

APLICAÇÃO DE SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO NO ESTUDO DE RAIOS CÓSMICOS ULTRAENERGÉTICOS

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

Autores/as:

JUAN FELIPE SERIGHELLI [UNICAMP]

Prof.^a Dr.^a CAROLA DOBRIGKEIT CHINELLATO (orientadora) [UNICAMP]

INTRODUÇÃO:

Segundo Bustamante (2013), a radiação cósmica, i.e., todo tipo de radiação originária do cosmos, incluso os raios ultraenergéticos, é um fluxo de partículas de alta energia que chega até nosso planeta. Essas partículas são originadas em eventos cataclísmicos como, por exemplo, na explosão de uma supernova e estrelas de nêutrons. Elas atingem continuamente a Terra depois de sofrer diversas acelerações em campos eletromagnéticos durante seu percurso.

Ao atingirem a Terra, essas partículas ultraenergéticas, tais como prótons e núcleos de átomos, interagem com os átomos do topo da atmosfera terrestre, principalmente com oxigênio e nitrogênio, ocorrendo diversas interações que produzem outras partículas até atingir, definitivamente, o solo. Esse fenômeno é chamado de chuva de raios cósmicos (CIRKEL-BARTELT, 2008). Mas ocorrem pouquíssimos desses eventos com partículas de altas energias, acima de 10^{15} eV, e raríssimos para partículas de ultra alta energia, acima de 10^{20} eV. Segundo Castro (2012), a frequência

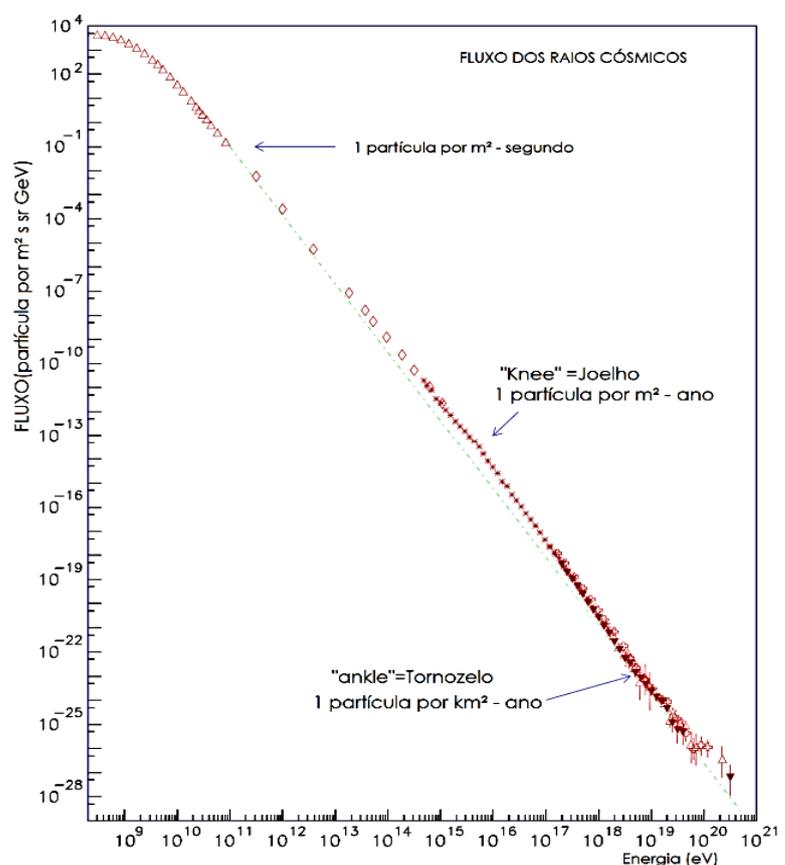


Figura 1: Fluxo de Raios Cósmicos – fonte: (KEMMERICH, 2010).

de chegada dessas partículas é cerca de uma por km² por ano para energias maiores que 10¹⁸ eV (figura 1). Assim, para estudar a chegada dessas partículas e a formação de um chuveiro cósmico, é feita a simulação por computação.

OBJETIVOS:

O objetivo deste projeto de pesquisa, sabendo que a frequência de chegada de partículas ultraenergéticas à Terra é bastante escassa, foi realizar a simulação destas partículas utilizando o método de Monte Carlo, baseado na geração de números aleatórios e suas probabilidades de ocorrerem.

Especificamente, foi necessário entender o funcionamento deste método e como fazê-lo gerar números pseudorrandômicos uniformemente distribuídos, que são aproximadamente independentes, i.e., sem haver um padrão entre eles. Com isso em mãos e desenvolvendo os códigos na linguagem de computação Python, foi possível dar os passos seguintes que são: fazer e analisar a distribuição estatística de números pseudorrandômicos; a distribuição de ângulos de ascensões retas e declinações, método estatístico da aceitação e rejeição, obtenção da exposição do Observatório Pierre Auger e, finalmente, a comparação com dados obtidos pelo Observatório Pierre Auger.

METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Primeiramente, foi utilizado o gerador de números aleatórios Mersenne Twister, já implementado na linguagem de programação Python. Para atingir o primeiro objetivo, de simular a probabilidade de chegada de uma partícula na atmosfera terrestre, na direção de longitude e latitude, sorteamos as ascensões retas (α) e as declinações (δ) isotrópicas, as quais são as coordenadas angulares de localização do sistema equatorial celeste que utiliza como plano fundamental o equador celeste.

A função de probabilidade para isso é $f(\Omega)d\Omega = \sin(\theta)d\theta d\varphi/4\pi$, que podemos separar em duas outras, $\Theta(\theta)$ e $\phi(\varphi)$. Com mil números pseudorrandômicos u e mil v , realizando a normalização da função $\Theta(\theta)d\theta = A\sin(\theta)d\theta$, que fica $\Theta(\theta)d\theta = \sin(\theta)d\theta/2$, e obtendo a transformação de u para θ' , que é $\theta' = \arccos(1 - 2u')$, no intervalo em radianos de $-\pi/2$ a $\pi/2$, obtemos o histograma das declinações (δ) mostrado na figura 2.

Agora, foi feita a normalização de $\phi(\varphi)d\varphi = B d\varphi$, que ficou $\phi(\varphi)d\varphi = d\varphi/2\pi$, e realizando a transformação de v para φ' , que fica $\varphi' = 2\pi v'$ no intervalo de 0 a 2π , encontramos a distribuição das ascensões retas (α) como mostrado na figura 3.

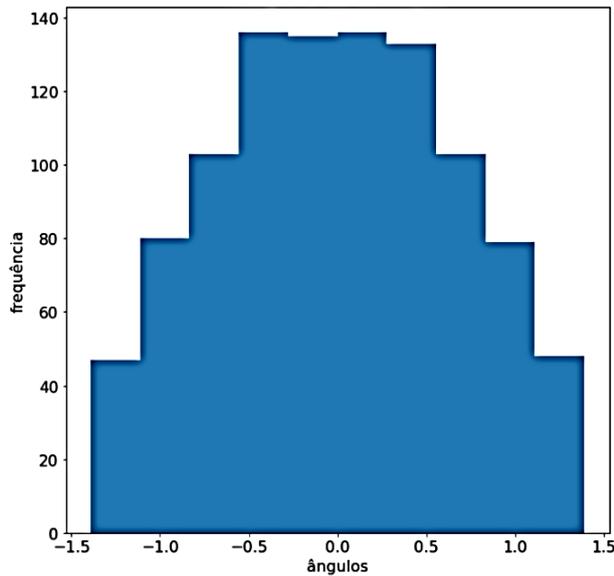


Figura 2: Histograma das declinações isotrópicas (δ).

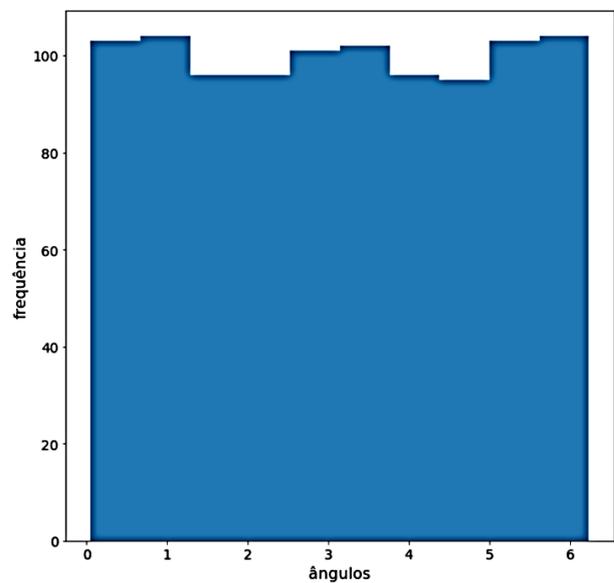


Figura 3: Histograma das ascensões retas isotrópicas (α).

Depois, foi encontrada a exposição do Observatório Pierre Auger, (ω). A exposição é uma função da esfera celeste que fornece a área efetiva de coleta de partículas do observatório no tempo (SOMMERS, 2001). É medida em $\text{km}^2 \cdot \text{ano}$ e pode ser escrita matematicamente como

$$\omega(\delta) \propto \cos(I_{obs})\cos(\delta)\alpha_m + \alpha_m\sin(I_{obs})\sin(\delta)$$

onde

$$\alpha_m = \begin{cases} 0 & \text{se } \xi > 1, \\ \pi & \text{se } \xi < -1, \\ \arccos(\xi) & \text{caso contrário,} \end{cases}$$

e

$$\xi = \frac{\cos \theta_m - \sin I_{obs} \sin \delta}{\cos I_{obs} \cos \delta}$$

sendo I_{obs} a latitude geográfica onde se encontra o observatório (35° ao sul) e θ_m é o ângulo zenital local máximo utilizado na leitura dos dados analisados (60° , neste caso). Inserindo valores de δ entre -90° a $+25^\circ$, obtemos o gráfico da exposição normalizada do Observatório Pierre Auger (figura 4).

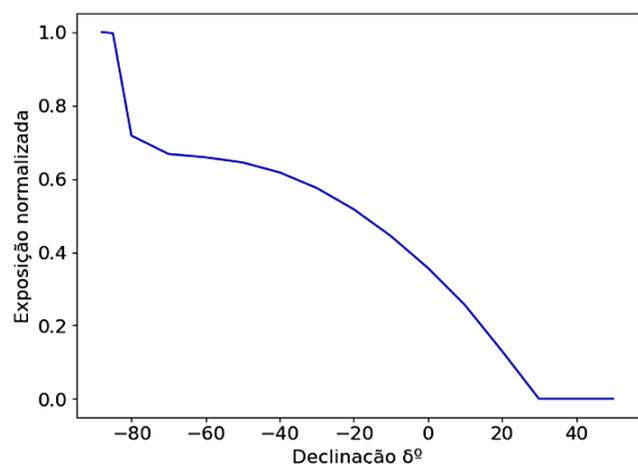


Figura 4: Exposição normalizada do observatório Pierre Auger.

Por fim, utilizamos os dados coletados pelo observatório que os disponibiliza para análise. Como o arquivo disponibilizado^[1] é uma sequência de valores separados por vírgula, primeiramente foi realizada a automação para a leitura desse arquivo com a finalidade de obter os eventos com energia maior que 8×10^{18} eV, e com ângulo zenital $< 60^\circ$, para construir uma tabela com a energia (Ecor), ângulo zenital (Theta), ascensão reta (Ra) e declinação (Dec).

Depois, foi encontrada a função correlação de dois pontos, fazendo, a título de exemplo a correlação de dez direções duas-a-duas. Assim, foi obtido o histograma que representa a função correlação de dois pontos desses dados do observatório (figura 5).

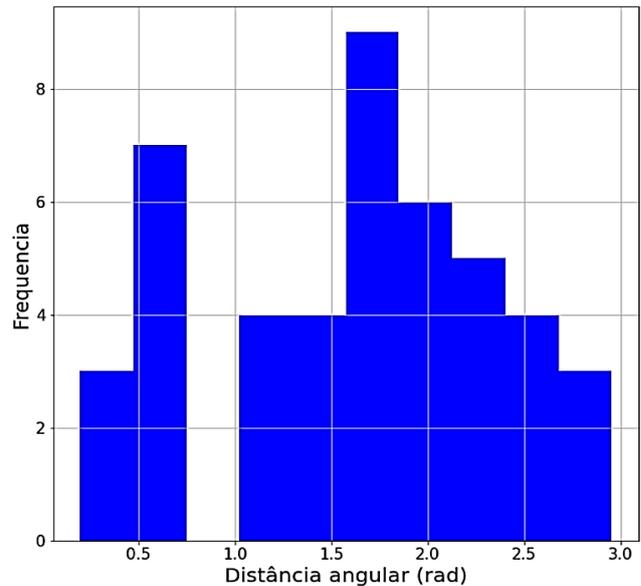


Figura 5: Histograma da correlação entre os ângulos dois-a-duos para 10 eventos do observatório.

CONCLUSÕES:

Finalizando, conclui-se que é possível simular direções de chegada, no globo terrestre, de raios cósmicos, implementado com êxito no sorteio de direções de chegada de partículas à Terra. Também foi obtido com sucesso o gráfico da exposição do Observatório Pierre Auger localizado na Argentina. Por fim, foram acessados, lidos e selecionados os dados de interesse do observatório, sendo possível, assim, construir a correlação entre os raios cósmicos medidos nos detectores instalados na área em que o observatório se encontra. A título de exemplo, foi apresentado o cálculo da correlação entre as direções de dez raios cósmicos medidos no Observatório Pierre Auger.

BIBLIOGRAFIA

[1] OBSERVATORY, Pierre Auger. **Pierre Auger Observatory**. Disponível em: <http://ipnwww.in2p3.fr/~augers/AugerProtected/herald.php>. Acesso em: 13 abr. 2022.

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.

Cirkel-Bartelt, V. History of Astroparticle Physics and its Components. **Living Rev. Relativ.** 11, 2 (2008). <https://doi.org/10.12942/lrr-2008-2>

CASTRO, Mary Lucía Díaz. **Flutuações Intrínsecas de Chuveiros Atmosféricos Extensos e Composição Química de Raios Cósmicos Ultra-energéticos**. 2012. 102 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Física, Física da Puc-Rio, Puc-Rio, Rio de Janeiro, 2012

KEMMERICH, Níkolás. **ANÁLISE DA VARIABILIDADE DE RAIOS CÓSMICOS GALÁCTICOS DEVIDO A ESTRUTURAS SOLARES NO MEIO INTERPLANETÁRIO**. 2010. 46 f. Monografia (Especialização) - Curso de Física – Bacharelado do Centro de Ciências Naturais e Exatas, Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - Crs/Ccr/Inpe – McT, Ufsm, Santa Maria, 2010.

BANDEIRA, Yan Bueno; MACKEDANZ, Luiz Fernando. Mecanismos de limitação da energia de raios cósmicos durante sua propagação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 41, n. 4, p. 0-0, 27 maio 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2019-0118>.

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).