



UNICAMP



## ESTUDO DE ANISOTROPIA 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, IFGW – UNICAMP

---

### 1 Introdução

Os raios cósmicos são partículas altamente energéticas – majoritariamente núcleos de átomos – que chegam à Terra vindas de todas as direções do espaço. A compreensão de suas origens e dos mecanismos pelos quais são acelerados é um dos maiores desafios da astrofísica moderna. Os raios cósmicos ultraenergéticos são particularmente interessantes, pois possuem energias superiores a  $10^{18}$  eV e são raros, mas extremamente informativos sobre fenômenos astrofísicos de alta energia. [1]

O Observatório Pierre Auger, localizado na Argentina, tem sido fundamental na detecção e análise dos raios cósmicos ultraenergéticos desde 2004. Um aspecto crucial desse estudo é a análise das direções de chegada dessas partículas. Ao investigar a distribuição angular dos raios cósmicos que atingem a Terra, é possível obter informações valiosas quanto às suas fontes e aos processos que influenciam sua propagação pelo espaço galáctico e extragaláctico. [1, 2]

A pesquisa de anisotropias em pequena escala angular (da ordem de alguns poucos graus) nas direções de chegada dos raios cósmicos ultraenergéticos pode revelar padrões que sugerem a existência de fontes discretas ou regiões específicas do espaço que emitem essas partículas. Para isso, um método amplamente utilizado é o teste de autocorrelação, também conhecido como função de correlação de dois pontos. Neste estudo, aplicamos o teste de autocorrelação às direções dos raios cósmicos detectados pelo Observatório Pierre Auger (de 31/12/2003 a 31/08/2018). Além disso, comparamos esses resultados com um conjunto de direções simuladas assumindo a hipótese de isotropia. A comparação entre os resultados das direções medidas e das direções simuladas nos permite quantificar a probabilidade de que a distribuição angular observada seja isotrópica, utilizando uma análise de verossimilhança.

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados dessa análise, discutindo as implicações das possíveis anisotropias detectadas e o que elas podem nos revelar sobre as fontes e a propagação das partículas no espaço. A busca por aglomerações nas direções dos raios cósmicos pode fornecer pistas essenciais para desvendar os mistérios dessas partículas extremamente energéticas e sua relação com fenômenos astrofísicos de alta energia.

### 2 Metodologia

Para a aplicação dos testes de autocorrelação utilizou-se a linguagem de programação Python em conjunto com as bibliotecas *random*, *numpy*, *matplotlib*, *pandas*, *scipy*. Nesse contexto, a metodologia pode ser dividida nas seguintes etapas:

1. **Sorteio de direções no espaço de acordo com a hipótese de isotropia:** Visando sortear valores de grandezas que caracterizam os raios cósmicos, é possível amostrar direções de incidência de raios cósmicos na Terra com um sorteio randômico. O processo baseia-se em assumir que as direções de incidência no planeta seguem a hipótese de isotropia, isto é, são igualmente prováveis

para todas as direções, possibilitando sortear coordenadas equatoriais  $(\delta, \alpha)$  para caracterizar de forma única uma direção celeste – pelo menos nas proximidades da Terra para as quais os efeitos relativísticos podem ser desprezados.

2. **Avaliação da exposição do Pierre Auger:** A área efetiva ou exposição do Observatório Pierre Auger não é uniforme para todas as direções do céu. Devido à sua localização geográfica, o Observatório Auger registra raios cósmicos provenientes de determinadas direções do céu com maior frequência. Em outras palavras, embora detectores de raios cósmicos registrem partículas com as mais variadas direções de incidência, o observatório é capaz de detectar raios cósmicos provindos de apenas algumas regiões do céu, ou seja, ele é “cego” para algumas regiões celestes.

Nesse contexto, o passo subsequente dessa análise envolve delimitar as simulações à área efetiva de coleta do Observatório Pierre Auger integrada ao longo do tempo. Para realização desse feito, será considerada a função exposição  $\omega$ , que é proporcional à área efetiva do observatório em função do ângulo zenital local. Quanto maior é a exposição para uma declinação, maior será a probabilidade de detecção de partículas provenientes dessa direção.

3. **Aplicação do teste de autocorrelação:** Por fim, a partir de 125252 eventos registrados pelo Observatório Pierre Auger em um período de 15 anos [3], aplicamos o teste estatístico da autocorrelação angular em raios cósmicos de mais alta energia para testar a hipótese de isotropia. Por conta da limitação computacional, optamos por analisar apenas dados de raios cósmicos com energias maiores que 64 EeV e ângulo zenital menor que  $60^\circ$ . Realizamos o mesmo tratamento de dados para coordenadas equatoriais aleatórias e isotrópicas, sorteadas pelos métodos anteriormente citados, e refazemos a simulação  $10^4$  vezes, com a finalidade de obter um valor médio a ser comparado com o observado no Observatório Pierre Auger.

### 3 Resultados e Discussão

Como ilustrado nas Figuras 1 e 2, a partir do estudo foi possível identificar de maneira unívoca direções no céu com base na exposição do Observatório Pierre Auger. Localizado no hemisfério sul, na Argentina, com uma latitude geográfica média de  $35,25^\circ$  sul, o observatório não consegue observar declinações que estejam fora de seu alcance. Considerando apenas eventos com ângulo zenital local máximo de  $60^\circ$ , também conhecidos como eventos “verticais”, o observatório pode observar no máximo declinações de  $-35,25^\circ + 60^\circ = +24,75^\circ$  (hemisfério norte), não registrando raios cósmicos com declinações superiores a esse valor. Assim, a área efetiva de coleta do observatório varia com o ângulo zenital, o que resulta em uma exposição relativa variável para diferentes declinações. Como o observatório está em operação há mais de 15 anos e a Terra está constantemente rotacionando, as observações e registros cobrem toda a gama de ascensões retas.

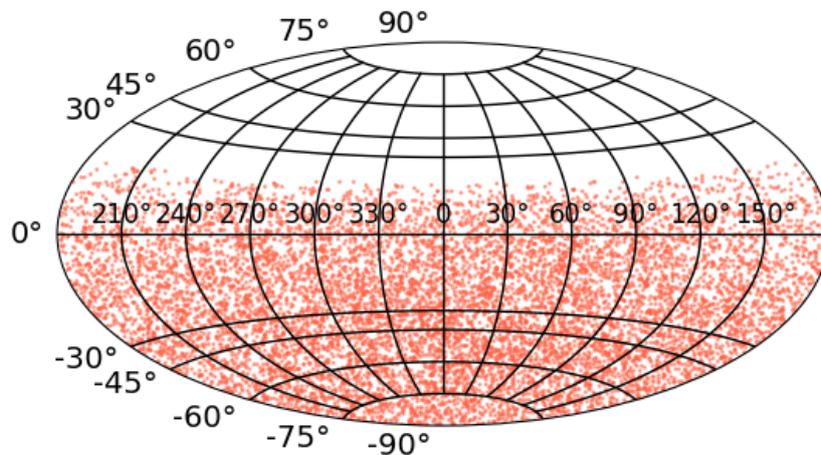


Figura 1: Conjunto de  $10^4$  coordenadas equatoriais sorteadas representadas em uma projeção Aitoff considerando a exposição do Observatório Pierre Auger. Cada ponto representa uma única direção no espaço caracterizada no espaço.

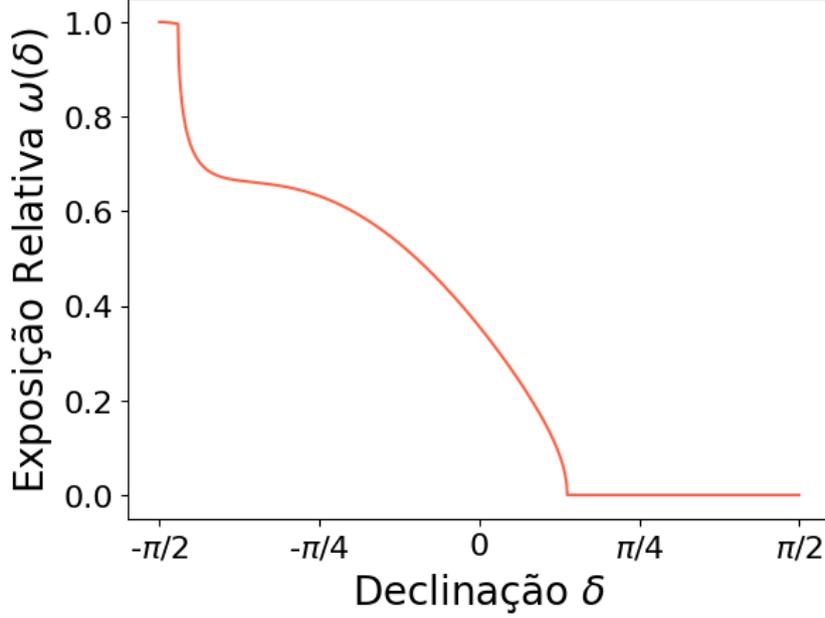


Figura 2: Comportamento da exposição relativa em função da declinação para eventos verticais (com ângulo zenital menor que  $60^\circ$ ).

Levando em conta a área efetiva do observatório, podemos corrigir a sua exposição  $\omega$  em função da declinação  $\delta$  [4]. Consideramos que as coordenadas equatoriais determinam univocamente uma direção no céu, e que a exposição é uma função da declinação e do tempo. Seja  $\ell$  a latitude do observatório e que os chuviscos atmosféricos detectados no observatório tenham um ângulo de ascensão reta  $\alpha$ , com um valor máximo de  $\alpha_{max}$ . Assim, podemos escrever

$$\omega \propto \int \cos \theta \, d\alpha = \int (\cos \ell \cos \delta \cos \alpha + \sin \ell \sin \delta) d\alpha. \quad (1)$$

Portanto,

$$\omega(\delta) \propto \cos \ell \cos \delta \alpha_{max} + \alpha_{max} \sin \ell \sin \delta, \quad (2)$$

onde

$$\alpha_{max} = \begin{cases} 0 & \text{se } \xi > 1, \\ \pi & \text{se } \xi < -1 \\ \arccos(\xi) & \text{c.c.} \end{cases} \quad \text{e} \quad (3)$$

Embora a exposição forneça a área de coleta efetiva integrada no tempo do observatório para um fluxo de cada posição do céu, é de maior interesse a exposição relativa. A exposição relativa é uma quantidade adimensional, com valor entre 0 e 1, obtida dividindo a exposição em cada ponto pela exposição de máximo valor no céu, quando  $\delta = -90^\circ$ , permitindo visualizar as direções com mais detecções.

Por fim, considerando eventos verticais com energias maiores que 64 EeV no banco de dados do Observatório Pierre Auger, também encontramos a distância angular entre cada par de raios cósmicos considerado. No conjunto adotado com 168 direções fez-se uma combinação dois a dois, resultando em  $\binom{168}{2} = 14028$  distâncias angulares  $\psi$ . Em seguida, utilizando a transformada para cartesianas, denotamos cada direção como  $D_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ . Assim, para encontrar cada distância angular  $\psi$  entre dois vetores  $D_i$  e  $D_j$  ( $i, j \in \mathbb{N}$  e  $i \neq j$ ) utilizamos a definição de ângulo entre vetores de módulo unitário, dada pela equação 4.

$$\psi = \arccos(\langle D_i | D_j \rangle). \quad (4)$$

A figura 3 apresenta o histograma da distribuição de distâncias angulares entre 168 coordenadas equatoriais detectadas no Observatório Pierre Auger em comparação a média de distribuições entre 168 coordenadas equatoriais aleatórias e isotrópicas. Para o cálculo da média das distribuições de coordenadas aleatórias e isotrópicas, repetiu-se a simulação  $10^4$  vezes.

Como passo consecutivo, deverá ser aplicada uma análise de verossimilhança entre os dados dos histogramas para quantificar a diferença entre a distribuição dos dados do observatório e a média das distribuições simuladas. Infortunadamente, por falta de tempo, não foi possível incluir a análise de verossimilhança neste resumo, mas ela deverá estar incluída no relatório final do PIBIC.

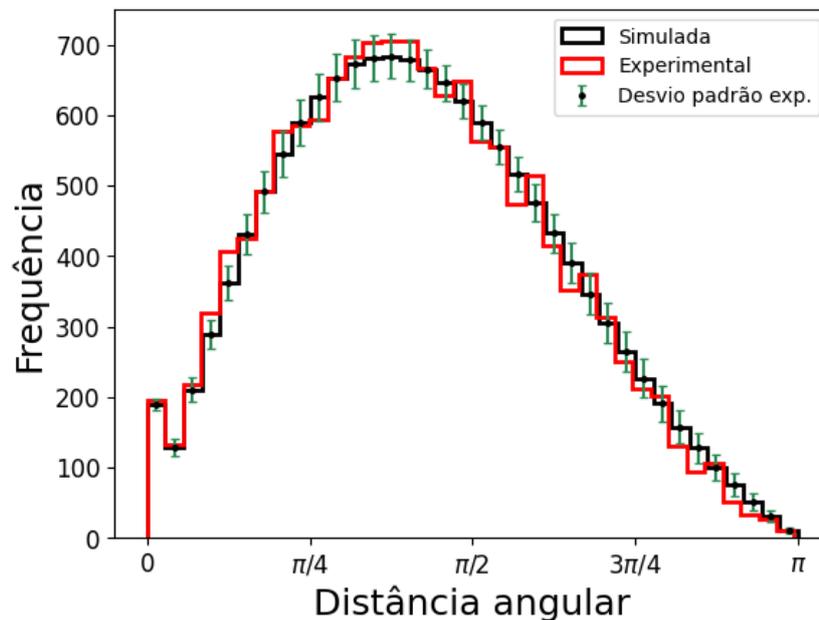


Figura 3: Distribuições das distâncias angulares entre 168 coordenadas equatoriais detectadas no Observatório Pierre Auger (em vermelho) e média das distribuições simuladas (em preto). A média foi obtida a partir da simulação de  $10^4$  conjuntos de 168 direções simuladas assumindo isotropia. O desvio padrão experimental é representado em verde.

## 4 Conclusões

O estudo das direções de chegada dos raios cósmicos à Terra pode revelar sua origem e propagação no espaço. Este projeto envolveu uma análise de autocorrelação nas direções de chegada de raios cósmicos ultraenergéticos registrados no Observatório Pierre Auger, na Argentina, durante um período de 15 anos. O teste de autocorrelação, comum em cosmologia para estudar a distribuição de galáxias, é utilizado para detectar aglomerações de direções que indiquem um excesso de raios cósmicos provenientes das direções de uma ou mais candidatas a fontes. Neste trabalho, estudou-se como deve ser feito o sorteio de direções no espaço de acordo a hipótese de isotropia. Em seguida, o teste de autocorrelação foi aplicado a direções de raios cósmicos detectados no Observatório Pierre Auger e a conjuntos de direções simuladas com base na hipótese de isotropia. Comparando os resultados dos testes com as direções medidas e simuladas, foi possível montar histogramas de distância angular entre as direções.

Durante a realização deste estudo, adquiriu-se e aprimorou-se diversas habilidades em análise e visualização de dados, bem como em modelagem matemática. Este trabalho representa um avanço significativo na compreensão da distribuição angular dos raios cósmicos ultraenergéticos e abre caminho para futuras pesquisas. Como próximo passo, pretende-se realizar uma análise de verossimilhança entre os dados dos histogramas e aplicar outros testes de correlação, como o teste de correlação cruzada, para aprofundar ainda mais a análise. Agradece-se ao CNPq por possibilitar essa pesquisa a partir de uma bolsa PIBIC.

## Referências Bibliográficas

- [1] C. D. Chinellato and R. C. Shellard, “Auger: 20 anos - maior observatório de raios cósmicos do mundo inicia nova etapa histórica,” *Ciência Hoje*, 2019. [Online]. Available: <https://cienciahoje.org.br/artigo/auger-20-anos-maior-observatorio-de-raios-cosmicos-do-mundo-inicia-nova-etapa-historica/>

- [2] C. D. Chinellato, “Projeto PIBIC: Estudo de anisotropia de raios cósmicos ultraenergéticos detectados no Observatório Pierre Auger,” IFGW - UNICAMP, Campinas, Tech. Rep., 2023.
- [3] “Auger open data.” [Online]. Available: <https://opendata.auger.org/data.php>
- [4] D. de Oliveira Franco, “Estudo da anisotropia dipolar de raios cósmicos detectados no Observatório Pierre Auger e de sua dependência da declinação,” (2018).