.03 EeV measured by the Pierre Auger Observatory**. Proceedings of International Cosmic Ray Conference 2019. Publicado em Proceedings of Science PoS(ICRC2019)408. Acesso em: 30 de Julho de 2023.