

ESTUDO DA PRODUÇÃO DE LÉPTONS NOS CHUVEIROS ATMOSFÉRICOS EXTENSOS

TIAGO ALVES PEREIRA¹;
VICTOR PAULO GONÇALVES²

¹UFPel – tiagoalves304@gmail.com
²UFPel-barros@ufpel.edu.com

1. INTRODUÇÃO

Existe uma infinidade de fenômenos astronômicos que interagem com o planeta Terra, como tempestades solares e chuvas de meteoros, mas poucos oferecem tantas informações sobre as partículas elementares quanto os raios cósmicos. Esse evento, embora invisível a olho nu, carrega dados valiosos sobre partículas de alta energia que circulam pelo espaço.

Partículas de raios cósmicos atingem a atmosfera terrestre a uma taxa de cerca de 1000 por metro quadrado por segundo. São núcleos ionizados – cerca de 90% prótons, 9% partículas alfa e o restante núcleos mais pesados – e se distinguem por suas altas energias (GAISSER; ENGEL e RESCONI, 2016). Da colisão de raios cósmicos de alta energia, na ordem de 10^{15} GeV, com a atmosfera criam-se inúmeras outras partículas secundárias (píons, káons, elétrons, fótons, múons, ...) que se espalham pela superfície da terra dando origem ao chamado “Chuveiro Atmosférico Extenso (EAS)”.

Durante o EAS as partículas secundárias podem: interagir novamente, criando outras; perder energia por radiação ou ionização; decair em partículas estáveis. A Equação de Cascata Acoplada, usada para descrever o fluxo diferencial $\Phi_h(E, X)$ de partículas do tipo h , lida com essas três possibilidades em função da profundidade atmosférica (X , em g/cm^2) e da energia E da partícula. Ela é usada especificamente para simular a evolução de um chuveiro atmosférico, descrevendo a quantidade, a energia e a dispersão das partículas variam conforme o chuveiro se desenvolve na atmosfera.

O simulador de Monte Carlo é um método computacional baseado na geração de números aleatórios e suas probabilidades de ocorrerem. Embora seja efetivo, esse tipo de simulação tem um custo de processamento muito elevado, para energias altíssimas cada chuveiro pode exigir dias de CPU em clusters. Além da grande demanda de memória e armazenamento, já que cada partícula precisa ter sua trajetória, energia e tipo registrados, este método ainda podem ter flutuações estatísticas grandes, principalmente em regiões do espectro com baixa estatística. Para contornar essas dificuldades esse trabalho usa o código MCEq (*Matrix Cascade Equation*), em Python, para simular o fluxo das partículas do chuveiro atmosférico. Ele resolve a equação de cascata dada na forma matricial (Eq.1).

$$\frac{d}{dx} \Phi = [(-\mathbf{1} + \mathbf{C})\Lambda_{int} + \frac{1}{p(X)}(-\mathbf{1} + \mathbf{D})\Lambda_{dec}]\Phi \quad \text{Eq.2}$$

Onde:

- Λ_{int} e Λ_{dec} são, respectivamente, os comprimentos de interação e decaimento;
- \mathbf{C} e \mathbf{D} as matrizes de produção por interação e decaimento, respectivamente.

Segundo (FEDYNITCH, A; ENGEL, R; et al, 2015) ao mesmo tempo em que o código MCEq fornece precisão superior em energias muito altas, onde os métodos de Monte Carlo são frequentemente estatisticamente ineficientes, o alto desempenho do algoritmo nos permite realizar cálculos para muitos parâmetros de entrada e suposições do modelo em um tempo muito curto.

O objetivo desse trabalho é estudar a descrição padrão dos chuveiros atmosféricos extensos e sua implementação numérica no código MCEq, além de analisar o fluxo de léptons produzidos variando os parâmetros atmosféricos. Para isso, foi necessário fazer algumas adaptações no código principal para que se obter o fluxo convencional, resultante dos decaimentos de hadrons leves; o fluxo prompt, resultante dos decaimentos quase imediatos de hadrons pesados; e o fluxo total, correspondente à soma dos fluxos anteriores.

2. METODOLOGIA

Primeiro foi utilizado o código padrão do MCEq, disponível na documentação da biblioteca. Logo em seguida, com a plataforma de programação Visual Studio Code (VS Code) algumas alterações foram feitas de modo à unir a análise dos fluxos de mûons de forma comparativa. Para isso, as linhas de código "conv_mu+", "conv_mu-", "pr_mu+", "pr_mu-", "total_mu+", "total_mu-" referentes respectivamente ao fluxo convencional, prompt e total do mûon(μ^+) e antimûon(μ^-).

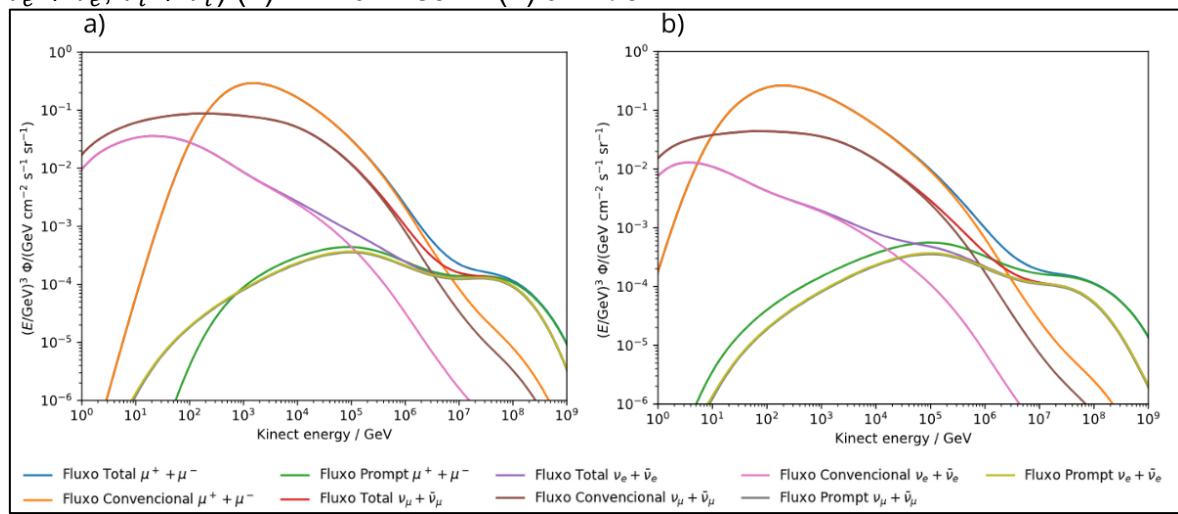
Para a criação do gráfico da comparação dos fluxos dos neutrino/antineutrino do mûon ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$), do elétron ($\nu_e + \bar{\nu}_e$) e do neutrino do tau ($\nu_\tau + \bar{\nu}_\tau$), também foi necessário uma adaptação no código de forma a adicionar as linhas correspondentes para serem processados pela função mceq.get_solution, assim sendo para os mûons, temos "total_numu" e "total_antinumu" para o fluxo total de neutrinos mûonicos e suas antipartículas, "conv_numu" e "conv_antinumu" para os fluxos convencionais, e "pr_numu" e "pr_antinumu" para os fluxos prompt. Para os elétrons, os termos são "total_nue" e "total_antinue" para o fluxo total de neutrinos eletrônicos e suas antipartículas, "conv_nue" e "conv_antinue" para os fluxos convencionais, e "pr_nue" e "pr_antinue" para os fluxos prompt. Para a obtenção dos resultados foi variado o ângulo zenital "theta_deg", ou seja, ângulo de incidência da partícula em relação à vertical, medido em graus mas mantendo o fator de magnitude "mag=3", responsável por escalar a solução final da simulação, constante.

Os gráficos do fluxo diferencial de neutrinos foram produzido com outro exemplo do código MCEq; neste, o ângulo zenital se manteve constante theta_deg=0.0 e configurados os modelos atmosféricos sazonais para: o verão, flux_summer = {} e o inverno, flux_winter = {} pois a densidade e temperatura da atmosfera afetam a probabilidade de decaimento/interação de mésons (π, K) e, portanto, alteram o fluxo de neutrinos observado em detectores como o IceCube.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparando ambos os gráficos da Figura 1 podemos observar que o fluxo convencional múons e antimuons, que é dominante em ambas as imagens em baixa energia mas que vai decaindo conforme a energia aumenta, e o prompt já cresceu exponencialmente antes em $\theta = 90^\circ$ do que com $\theta = 60^\circ$; isso ocorre porque a trajetória horizontal (zenital) implica maior caminho na atmosfera, aumentando a chance de absorção ou decaimento antes de atingir o detector.

Figura 1: Fluxos do múon e antimuon (μ^+, μ^-), neutrinos e antineutrinos ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$, $\nu_e + \bar{\nu}_e$, $\nu_\tau + \bar{\nu}_\tau$) (a) com $\theta = 60^\circ$ e (b) $\theta = 90^\circ$.

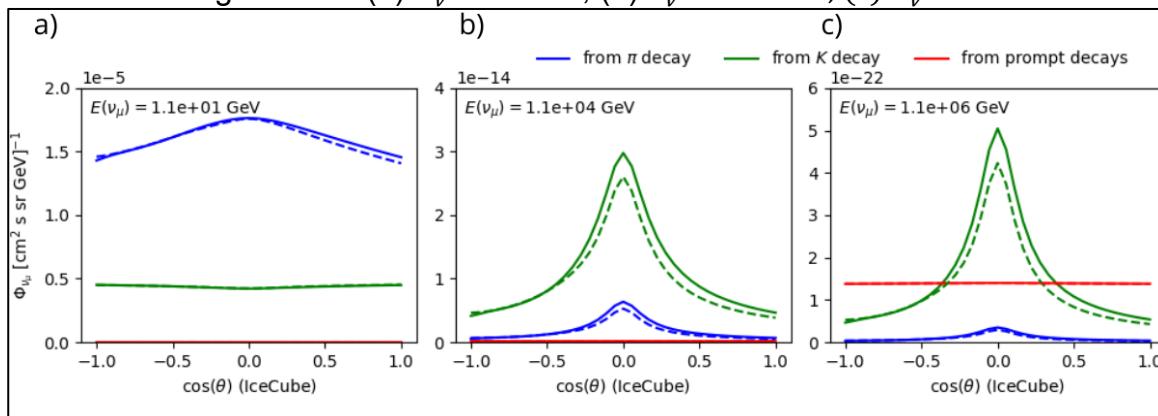


Fonte: O autor.

O fluxo prompt de neutrino (proveniente do decaimento de mésons com quarks pesados, como D e B) se mantém similares em ambas as configurações pois praticamente não depende do ângulo, porém o do múon converge mais cedo em 1(b) já entre 10^0 e 10^1 GeV, enquanto em 1(a) essa convergência ocorre em energias mais altas porque os múons convencionais não sobrevivem ao caminho horizontal mais longo na atmosfera, enquanto os múons prompt, que vêm de decaimentos rápidos e de energias maiores, têm mais chance de sobreviver. Em ambas as figuras, o fluxo convencional domina em energias mais baixas e médias, porém decaem em energias muito altas.

A figura 2 exibe os espectros angulares de neutrinos atmosféricos calculados para diferentes energias, mostrando a contribuição de diferentes canais de decaimento de mésons ao passo que o eixo X corresponde ao cosseno do ângulo zenital (θ) no detector IceCube enquanto o eixo Y é o fluxo diferencial de neutrinos (Φ_ν). Na faixa de energia do gráfico 2(a), 10GeV , o fluxo de neutrinos é dominado quase inteiramente pelos decaimentos de píons (π), representados pela curva azul, os káons (verde) contribuem de forma subdominante e quase constante; e o decaimento prompt (vermelho) são nulos nesta escala de energia, como esperado, já que a produção de hadrons contendo quarks pesados é altamente suprimida em energias tão baixas. Já no gráfico 2(b) ao qual a energia é 10^4GeV os káons passam a ser a principal fonte de neutrinos, superando os píons. Isso ocorre porque, em energias mais altas, os píons têm tempo de vida suficientemente longo para interagir antes de decair, suprimindo sua contribuição relativa.

Figura 2: Fluxo diferencial de neutrinos atmosféricos do tipo ν_μ calculado para diferentes energias fixas: (a) $E_\nu \approx 10\text{GeV}$; (b) $E_\nu \approx 10^4\text{GeV}$; (c) $E_\nu \approx 10^6\text{GeV}$.



Fonte: O autor.

Por fim o gráfico 2(c), cujo a energia é maior que os anteriores, suprime ainda mais a contribuição dos píons e enquanto os kaos continuam dominando. Com $E_\nu \approx 10^6\text{GeV}$ a decaimentos prompt (vermelho), provenientes de hadrons contendo quarks pesados (D, B), tornam-se um fonte maior de neutrinos se comparar à baixas energias; diferentemente dos decaimentos π e K que são decaimentos convencionais e fortemente moduladas pela direção zenital, a contribuição prompt é praticamente isotrópica e independente do ângulo.

4. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu entender os mecanismos fundamentais na produção de leptões na atmosfera da Terra, resultantes da interação com raios cósmicos a partir da utilização da equação de cascata para representar matematicamente a evolução dos chuveiros atmosféricos extensos, possibilitando a relação entre perdas por interação, decaimento e processos de produção de partículas secundárias. Neste contexto, o MCEq foi apresentado como uma ferramenta ágil para a obtenção de fluxos médios, sendo particularmente adequado a estudos em larga escala. Além disso, a análise comparativa entre diferentes ângulos de incidência e energias evidenciou suas influências diretamente na contribuição relativa dos fluxos convencionais e prompt, destacando a robustez dos neutrinos em relação às perdas e a maior atenuação sofrida pelos mísseis consolidando uma visão abrangente dos processos que governam a física de chuveiros atmosféricos e sua relevância para a astrofísica de partículas

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GAISSER, Thomas K.; ENGEL, Ralph; RESCONI, Elisa. **Cosmic Rays and Particle Physics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

FEDYNITCH, A; ENGEL, R; GAISSER, T; RIEHN, F; STANEV, T. **Calculation of conventional and prompt lepton fluxes at very high energy**. *EPJ Web of Conferences*, v. 99, p. 01, 2015.

MCEQ. **MCEq documentation**. Disponível em: <https://mceq.readthedocs.io/en/latest/index.html>. Acesso em: 6 ago. 2025.