

# ESTUDO DA DIREÇÃO DE CHEGADA DE RAIOS CÓSMICOS ULTRANERGÉTICOS À TERRA UTILIZANDO SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO

**Palavras-Chave:** RAIOS CÓSMICOS ULTRAENERGÉTICOS, DIREÇÃO DE CHEGADA, SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO

**Autores/as:**

**MARIA GABRIELA MANUEL ALVES – IFGW - UNICAMP**

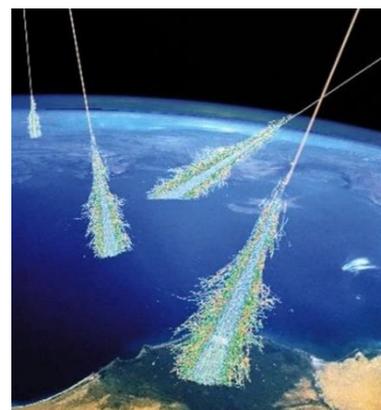
**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> CAROLA DOBRIGKEIT CHINELLATO (orientadora) – IFGW - UNICAMP**

## INTRODUÇÃO:

Raios cósmicos primários são partículas de alta energia – em maior parte, núcleos atômicos – que adentram a atmosfera terrestre em um fluxo contínuo, proveniente de outras regiões do universo. Foram descobertos em 1912, quando ficou claro que a radiação responsável pela ionização residual do ar atmosférico era de origem extraterrestre [1].

O posterior estudo dos raios cósmicos levou à descoberta de partículas subatômicas como o pósitron, o múon e o pión, impactando fortemente a física nuclear, antes povoada somente por prótons, elétrons, nêutrons e fótons. Esse estudo também foi importante na formulação de modelos para a formação do universo, da qual parte da radiação cósmica é resíduo [2].

Ao adentrarem a atmosfera, raios cósmicos primários interagem com núcleos no ar, produzindo novas partículas que, por sua vez, podem decair ou também interagir, sempre gerando mais partículas. Tais processos se repetem sucessivamente, convertendo a energia total do raio cósmico primário na massa e energia cinética de milhões de raios cósmicos secundários, que formam os chamados chuviros atmosféricos [3], ilustrados na Figura 1.



*Figura 1: Ilustração de raios cósmicos primários atingindo a Terra e gerando chuviros de partículas na atmosfera. Imagem retirada de [3].*

Sabe-se que os raios cósmicos com até  $10^{16}$  eV de energia podem dever sua aceleração a campos eletromagnéticos como os produzidos em explosões de supernovas [4]. Mas a origem dos raios cósmicos ultraenergéticos ainda é um mistério e pode estar ligada, por exemplo, a colisões de galáxias, buracos negros, quasares ou galáxias de rádio [3]. Assim, descobrir a fonte dessas partículas pode também ajudar a desvendar esses fenômenos extremos.

Graças a sua grande energia, raios cósmicos ultraenergéticos são defletidos de poucos graus por campos magnéticos em seu caminho à Terra, o que significa que sua direção de chegada

aponta aproximadamente para a sua origem [3]. Logo, a direção de chegada dos raios cósmicos ultraenergéticos à Terra se mostra um tópico particularmente interessante de estudo.

Na presente análise, lançaremos mão de especificações e dados do Observatório Pierre Auger, na Argentina, que recebe o nome do descobridor dos chuueiros atmosféricos. Nesse observatório, raios cósmicos secundários são detectados através da emissão de radiação ultravioleta que causam na atmosfera e de sua interação em tanques d'água, espalhados por duas vezes a área da cidade de São Paulo, a fim de aumentar a chance de encontrar partículas produzidas por raios cósmicos ultraenergéticos, cujo fluxo na atmosfera é baixo [4]. A partir dessas medidas, cientistas conseguem reconstruir os chuueiros atmosféricos até o raio cósmico primário, calculando sua direção de chegada e energia.

## METODOLOGIA:

Para estudar as direções de chegada de raios cósmicos ultraenergéticos à Terra, faremos simulações de Monte Carlo, em que são usados números randômicos para simular grandezas físicas ou sequências de estados determinadas por eventos aleatórios [5].

As simulações partem de funções densidade de probabilidade (f.d.p.), que descrevem como os valores das grandezas em questão são distribuídos. Como a ferramenta que usamos gera números randômicos  $u$  uniformemente distribuídos entre 0 e 1, para simular segundo uma f.d.p.  $f(x)$ , precisamos determinar o valor  $x^*$  que corresponde a um número randômico  $u^*$ .

A chave para fazer essa conversão é o Método da Inversão, que consiste em escolher  $x^*$  tal que a probabilidade de  $x$  estar entre  $x_0$ , o limite inferior do domínio de  $f(x)$ , e  $x^*$  é igual à probabilidade de um número randômico estar entre 0 e  $u^*$ . Ou seja, igualamos

$$\int_{x_0}^{x^*} f(x) dx = \int_0^{u^*} g(u) du = u^* , \quad (1)$$

onde usamos  $g(u) = 1$ , que é a f.d.p. uniforme para  $u \in [0,1]$ . Resolvida a integral em  $x$ , basta inverter a equação (1) para encontrar  $x^*$  em função de  $u^*$ .

Para simular as direções de chegada, vamos supor que elas são distribuídas isotropicamente, isto é, que um raio cósmico ultraenergético pode vir de qualquer direção do céu com igual probabilidade. Nesse caso, a f.d.p.  $f(A)$  que dá a probabilidade de um raio cósmico atingir uma área infinitesimal  $dA$  do topo da atmosfera é dada por

$$f(A)dA = \frac{dA}{4\pi R^2} ,$$

uma vez que  $4\pi R^2$  é a área superficial total do topo da atmosfera de raio  $R$ . Por ora, essa probabilidade não está associada a uma direção, mas podemos relacionar  $dA$  a um par de ângulos zenital  $\theta \in [0, \pi]$  e azimutal  $\varphi \in [0, 2\pi]$  da seguinte forma:

$$dA = R^2 \sin \theta d\theta d\varphi .$$

Esse par de ângulos determina uma direção em relação a um observador. No entanto, o observador e, portanto, seu zênite e azimute se movem com o planeta, enquanto os raios cósmicos,

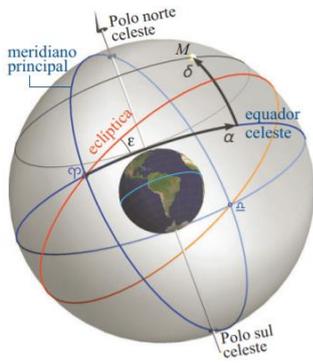


Figura 2: Sistema de coordenadas equatoriais. O objeto  $M$  está em nossa direção de interesse, com declinação  $\delta$  e ascensão reta  $\alpha$ . Imagem retirada de [6].

devemos levar em conta que o observatório não está igualmente exposto a todas as direções do céu. Também precisamos lembrar que a chance de um raio cósmico ser detectado depende do ângulo  $\eta$  entre a trajetória do raio e a normal à superfície do observatório. Se esta tem área  $a$ , dizemos que o raio cósmico a “enxerga” com área  $a \cos \eta$ , para evidenciar que a probabilidade de o raio cósmico atingir o observatório é proporcional a  $\frac{a \cos \eta}{a} = \cos \eta$ , o que é fácil de visualizar na Figura 3.

A fim de incorporar esses aspectos à simulação, multiplicamos  $h(\delta)$ , a f.d.p. segundo a qual o ângulo  $\delta$  se distribui no caso isotrópico, pela exposição direcional relativa  $\omega_r(\delta)$  do observatório (que pode ser consultada em [7]). Essa exposição é função apenas de  $\delta$  porque, como pode ser depreendido da Figura 2, ao longo da rotação terrestre, o observatório é exposto a todas as ascensões retas, já que  $\alpha$  é o ângulo sobre o plano equatorial, no qual o planeta rotaciona, mas a Terra – e, conseqüentemente, o observatório – não se move na direção da declinação  $\delta$ .

Entretanto, não é trivial inverter a equação (1) para a f.d.p. que resulta do produto entre  $h(\delta)$  e  $\omega_r(\delta)$ . Então, em vez disso, aplicamos o Método da Rejeição. Neste caso, ele consiste em, para cada valor  $\delta^*$  de declinação simulado com o Método da Inversão, sortear um novo número randômico  $v^*$  e

$$\begin{cases} \text{se } v^* < \omega_r(\delta^*), \text{ aceitar } \delta^*; \\ \text{caso contrário, rejeitar } \delta^*. \end{cases}$$

Dessa forma, uma vez que  $0 < \omega_r(\delta^*) < 1$ , assim como  $v^*$ ,  $\omega_r(\delta^*)$  dá a probabilidade de um ângulo  $\delta^*$  simulado ser aceito.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Na figura 4, temos os histogramas de valores de  $\alpha$  e  $\delta$  simulados com o Método da Inversão, mediante a geração de 10000 pares de números randômicos. O histograma de  $\alpha$  mostra que os

em seu caminho para a Terra, não. Por isso, se faz necessário usar as coordenadas equatoriais declinação  $\delta$  e ascensão reta  $\alpha$ , representadas na Figura 2, que determinam univocamente uma direção no céu, pois usam como referência o plano equatorial da Terra e a eclíptica, o plano sobre o qual a Terra translada ao redor do Sol.

Neste trabalho, escolhemos convenientemente os eixos de coordenadas de forma a ser fácil obter as funções densidade de probabilidade de  $\delta$  e  $\alpha$  a partir das de  $\theta$  e  $\varphi$  e, em seguida, simular valores de declinação e ascensão reta usando o Método da Inversão.

Também estamos interessados em simular as direções dos raios cósmicos que atingem um observatório. Para tanto,

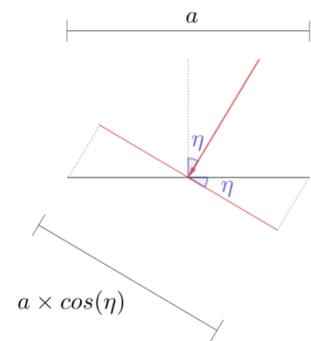


Figura 3: Representação da área “vista” (linha vermelha) por um raio cósmico (seta vermelha) que atinge a superfície do observatório (linha preta) fazendo um ângulo  $\eta$  com a normal.

valores simulados estão uniformemente distribuídos entre 0 e  $2\pi$ , enquanto, no histograma de  $\delta$ , há mais ocorrências próximo de  $\delta = 0$ , ou seja, no plano equatorial celeste. Se pensamos no céu como uma esfera em torno da Terra, essa constatação não é surpresa, pois a área sobre a esfera é maior na região do equador do que próximo aos polos.

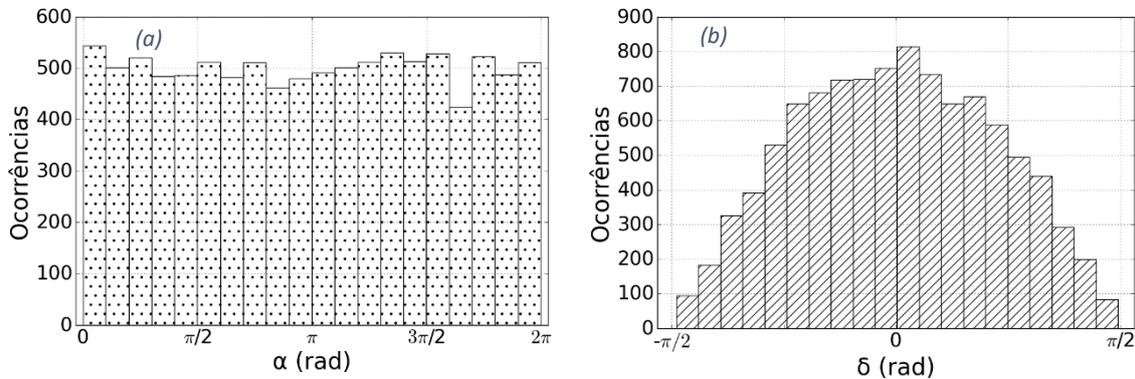


Figura 4: Histogramas de 10000 valores simulados de ascensão reta  $\alpha$  e declinação  $\delta$ .

Com o Método da Rejeição descrito na Metodologia, filtramos as declinações  $\delta$  simuladas de acordo com a exposição direcional do Observatório Pierre Auger, obtendo o histograma da Figura 5, que também traz um gráfico da exposição direcional relativa  $\omega_r(\delta)$  desse observatório.

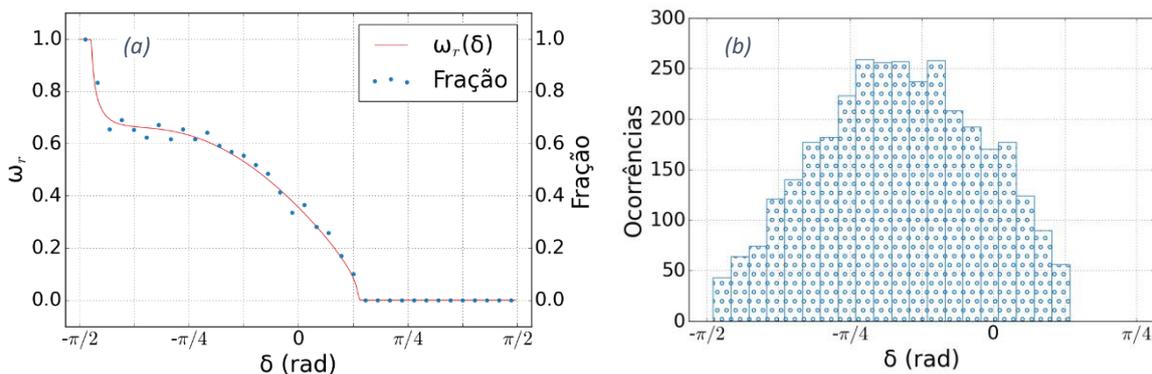


Figura 5: (a) Gráfico da exposição relativa do Observatório Pierre Auger  $\omega_r(\delta)$  em função de  $\delta$  e gráfico da fração de valores aceitos no Método da Rejeição em cada intervalo de  $\delta$  (os pontos estão no centro do intervalo que representam). (b) Histograma dos 3308 valores de  $\delta$  aceitos no Método da Rejeição.

A fim de melhor comparar os histogramas das figuras 4(b) e 5(b), calculamos a fração de valores de  $\delta$  aceitos em cada intervalo de  $5^\circ$  de  $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ , que está graficada na Figura 5(a). Comparando os dois gráficos dessa figura, confirmamos a afirmação, feita na Metodologia, de que a função  $\omega_r(\delta)$  dá a probabilidade de um valor sorteado ser aceito no Método da Rejeição.

Agora, a Figura 6 traz um gráfico da projeção Aitoff de todas as direções sorteadas e outro apenas das direções aceitas. Como cada par de ângulos  $\alpha$  e  $\delta$  determina uma direção, embora não tenhamos aplicado o Método da Rejeição às ascensões retas, os  $\alpha$  associados a  $\delta$  rejeitados também foram desconsiderados. Para  $\delta$  próximos de  $-90^\circ$ , os gráficos são muito semelhantes e, conforme  $\delta$  cresce, cada vez mais direções presentes no primeiro gráfico faltam no segundo, até que, a partir de cerca de  $\delta = 20^\circ$ , todas as direções são rejeitadas. Esse comportamento reforça o que já havíamos concluído a partir da Figura 5(a), pois  $\omega_r(\delta)$  se aproxima de 1 para  $\delta$  próximo de  $-90^\circ$  e zera em  $24,75^\circ$ , que é a soma da latitude  $-35,25^\circ$  em que se encontra o Observatório Pierre

Auger com  $\eta_m = 60^\circ$ , que é o ângulo zenital máximo para o qual os chuveiros atmosféricos são reconstruídos segundo determinado procedimento pelos cientistas da Colaboração Pierre Auger.

Por fim, trazemos o gráfico da Figura 7 a título de comparação. Note que a distribuição das direções na Figura 6(b) é muito semelhante à da Figura 7, que mostra a projeção Aitoff do mesmo número de direções medidas no Observatório Pierre Auger em um dia.

## CONCLUSÕES:

A semelhança entre as projeções Aitoff de direções simuladas e medidas permitiu constatar a conformidade entre as simulações de Monte Carlo e a Física na qual as baseamos. Assim, aumenta nossa confiança nessas simulações como uma ferramenta útil de estudo.

Destacamos também o tamanho desafio de detectar raios cósmicos em nossa limitada localização na superfície da Terra, evidenciado pelos aspectos que nos levaram a incluir a exposição direcional do observatório na simulação.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] M. C. Bustamante, “A descoberta dos raios cósmicos ou o problema da ionização do ar atmosférico”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 35, n. 2, 2013.
- [2] G. Choppin, J. O. Liljenzin, J. Rydberg e C. Ekberg, “Chapter 10 - Cosmic Radiation and Elementary Particles”, em *Radiochemistry and Nuclear Chemistry*, Butterworth-Heinemann, 3ª ed., 2002.
- [3] Página do Observatório Pierre Auger na internet, “Cosmic Ray Mystery”. Disponível em: <https://www.auger.org/outreach/cosmic-rays/cosmic-ray-mystery>.
- [4] Página do Observatório Pierre Auger na internet, “The Pierre Auger Observatory”. Disponível em: <https://www.auger.org/observatory/observatory>.
- [5] M. H. Kalos e P. A. Withlock, *Monte Carlo Methods*. WILEY-VCH, 2008.
- [6] G. B. Lima Neto, “Astronomia de posição”. Disponível em: <http://www.astro.iag.usp.br/~gastao/AstroPosicao/Curso2021.pdf>.
- [7] P. Sommers, “Cosmic ray anisotropy analysis with a full-sky observatory”, *Astroparticle Physics*, vol. 14, n. 4, p. 271-286, 2001.

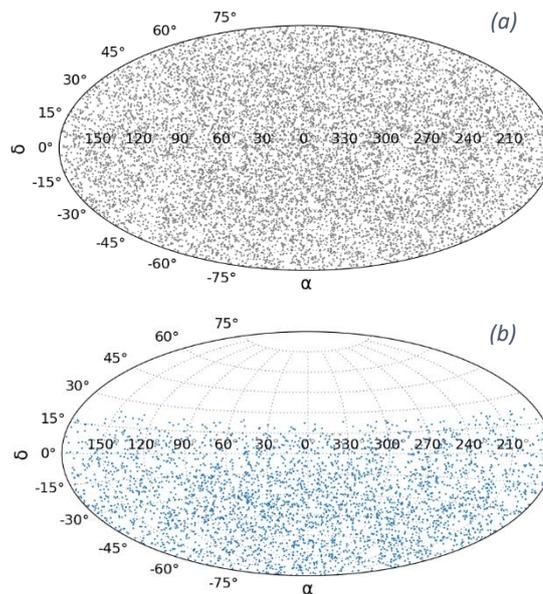


Figura 6: Gráfico da projeção Aitoff das direções simuladas. (a) Todas as direções (10000). (b) Direções aceitas no Método da Rejeição (3308).

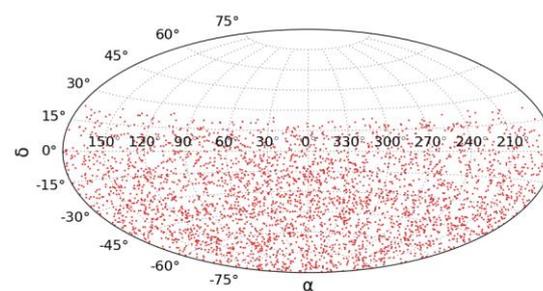


Figura 7: Gráfico da projeção Aitoff das direções de 3308 raios cósmicos primários com ângulo zenital  $\eta \leq 60^\circ$ , cujos chuveiros foram detectados no Observatório Pierre Auger no dia 31 de agosto de 2018. Dados retirados da base de dados Herald do observatório.