



ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÕES ANGULARES DE DIREÇÕES DE RAIOS CÓSMICOS ULTRAENERGÉTICOS DETECTADOS NO OBSERVATÓRIO PIERRE AUGER

Palavras-Chave: RAIOS CÓSMICOS, ANISOTROPIA, OBSERVATÓRIO PIERRE AUGER

Autores:

RAUL SILVA CHUN, IFGW – UNICAMP

Prof(a). Dr(a). CAROLA DOBRIGKEIT CHINELLATO (Orientadora), IFGW – UNICAMP

1 Introdução

O estudo de anisotropias em raios cósmicos ultraenergéticos é uma ferramenta essencial para a identificação de suas possíveis fontes astrofísicas. Esses núcleos com energias acima de 10^{18} eV percorrem grandes distâncias, sendo sensíveis à estrutura do universo em larga escala, bem como aos campos magnéticos atravessados, tanto o intergaláctico quanto o galáctico. A caracterização da distribuição angular de suas direções de chegada é, portanto, um passo fundamental na astrofísica de partículas de altíssimas energias. O Observatório Pierre Auger, localizado na Argentina, é atualmente o maior experimento dedicado à detecção de raios cósmicos ultraenergéticos, cobrindo uma área de 3000 km^2 [1]. Estudos prévios apontam a presença de um dipolo significativo na distribuição dos eventos com $E \geq 8 \text{ EeV}$ [2], além de tendências compatíveis com uma origem extragaláctica das partículas [1, 3].

De um ponto de vista figurativo, a análise de anisotropias angulares na esfera celeste é semelhante à decomposição de ondas em harmônicos fundamentais. Assim como um acorde musical pode ser decomposto a uma onda de um ciclo, no modo fundamental ($n = 1$), uma distribuição de direções de raios cósmicos no céu pode ser decomposta em harmônicos esféricos e, em primeira ordem, interpretada como uma região do céu com excesso de eventos (pico de “intensidade”) seguida por uma região simétrica com déficit (vale) para o termo dipolar ($\ell = 1$). Já componentes de ordem superior ($\ell \geq 2$) descrevem padrões mais complexos.

Neste trabalho, realizamos uma análise de distribuições angulares de direções de raios cósmicos ultraenergéticos, com foco na extração dos componentes dipolares ($\ell = 1$) em diferentes faixas de energia: 4 a 8 EeV, $\geq 8 \text{ EeV}$, 8 a 16 EeV, 16 a 32 EeV e $\geq 32 \text{ EeV}$. A análise utiliza os métodos de Rayleigh e expansão em harmônicos esféricos para determinar as amplitudes e fases das modulações em ascensão reta (α) e azimute (ϕ).

2 Metodologia

2.1 Seleção de dados

Inicialmente, carregamos os dados do Observatório Pierre Auger num código (declinação δ , ascensão reta α , energia corrigida E_{cor} , instante UTC, ângulos de zenite θ e azimute ϕ e contagem de estações de detectores ativos) e filtramos apenas aqueles na faixa de energia desejada e com ângulo zenital $\theta < 80^\circ$, de 1 de janeiro de 2004 até 31 de dezembro de 2022 às 23:59:59 UTC. Paralelamente, também selecionamos apenas os eventos que satisfazem o seguinte critério de detecção: no instante em que o maior pulso de sinal é registrado, pelo menos cinco das seis estações vizinhas à estação com maior sinal devem estar ativas, garantindo que o evento ocorreu em uma região bem coberta por detectores [1]. Uma célula ativa é limitada por cinco ou seis estações ativas.

2.2 Correção Geométrica

Pesos são utilizados para levar em conta a exposição do Observatório Pierre Auger ligeiramente não uniforme da matriz ao longo do tempo (devido à instalação gradual dos detectores e às interrupções esporádicas em seu funcionamento) e a inclinação da matriz (em média inclinada em $0,2^\circ$ no sentido de $\phi_0 = -30^\circ$, com ϕ_0 medido anti-horariamente a partir da direção leste). Esse peso serve para compensar desigualdades na coleta de dados. [1]

Cada evento detectado recebe um tempo sideral α_0 – corresponde à ascensão reta do meridiano local – que é agrupado em 360 intervalos de 1° . Para cada intervalo, foi obtido o número total de células ativas $N_{\text{cell}}(\alpha_i)$ e, por conseguinte, a média global $\langle N_{\text{cell}} \rangle$. Enfim, foi possível calcular o número relativo de células ativas:

$$N_{\text{rel}} = \frac{N_{\text{cell}}(\alpha_i)}{\langle N_{\text{cell}} \rangle},$$

utilizado para fazer a correção na reconstrução do dipolo tridimensional. Também, para cada evento e intervalo com tempo sideral α_i associamos um fator geométrico

$$G_i = 1 + 0,003 \tan \theta_i \cos(\phi_i - \phi_0), \quad \phi_0 = -30^\circ.$$

Finalmente, definem-se os pesos w_i , atribuídos a cada evento i , para corrigir os efeitos de exposição não uniforme do arranjo ao longo do tempo, bem como a inclinação média da superfície detectora:

$$w_i = \frac{1}{N_{\text{rel}}(\alpha_{\text{sid}}) G_i}.$$

2.3 Coeficientes harmônicos

Para investigar a presença de modulações angulares nos dados, extraímos os coeficientes harmônicos da distribuição dipolar dos eventos em ascensão reta e azimute. Essa análise permite identificar possíveis anisotropias associadas a estruturas de grande escala no céu. Os coeficientes

harmônicos ponderados de ordem ℓ são dados por:

$$a_\ell = \frac{2}{W} \sum_i w_i \cos(\ell x_i), \quad b_\ell = \frac{2}{W} \sum_i w_i \sin(\ell x_i),$$

com $W = \sum_i w_i$ e $x_i = \alpha_i$ (ascensão reta) ou ϕ_i (azimute).

Para a análise de Rayleigh em ascensão reta, isto é, no plano equatorial, a amplitude $r_\ell = \sqrt{a_\ell^2 + b_\ell^2}$ e a fase $\phi_\ell = \arctan(b_\ell/a_\ell)/\ell$ descrevem a intensidade e a direção da modulação. A probabilidade de – considerando um cenário de isotropia – observarmos um valor de amplitude igual ou maior ao que medimos foi obtida pela estatística de Rayleigh,

$$P(\geq r_\ell) = \exp(-W (r_\ell)^2/4),$$

Finalmente, para reconstruir o dipolo tridimensional, usamos o primeiro harmônico em α ($\ell = 1$) para a componente equatorial,

$$d_\perp = \frac{r_1^\alpha}{\langle \cos \delta \rangle}, \quad \alpha_d = \phi_1^\alpha \frac{180^\circ}{\pi},$$

e o primeiro harmônico em ϕ para a componente vertical,

$$d_z = \frac{b_1^\phi}{\cos(\varphi_{\text{obs}}) \langle \sin \theta \rangle}, \quad \delta_d = \arctan(d_z/d_\perp) \frac{180^\circ}{\pi},$$

onde $\varphi_{\text{obs}} = -35.2^\circ$ é a latitude do observatório. A amplitude total do dipolo é $d = \sqrt{d_\perp^2 + d_z^2}$. Calculamos também o segundo harmônico ($\ell = 2$) em ambos os ângulos para verificar sinais quadrupolares, mas as amplitudes obtidas foram compatíveis com flutuações estatísticas.

As incertezas foram calculadas por propagação de erro a partir das equações anteriores: as incertezas de $\langle \sin \theta \rangle$ e $\langle \cos \delta \rangle$ foram estimadas como o desvio-padrão da média dividido por \sqrt{N} ; para os coeficientes harmônicos a_1 e b_1 , usou-se propagação via derivadas parciais por uma aproximação [3, 4]; para reconstruir o dipolo 3D, obteve-se Δr_1 e $\Delta \phi_1$ de forma exata a partir de $\Delta a_1, \Delta b_1$ pelas fórmulas

$$\Delta r_1 = \sqrt{\left(\frac{a_1}{r_1} \Delta a_1\right)^2 + \left(\frac{b_1}{r_1} \Delta b_1\right)^2}, \quad \Delta \phi_1 = \sqrt{\left(\frac{b_1}{a_1^2 + b_1^2} \Delta a_1\right)^2 + \left(\frac{a_1}{a_1^2 + b_1^2} \Delta b_1\right)^2},$$

e, finalmente, todos esses erros foram propagados para d_\perp , d_z , d , α_d e δ_d .

3 Resultados

A Tabela 1 apresenta os coeficientes da primeira harmônica em ascensão reta (α) para diferentes faixas de energia dos eventos detectados pelo Observatório Pierre Auger. Os parâmetros a_1^α e b_1^α correspondem às projeções da modulação harmônica nas direções de $\cos \alpha$ e $\sin \alpha$, respectivamente. A amplitude r_1^α quantifica a intensidade da modulação, enquanto a fase ϕ_1^α (em graus) indica a direção angular do excesso relativo de eventos. Já a Tabela 2 apresenta os parâmetros do vetor de dipolo tridimensional estimado para cada faixa de energia. Os componentes d_\perp e d_z

representam as projeções do dipolo no plano equatorial e perpendicular a este, enquanto d é a amplitude total do dipolo. Os ângulos α_d e δ_d fornecem, respectivamente, a ascensão reta e a declinação da direção do dipolo. A última coluna mostra a amplitude do quadrupolo Q , associada à modulação angular de segunda ordem. A Figura 1 mostra a distribuição normalizada do primeiro harmônico para eventos com $E \geq 8$.

Tabela 1: Coeficientes da 1ª harmônica em ascensão reta (α) para diferentes faixas de energia analisadas.

EeV	N	a_1^α	b_1^α	r_1^α	ϕ_1^α [°]
4–8	118 719	$-0,002 \pm 0,005$	$0,009 \pm 0,005$	$0,010 \pm 0,005$	102 ± 27
≥ 8	49 678	$-0,006 \pm 0,006$	$0,046 \pm 0,006$	$0,047 \pm 0,006$	98 ± 8
8–16	36 659	$-0,004 \pm 0,008$	$0,045 \pm 0,008$	$0,045 \pm 0,008$	95 ± 10
16–32	10 281	$-0,00 \pm 0,01$	$0,05 \pm 0,01$	$0,05 \pm 0,01$	91 ± 15
≥ 32	2 738	$-0,06 \pm 0,03$	$0,04 \pm 0,03$	$0,07 \pm 0,03$	143 ± 22

Tabela 2: Parâmetros do dipolo tridimensional e amplitude do quadrupolo para diferentes faixas de energia analisadas.

EeV	N	d_\perp [%]	d_z [%]	d [%]	α_d [°]	δ_d [°]	Q
4–8	118 719	$1,2 \pm 0,6$	$-1,9 \pm 1,0$	$2,2 \pm 0,9$	$102,0 \pm 30,0$	$-56,6 \pm 0,4$	0,0247
≥ 8	49 678	$6,0 \pm 0,8$	$-4,2 \pm 1,4$	$7,3 \pm 1,1$	$97,6 \pm 8,0$	$-35,3 \pm 0,1$	0,0289
8–16	36 659	$5,8 \pm 1,0$	$-2,9 \pm 1,7$	$6,5 \pm 1,1$	$95,1 \pm 9,7$	$-26,3 \pm 0,2$	0,0273
16–32	10 281	$6,6 \pm 1,8$	$-6,4 \pm 3,1$	$9,2 \pm 2,5$	$90,9 \pm 16,0$	$-44,0 \pm 0,3$	0,0581
≥ 32	2 738	$9,0 \pm 3,6$	$-14,5 \pm 6,1$	$17,1 \pm 5,6$	$142,4 \pm 23,0$	$-58,1 \pm 0,3$	0,1240

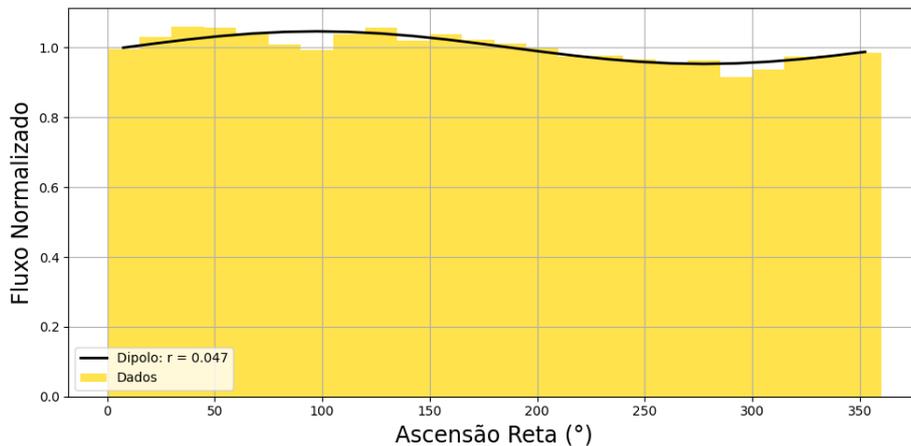


Figura 1: Distribuição normalizada dos eventos com $E \geq 8$ EeV em 24 intervalos de 15° de ascensão reta, sobreposta à curva de ajuste do primeiro harmônico.

Discussões Finais

Estabelecemos, por meio de uma expansão do fluxo em harmônicos esféricos segundo o método de Rayleigh, que a distribuição angular de raios cósmicos ultraenergéticos detectados no Observatório Pierre Auger apresenta um sinal dipolar para energias acima de 8 EeV, com uma amplitude de até 17% em energias ≥ 32 EeV. Tal modulação se mantém estável em fase ($\alpha \cong 100^\circ$) e sugere

fortemente uma origem extragaláctica das partículas, em concordância com as previsões de modelos associados à distribuição de fontes próximas e à deflexão nos campos magnéticos galácticos.

Sabe-se que a propagação dos raios cósmicos pelo campo magnético da Via Láctea pode distorcer o padrão dipolar original, alterando sua amplitude e direção observadas na Terra. Estudos recentes mostram que, em energias abaixo de alguns EeV, a direção do dipolo pode ser desviada em direção ao braço espiral interno da galáxia, com coordenadas galácticas aproximadas de $(l, b) \approx (-100^\circ, 0^\circ)$. Esse efeito pode ser relevante para explicar a mudança observada na fase do dipolo em baixas energias. [1]

A partir dos dados utilizados, não foram detectados componentes estatisticamente significativos de ordem quadrupolar. Essas conclusões reforçam a robustez dos métodos de Rayleigh e harmônicos esféricos empregados e motivam estudos adicionais sobre correlações locais de fontes e sobre variações temporais com mais dados do Auger. As diferenças nos resultados em relação ao artigo que faz a mesma análise podem estar relacionadas aos critérios de filtragem dos dados adotados, mas os intervalos de incerteza obtidos se sobrepõem, indicando compatibilidade estatística. [1]

Perspectivas e Continuidade do Trabalho

Para avançar na caracterização das anisotropias de raios cósmicos ultraenergéticos, as próximas etapas incluem incorporar um mapa celeste em cores ou escala de cor, com um gradiente que mostre o excesso/déficit de fluxo em cada região do céu e a introdução ao estudo da correlação angular entre núcleos ativos de galáxias próximas e raios cósmicos ultraenergéticos detectados no Observatório Pierre Auger. A integração dessas técnicas permitirá uma comparação mais robusta com os resultados do Observatório Pierre Auger e contribuirá para a compreensão da origem e propagação dessas partículas extremamente energéticas.

Referências

- [1] Abdul Halim, A., et al. (2024). *Large-scale Cosmic-ray Anisotropies with 19 yr of Data from the Pierre Auger Observatory*. The Astrophysical Journal, 976:48.
- [2] Aab, A., et al. (The Pierre Auger Collaboration) (2017). *Observation of a Large-scale Anisotropy in the Arrival Directions of Cosmic Rays above 8×10^{18} eV*. Science 357, 1266.
- [3] Franco, D. de O. (2018). *Estudo da Anisotropia Dipolar de Raios Cósmicos Detectados no Observatório Pierre Auger e de sua Dependência da Declinação*. Dissertação de Mestrado, IFGW, UNICAMP.
- [4] Rennó, M. (2023). *Estudo das Anisotropias em Raios Cósmicos Ultraenergéticos no Pierre Auger*. Monografia, IFGW, UNICAMP.