

## PERFIL LONGITUDINAL DE CHUVEIROS ATMOSFÉRICOS EXTENSOS

LUAN ARBELETCHÉ<sup>1</sup>; MÁRCIO MÜLLER<sup>2</sup>; VÍCTOR GONÇALVES<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – luan.arbeletche@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – mamuller@ifi.unicamp.br

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas – barros@ufpel.edu.br

### 1. INTRODUÇÃO

A Terra é constantemente bombardeada por partículas energéticas provenientes do espaço, conhecidas como raios cósmicos. Essas partículas podem atingir a atmosfera com energias menores que  $10^9$  eV ou até com mais de  $10^{20}$  eV, onde o fluxo de eventos é fortemente suprimido devido ao efeito GZK (ENGEL; HECK; PIEROG, 2011). Para energias acima de  $10^{15}$  eV, o fluxo de raios cósmicos é muito baixo e as partículas associadas podem ser observadas somente através de medidas indiretas. Nessa faixa de energias, a análise é feita sobre a cascata de partículas secundárias geradas na interação do raio cósmico primário com a atmosfera. A esses chuviros de partículas dá-se o nome de Chuviros Atmosféricos Extensos (CAEs).

Após a primeira interação com atmosfera, os processos de produção de partículas secundárias dominam no desenvolvimento de um CAE, aumentando o número de partículas em um efeito cascata. Em um dado momento, a energia das partículas é pequena o suficiente para que os processos de absorção pela atmosfera dominem, fazendo com que o número de partículas caia rapidamente e o chuviro passe a extinguir-se. A profundidade na atmosfera (em  $g/cm^2$ ) onde um CAE atinge seu número máximo de partículas ( $X_{max}$ ) pode ser aproximada pelo modelo de Heitler-Matthews com a seguinte equação

$$X_{max} = \lambda_{had} + \lambda_{em} \cdot \ln \left( \frac{E_0}{2 N_{total} \cdot A \cdot \xi_{em}^c} \right), \quad (1)$$

onde  $\lambda_{had}$  é o comprimento de interação das partículas hadrônicas na atmosfera,  $\lambda_{em}$  é o comprimento de radiação das partículas eletromagnéticas na atmosfera,  $E_0$  é a energia da partícula primária,  $N_{total}$  é a multiplicidade de partículas produzidas nas interações hadrônicas,  $A$  é o número de massa da partícula primária e  $\xi_{em}^c$  é a energia crítica das partículas eletromagnéticas, abaixo da qual não há produção de partículas (GUIMARÃES, 2008). Com base nesse modelo, espera-se que a profundidade onde o chuviro atinge o máximo aumente com o logaritmo da energia  $E_0$  da partícula primária. É importante notar também a relação entre a massa  $A$  da partícula primária e o valor de  $X_{max}$ , resultado conhecido como modelo de superposição. Essas previsões são bastante relevantes, pois dizem respeito ao perfil longitudinal dos CAEs, que é o desenvolvimento do chuviro ao longo do seu eixo principal, sendo esse um dos principais observáveis via experimento.

Usualmente, o estudo dos CAEs é feito comparando-se dados experimentais com simulações computacionais. No entanto, um CAE típico pode envolver até  $10^{11}$  partículas no seu máximo (GUIMARÃES, 2008), o que torna as simulações bastante complicadas. Além disso, as simulações de CAEs lidam com interações hadrônicas com energias acima de  $10^{20}$  eV, valor que supera em algumas ordens de grandeza o limite da atual geração de aceleradores de partículas. Assim,

diversos modelos podem ser empregados nas simulações dos chuueiros atmosféricos, cada qual com suas propriedades e predições teóricas diferentes para as interações hadrônicas em altas energias.

Neste trabalho, utilizamos o software CORSIKA (COsmic Ray Simulator for Kaskade) para simular CAEs. Nosso objetivo é analisar as propriedades desses chuueiros e suas relações com as grandezas observáveis experimentalmente. Aqui, apresentamos os resultados obtidos na análise do perfil longitudinal em função da energia e da composição da partícula primária.

## 2. METODOLOGIA

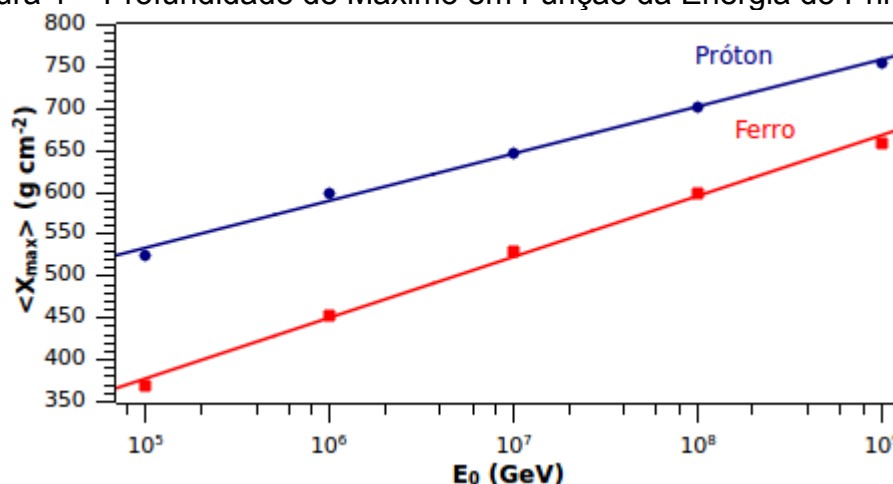
Foram feitas simulações com o CORSIKA para CAEs iniciados por raios cósmicos com energias entre  $10^{14}$  eV e  $10^{18}$  eV, tomando-se amostras de 50 chuueiros para cada valor de energia. As simulações foram feitas igualmente para chuueiros iniciados por prótons e por núcleos de ferro.

Com os resultados de perfil longitudinal obtidos, calculou-se o valor médio da profundidade onde os chuueiros atingem o número máximo de partículas ( $X_{max}$ ) em função da energia, para então compararmos os resultados com o modelo de Heitler-Matthews. Calculou-se também o desvio quadrático médio de  $X_{max}$  em função da energia para as diferentes partículas primárias.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura a seguir apresenta os resultados obtidos para  $X_{max}$  em função da energia  $E_0$  da partícula primária. Os pontos no gráfico representam as médias calculadas sobre as amostras obtidas nas simulações e as linhas são um ajuste linear desses dados com o logaritmo da energia. O eixo das abscissas no gráfico está ajustado em escala logarítmica.

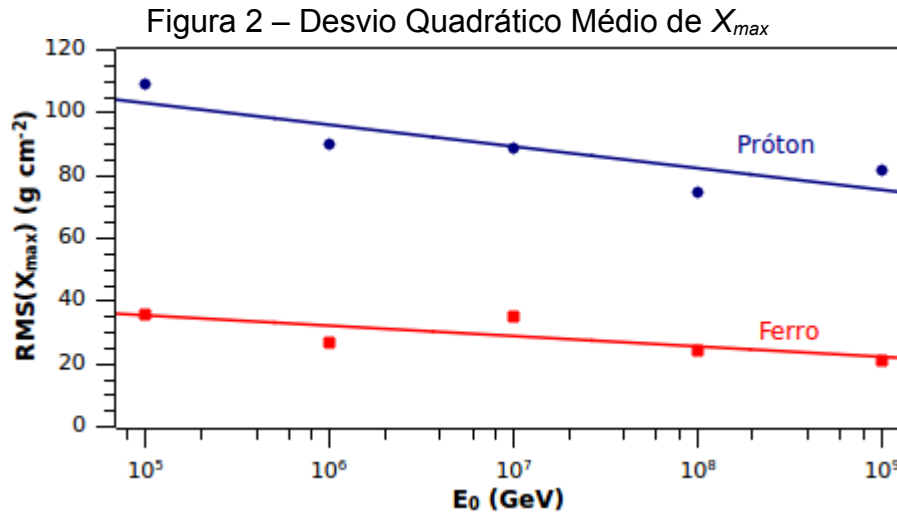
Figura 1 – Profundidade de Máximo em Função da Energia do Primário



Os resultados acima mostram que há uma dependência linear da profundidade de máximo dos chuueiros com o logaritmo da energia da partícula primária, tanto para aqueles iniciados por prótons quanto para aqueles iniciados por núcleos de ferro. Esse resultado é exatamente o previsto pelo modelo de Heitler-Matthews, equação (1). Além disso, os resultados deixam claro que os chuueiros iniciados por núcleos de ferro tem seus máximos antecipados em

relação àqueles iniciados por prótons, o que está em acordo com o modelo da superposição.

Analisou-se também as flutuações dos dados obtidos calculando-se o desvio quadrático médio de  $X_{max}$  como função da energia. Os resultados obtidos estão representados na figura abaixo.



O gráfico anterior mostra que os chuviscos iniciados por núcleos de ferro têm flutuações menores quando comparadas às flutuações de chuviscos iniciados por prótons. A importância desse resultado está no fato de que essas flutuações são observáveis em chuviscos atmosféricos e, devido à influência da composição da partícula primária, a medição dessas flutuações é uma forma de determinar indiretamente a composição dos raios cósmicos.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos são de grande importância por demonstrarem um método de análise dos CAEs que permite inferir informações como a energia e composição da partícula primária a partir de medições indiretas. Embora relevantes, esses resultados já são conhecidos, vide ENGEL; HECK; PIEROG (2008). Ainda assim, destaca-se a importância dos resultados no que concerne ao nível de desenvolvimento do presente trabalho, pois permitiram um maior aprofundamento dos autores no tema que será objeto de trabalhos posteriores mais sofisticados.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPDEVIELLE, J.N; HECK, D.; KNAPP, J.; SCHATZ, G.; THOUW, T. **CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Air Showers**. Report FZKA 6019 (1998), Forschungszentrum Karlsruhe. Acessado em 18 mai. 2014. Online. Disponível em: [https://web.ikp.kit.edu/corsika/physics\\_description/corsika\\_phys.html](https://web.ikp.kit.edu/corsika/physics_description/corsika_phys.html).

ENGEL, R.; HECK, D.; PIEROG, T. Extensive Air Showers and Hadronic Interactions at High Energy. **Annual Review of Nuclear and Particle Science**, Karlsruhe, v.61, p.467-489, 2011.

GRUPEN, C. **Astroparticle Physics**. Siegen: Springer, 2005.

GUIMARÃES, P.V. **Análise da influência das interações primárias em chuviros aéreos estendidos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

STANEV, T. **High Energy Cosmic Rays**. Chichester: Praxis Publishing, 2010.

THEODORO, V. M. **Contribuição para os métodos de identificação das componentes eletromagnética e muônica de chuviros atmosféricos extensos no Observatório Pierre Auger**. 2011. Dissertação (Mestrado em Física) – Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Estadual de Campinas.