

ESTUDO DE DIREÇÕES DE RAIOS CÓSMICOS COM O OBSERVATÓRIO PIERRE AUGER

Palavras-Chave: RAIOS CÓSMICOS, MÉTODO DE MONTE CARLO, OBSERVATÓRIO PIERRE AUGER

Autoras:

Jaqueline Germano De Farias Oliveira - IFGW

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

INTRODUÇÃO:

Neste projeto aprendemos a executar simulações da direção de incidência de raios cósmicos de alta energia chegando à superfície da Terra, através do método de Monte Carlo.

Os raios cósmicos são partículas penetrantes de alta energia, da ordem de 10^9 eV (elétron-volts), em sua maior parte prótons, vindo de todas as direções do espaço. Neste projeto, nos interessamos em estudar os que possuem mais alta energia, acima de 10^{18} eV. Quando penetram nas camadas mais exteriores da atmosfera, os raios cósmicos acabam colidindo com outras partículas, gerando um “chuveiro atmosférico extenso” (figura 1). Conforme o padrão de ocorrência dos raios cósmicos coletados no Observatório Pierre Auger, é possível aplicá-los ao Método de Monte Carlo para executar simulações e testar hipóteses relacionadas a eles. Precisamos então, calcular a probabilidade dessas incidências.

Durante o estudo do método de Monte Carlo, aprendemos o conceito de número randômico e pseudorrandômico, necessário para executar as simulações. Posteriormente, simulamos através da programação em Python, gerações de números aleatórios uniformemente distribuídos.

Foram trabalhadas simulações de números aleatórios a partir de diferentes funções densidade de probabilidade. Simulamos valores de energia segundo o espectro observado dos raios cósmicos, valores de direções de raios cósmicos no céu, e aprendemos sobre os métodos de inversão, composição e rejeição. Também calculamos a exposição direcional para um observatório na Terra em função da sua localização. Concomitantemente, a linguagem de programação Python veio sendo estudada e utilizada na execução destas simulações, considerada a ferramenta mais adequada para estas análises de dados.

METODOLOGIA:

1 Método de Monte Carlo

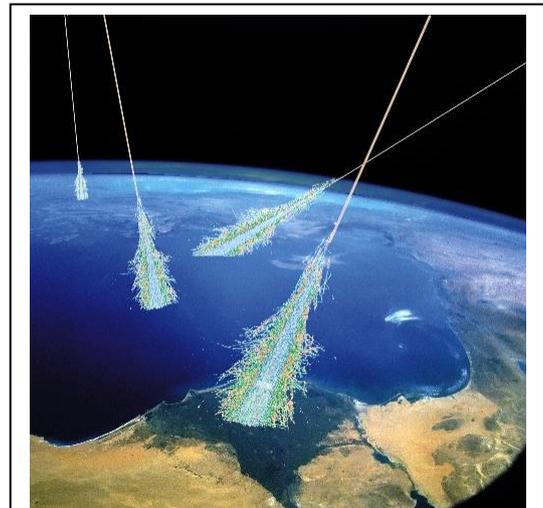


Figura 1: Chuveiro atmosférico formado pelos raios cósmicos. Fonte: https://apod.nasa.gov/apod/image/0608/crshower2_nasa_big.jpg

O Método de Monte Carlo é um método estatístico baseado em amostras massivas de valores aleatórios, ou seja, não determinísticos. Aplicado aos conceitos de raios cósmicos, e com os dados de ocorrência obtidos pelo Observatório Pierre Auger (Malargüe, Argentina), podemos fazer estas simulações utilizando ferramentas computacionais, como a linguagem Python. Para cada tipo de função de distribuição de probabilidade temos algoritmos diferentes, para que os dados simulados sejam coerentes com a realidade.

Ao iniciar as simulações neste projeto, foi preciso compreender o conceito de variável randômica, e pseudorrandômica. A variável randômica é um valor resultante de um evento aleatório. Já a variável pseudorrandômica é um valor aleatório obtido por uma simulação, e não por um evento real. Assim, foram executadas simulações de valores pseudoaleatórios por meio de algumas técnicas: inversão, composição e rejeição, e exposição direcional. Dentre eles, o método da inversão foi utilizado diversas vezes, mostrando-se fundamental.

2 Método da Inversão

Utilizamos o método da inversão, sempre que a função densidade de probabilidade (*f.d.p*) é munida de um “x” que podemos inverter ou “isolar”, após normalizar e calcular sua integral. Verificamos as ocorrências e seu comportamento através de um histograma. Assim é possível obter a distribuição para a função desejada. O “espectro de energia de raios cósmicos” e o “sorteio de direções isotrópicas no céu” foram os trabalhos iniciais em que o método da inversão foi utilizado.

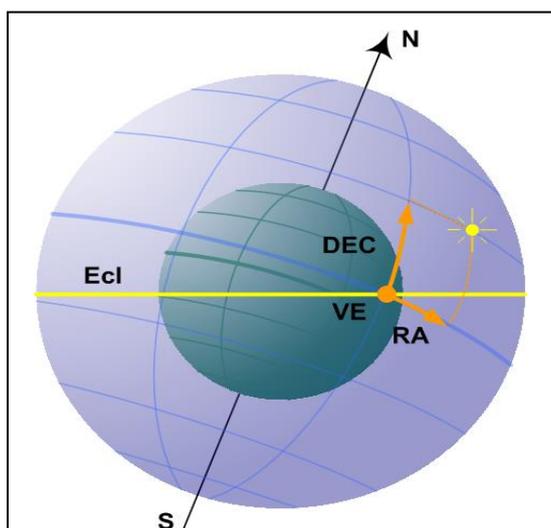


Figura 2:Coordenadas Equatoriais, onde “RA” é a ascensão reta e “DEC” o ângulo de declinação.

Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EquatorialDecRA.png>

Para executar o sorteio de direções isotrópicas no céu, utilizamos o sistema equatorial de coordenadas (figura 2), o qual tem como referência a esfera celeste e o plano do equador terrestre.

Sabendo que entre o plano do equador e o plano da eclíptica (plano em que a Terra orbita o Sol) existe um ponto de intersecção, o ponto vernal (γ), definimos os dois ângulos necessários para executar este sorteio, o ângulo de ascensão reta (α) horizontalmente ao ponto vernal e que varia entre 0 e 360°, e o ângulo de declinação (δ) perpendicular ao plano equatorial e que varia entre -90° e + 90°.

Foram sorteadas 10^6 direções isotrópicas para ascensão reta e declinação e elaborados alguns histogramas, onde foi possível verificar o comportamento das distribuições de probabilidade em diferentes pontos do planeta.

3 Composição, Rejeição e Exposição Direcional

De acordo com a função densidade de probabilidade analisada, pode ser mais viável fazer uso de outras técnicas mais eficientes diante da complexidade do que se pretende simular.

Quando temos uma função composta pela soma de funções, o método da composição é o melhor indicado, pois se pode estudar cada termo da função de forma separada, tornando-a mais simples para utilizar o método da inversão. A função abaixo foi utilizada para executar o método da composição

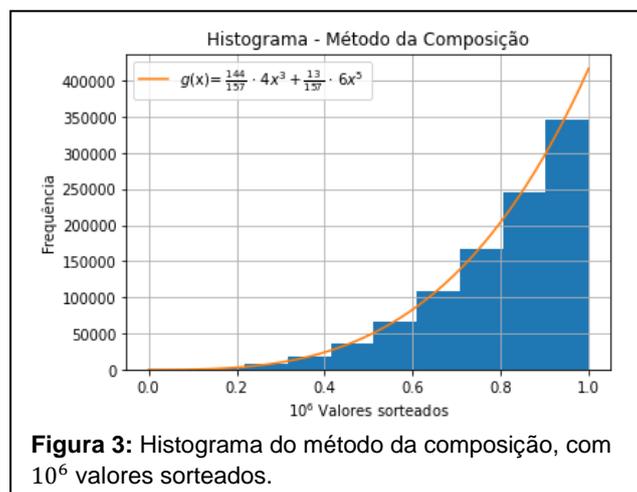


Figura 3: Histograma do método da composição, com 10^6 valores sorteados.

(figura 3):

$$g(x) = 12x^3 + \frac{13}{8}x^5, \quad x \in [0,1] \quad (1)$$

O método de rejeição é uma técnica similar, porém o utilizamos quando a função densidade de probabilidade é munida de uma multiplicação. Com isso foi preciso criar um algoritmo que aceitasse ou que rejeitasse os pontos sorteados. Os pontos aceitos são os que descrevem corretamente a curva de densidade de probabilidade. Este método foi executado na seguinte função:

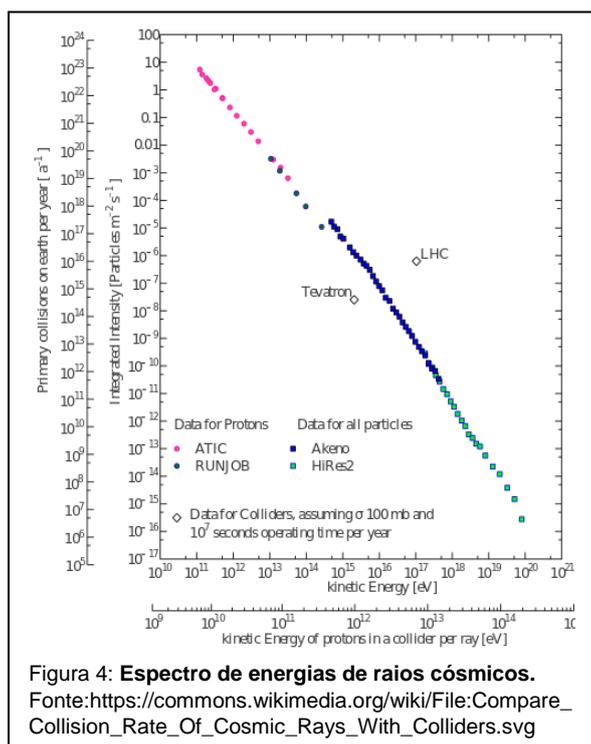
$$f(x) = A \cdot e^x \cdot (1 - x^2), \quad x \in [0,1] \quad (2)$$

Estes métodos são necessários para as simulações por conta da decomposição vetorial das coordenadas de um raio cósmico, que pode chegar à Terra de qualquer direção do espaço, e esta direção precisa ser calculada.

O método da exposição direcional, tem similaridade com as direções isotrópicas sorteadas pelo método da inversão, que simulavam a chegada dos raios cósmicos em todos os pontos do planeta perpendicularmente à superfície. Neste caso, simulamos as chegadas apenas na localização do Observatório Pierre Auger, usando sua latitude geográfica ($-35,25^\circ$). Como a detecção é feita em um ponto específico da Terra, as partículas não mais chegarão de forma perpendicular, mas fazendo vários ângulos com a superfície dependendo de $\cos(\theta)$, onde θ é o ângulo com a direção do zênite local. O restante dos ângulos rejeitamos por não serem possíveis de serem captados pelo detector de chuueiros atmosféricos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Conforme o gráfico do espectro de energias com dados reais (figura 4), quanto maior a quantidade de energia de um raio cósmico (medida em elétron-volt), menos frequentes eles se tornam. Em contrapartida, os raios com energias baixas ocorrem com frequência maior. Com o gráfico de pontos e o histograma obtido, conseguimos verificar este efeito. Além disso, quanto mais pontos sorteamos, melhor definida fica a curva de probabilidade, fornecendo boa visualização e interpretação dos dados.



Foram feitas várias tentativas de simulações para todas as técnicas citadas. Assim, foi possível constatar que o método de Monte Carlo é bastante eficaz, podendo também ser usado em diversas áreas de estudo, caso seja necessário fazer uma simulação probabilística com muitos eventos. Em nossas simulações, o método apresentou-se bastante eficiente, com resultados próximos aos dados reais, em especial no caso das simulações do espectro de energia (figura 5 e 6) e do sorteio de direções isotrópicas (figura 7 e 8).

O mesmo ocorreu com o sorteio de direções isotrópicas. Fizemos histogramas da ocorrência dos raios cósmicos nas suas coordenadas equatoriais, ascensão reta e declinação. Assim constatamos os ângulos possuem maior incidência na região do Equador, a “cintura da Terra”, e aparecem com menor frequência nos polos terrestres. Esta observação é uma decorrência de haver uma área muito maior para a região do equador celeste (declinação zero) do que na região dos pólos celestes (declinação $+90^\circ$ ou -90°).

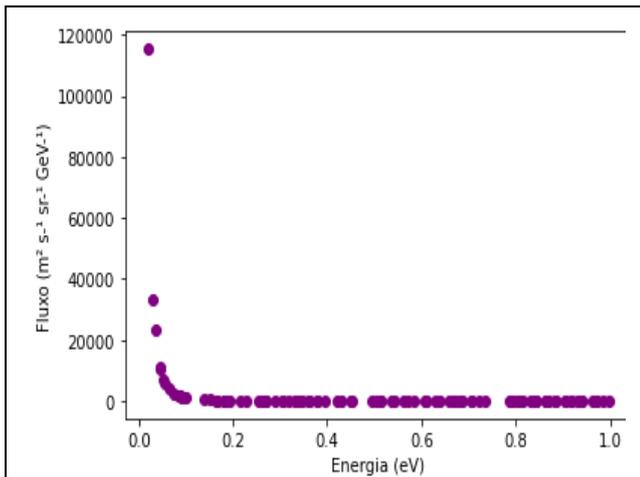


Figura 5: Gráfico de Fluxo x Energia, com amostragem de 10^2 energias.

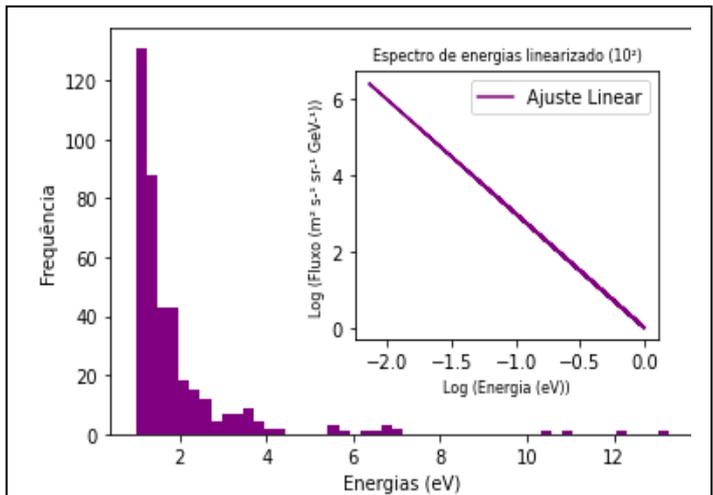


Figura 6: Histograma Frequência x Energia, e Ajuste Linear: coeficiente angular = $-2,99$ e linear = $1,11$, amostragem de 10^2 .

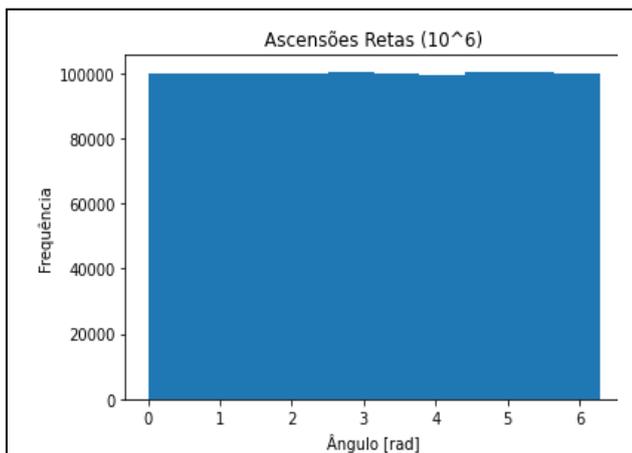


Figura 7: Distribuição das Ascensões Retas, com amostragem de 10^6 valores.

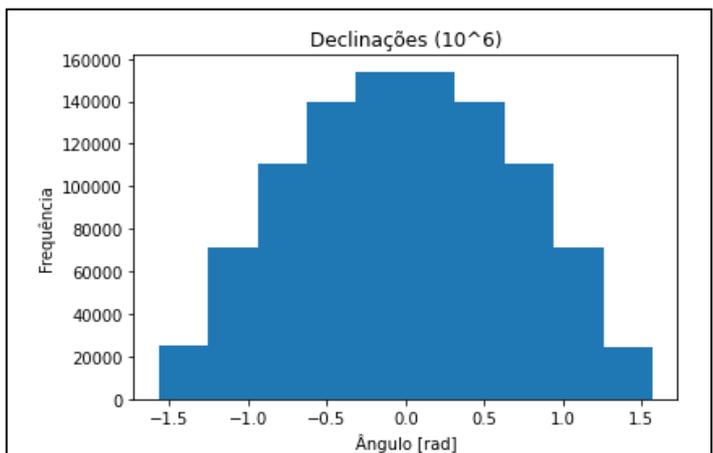


Figura 8: Distribuição das Declinações, com amostragem de 10^6 valores.

CONCLUSÕES:

Aprendemos neste projeto a simular valores de grandezas relacionadas a certas propriedades dos raios cósmicos, de maneira semelhante ao que ocorre na natureza, modelando um algoritmo com uma ferramenta computacional de alto nível, a linguagem Python. Através das simulações em escalas menores como as que fizemos, o método de Monte Carlo mostrou-se muito eficaz, nos fornecendo boa interpretação dos dados. Com capacidades computacionais maiores, é possível fazer simulações de eventos aleatórios com alta precisão, propiciando melhor compreensão sobre os raios cósmicos e seu comportamento, como é feito no Observatório Pierre Auger. Na atualidade, dispomos do benefício das ferramentas computacionais possibilitando o estudo de fenômenos complexos como este. Esta é uma grande vantagem para a física de altas energias, já que os raios cósmicos de alta energia chegam com baixa frequência.

Estudamos alguns conceitos sobre os raios cósmicos e aprofundamos os conhecimentos sobre o sistema equatorial de coordenadas, para então simular as direções dos raios cósmicos e fazer sua decomposição vetorial na chegada à superfície da Terra. Assim concluímos este trabalho com noções gerais sobre os raios cósmicos, método de probabilidade não determinístico, e comportamento e distribuição angular dessas partículas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kalos, Malvin H.; Whitlock, Paula A. **Monte Carlo Methods**. First Edition. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1986. 186 p. ISBN 978-0471898399.
- [2] Newman, Mark. **Computational Physics**. First Edition. ed. rev. University of Michigan. CreateSpace, 2013. 561 p. ISBN 978-148014551-1.
- [3] Pierre Auger Observatory. **The Mystery of High-Energy Cosmic Rays**. [2022]. Disponível em: <https://www.auger.org/outreach/cosmic-rays/cosmic-ray-mystery>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [4] Santiago, Basilio. **Coordenadas equatoriais**. [2021]. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/oei/santiago/fis2005/textos/equatcrds.htm>. Acesso em: 27 set. 2021.
- [5] Saraiva, Maria de Fátima O. **Coordenadas astronômicas**. Rio Grande do Sul, 2016. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~fatima/fis2016/aulas/aula-coord.htm>. Acesso em: 27 set. 2021.
- [6] Paleari, Lucia Maria. **Sistema equatorial de coordenadas: Palestras: Prof. Dr. Roberto Boczko**. Bauru - SP: 20 dez. 2016. Disponível em: <https://youtu.be/kM-vkHEOckU>. Acesso em: 27 set. 2021.