

Uma análise sobre diferentes parametrizações da atmosfera em simulações de chuveiros atmosféricos extensos de raios cósmicos

Stefano Castro TOGNINI; Ricardo Avelino GOMES

Instituto de Física – Universidade Federal de Goiás

stognini@posgrad.ufg.br; ragomes@if.ufg.br

Introdução

Um chuveiro atmosférico extenso ou EAS¹ é um fenômeno físico que ocorre quando um raio cósmico – núcleos de H até Fe – choca-se com a alta atmosfera e produz um conjunto de partículas que podem decair ou interagir com outros elementos da atmosfera. Essa sequência de eventos pode ser separada em três componentes: a hadrônica, a muônica e a eletromagnética. Diferentes tipos de experimentos foram desenvolvidos para estudar as características dos EAS: com balões, com satélites, detectores de superfície e subterrâneos [1]. Tais resultados formaram a base para todo o desenvolvimento teórico que se tem atualmente sobre esse tipo de fenômeno e, conseqüentemente, simulações computacionais podem ser implementadas para estudar tanto o processo físico quanto testar a confiabilidade dos modelos teóricos desenvolvidos. Um exemplo disso é o CORSIKA² [2], um algoritmo de código aberto que utiliza o Método Monte Carlo aliado a um conjunto de modelos físicos de interação hadrônica e de decaimento com o propósito de simular EAS. Uma representação visual de um chuveiro simulado é apresentada na Figura 1 (a).

Neste trabalho o CORSIKA será utilizado para simular o fluxo de múons de raios cósmicos que passam pelo Far Detector do experimento MINOS – Main Injector Neutrino Oscillation Search –, um experimento realizado pelo Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) que tem como principal objetivo medir com precisão os parâmetros associados à oscilação de neutrinos. Os detectores do experimento são otimizados para a detecção de múons, fazendo com que o experimento não se limite apenas ao estudo da oscilação dos neutrinos e possa ser utilizado para diferentes

¹ Sigla para *Extensive Air Shower*.

² Acrônimo para *Cosmic Ray Simulation for KASCADE – Karlsruhe Shower Core Array Detector*, um experimento dedicado a estudar a composição de partículas primárias de raios cósmicos e interações hadrônicas de altas energias.

análises, como o déficit de raios cósmicos causados pela Lua e pelo Sol, efeitos de temperatura na alta atmosfera e violação de simetria CPT no setor leptônico [3].

O experimento consiste em dois detectores subterrâneos separados por uma distância de 734 km, chamados de Near Detector e Far Detector – a 100 m e 710 m de profundidade, respectivamente –, responsáveis por medir o fluxo inicial e final de neutrinos muônicos produzidos pela linha de feixe NuMI (Neutrinos at the Main Injector). O primeiro se encontra no próprio Fermilab, enquanto o segundo está localizado na mina de Soudan, em Minnesota. A linha percorrida pelo feixe de neutrinos é apresentada na figura 1 (b).

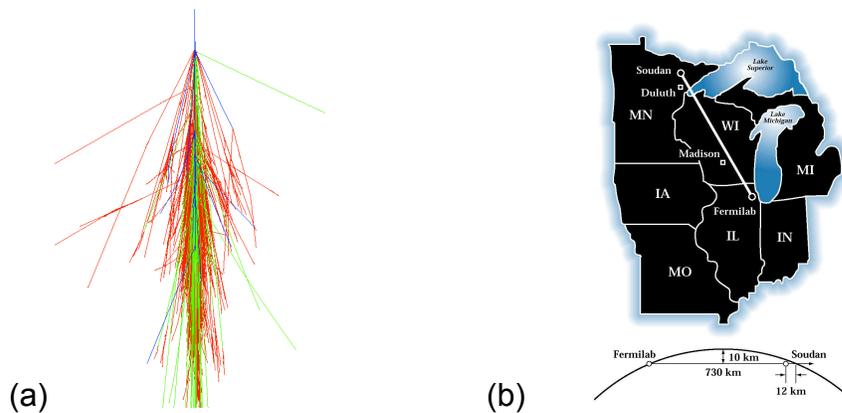


Figura 1: (a) Representação do caminho percorrido pelo feixe de neutrinos, desde sua produção até o Far Detector. (b) Representação ilustrativa de um EAS simulado pelo CORSIKA, com as componentes hadrônica (azul), muônica (verde) e eletromagnética (vermelho)

Apesar da Terra atenuá-los, os múons de raios cósmicos são detectados por ambos os detectores. Eles são considerados ruído para as medidas de física de neutrinos da linha NuMI.

Melhorias nas simulações de EAS implicam em melhores previsões sobre o fluxo de múons nos detectores. Claramente, a modelagem da atmosfera desempenha um papel crucial na simulação, visto que a produção dos múons começa com as interações hadrônicas entre as partículas primárias e secundárias dos raios cósmicos e algum elemento na atmosfera terrestre. O modelo atmosférico utilizado é composto por 78,1% de N_2 , 21,0% de O_2 e 0,9% de Ar e sua estrutura é dividida em 5 grandes camadas. Nas quatro primeiras, o incremento de massa $T(h)$ – onde h é a altitude – assume uma forma exponencial

$$T(h)_i = a_i + b_i e^{-\frac{h}{c_i}},$$

enquanto na última ele decai linearmente com a altitude

$$T(h)_i = a_i - b_i \frac{h}{c_i}.$$

Os termos a_i , b_i e c_i são parametrizações baseadas em resultados experimentais e podem variar ao longo do tempo e para diferentes regiões do planeta. Duas delas – ambas para a atmosfera dos EUA – são comparadas neste trabalho, uma feita por Linsley [4] e uma feita por Keilhauer [5], e são apresentadas nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Parametrização de acordo com Linsley [4]

Camada	Altitude (km)	a_i (g/cm ²)	b_i (g/cm ²)	c_i (cm)
1	0 – 4	- 186,5562	1222,6562	994186,38
2	4 – 10	- 94,919	1144,9069	878153,55
3	10 – 40	0,61289	1305,5948	636143,04
4	40 – 100	-	540,1778	772170,16
5	> 100	0,01128292	1	10^9

Tabela 2: Parametrização de acordo com Keilhauer [5]

Camada	Altitude (km)	a_i (g/cm ²)	b_i (g/cm ²)	c_i (cm)
1	0 – 7,0	- 149,801663	1183,6071	954248,34
2	7,0 – 11,4	- 57,932486	1144,0425	800005,34
3	11,4 – 37,0	0,63631894	1322,9748	629568,93
4	37,0 – 100,0	$4,35453690 \cdot 10^{-4}$	655,67307	737521,77
5	> 100,0	0,01128292	1	10^9

Experimentos de física de altas energias estão fundamentalmente apoiados em simulações de Monte Carlo. Elas permitem desde a calibração dos detectores até a análise de dados. Portanto, o principal objetivo deste trabalho será analisar o efeito das diferentes parametrizações no espectro de múons de raios cósmicos simulados, de forma que seja possível confrontar os resultados obtidos com os dados medidos pelo FD do experimento MINOS. As conclusões serão úteis para produzir melhores dados de Monte Carlo para a colaboração do experimento e, conseqüentemente, permitindo novas análises de dados – como análises de múons múltiplos.

Materiais e métodos

As simulações e a análise dos dados foram feitas em um computador com processador Intel Core i5, com CORSIKA 6970 [2]. A análise dos dados simulados foi realizada utilizando a ferramenta ROOT, na versão 5.28. Apenas os múons que alcançaram o nível da superfície são considerados. Foram simulados 10^4 EAS cujos primários eram prótons com $E = 1$ TeV. O ângulo azimutal foi fixado em $\phi = 30^\circ$ (valor aleatório) e o ângulo zenital foi variado entre $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 45^\circ$. Serão analisados o número de múons produzidos (μ^+ e μ^-) e suas distribuições de energia para diferentes ângulos zenitais, comparando ambas as parametrizações.

Resultados preliminares

O número de múons segue uma distribuição de Poisson e assume valores médios e desvios quadráticos médios menores à medida que o ângulo zenital aumenta, como é apresentado na figura 2.

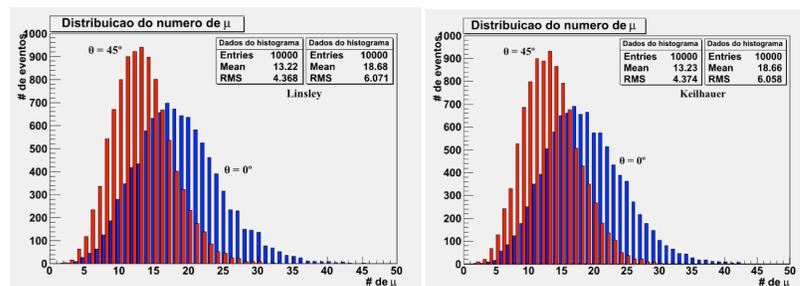


Figura 2: Os gráficos representam o número de chuviros em função do número de múons para as parametrizações feitas por Linsley e Keilhauer

A distribuição da energia dos múons no nível de observação assume um comportamento exponencial. Múons mais energéticos são mais raros (figura 3).

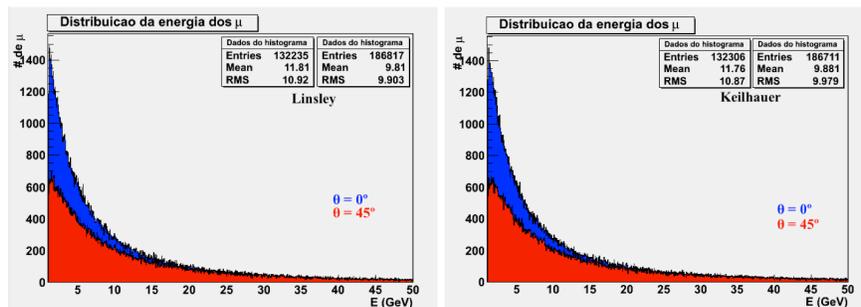


Figura 3: Os gráficos representam o número de múons produzidos, considerando todos os 10^4 EAS, para cada valor de energia. Distribuições referentes à Linsley e Keilhauer

Usando os valores médios e os desvios quadráticos médios, foi possível confrontar ambas as parametrizações. Os resultados são apresentados na figura 4.



Figura 4: Os gráficos representam os valores médios das distribuições encontradas anteriormente em função do ângulo zenital. As barras verticais representam os respectivos RMS. Valores médios para o número médio de múons e a energia média dos μ^- e μ^+

Conclusões

Para raios cósmicos cujos primários sejam prótons com $E = 1$ TeV não existem mudanças significativas nas parametrizações. O número médio de múons e suas distribuições de energia são consideradas similares. Novas análises, com diferentes valores de energia e com diferentes composições químicas dos primários (He, C, N, O e Fe) serão testadas.

Referências bibliográficas

- [1] Carlson P.; De Angelis, A. **Nationalism and internationalism in science: the case of the discovery of cosmic rays.** arXiv: 1012.5068v2. 28 de janeiro de 2011.
- [3] Adamson, P. *et al.* **First direct observation of muon antineutrino disappearance.** arXiv: 1104.0344 v3. 2011.
- [2] Heck, D.; Knapp, J.; Capdevielle, J. N.; Schatz, G.; Thouw, T. **CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers.** Report FZKA 6019. 1998.
- [4] Linsley, J. Private communications by M. Hillas. 1988.
- [5] Keilhauer B. *et al.* **Impact of varying atmospheric profiles on extensive air shower observation: atmospheric density and primary mass reconstruction.** Atropart. Phys. 22, p. 249. 2004.