

## ESTUDO DO IMPACTO DA PRODUÇÃO DE MESONS PESADOS NO DESENVOLVIMENTO DOS CHUVEIROS ATMOSFÉRICOS EXTENSOS

RAYLA LIMA DE SOUZA<sup>1</sup>; VICTOR PAULO BARROS GONGALVES<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – [contatoraylalima@gmail.com](mailto:contatoraylalima@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – [barros@ufpel.edu.br](mailto:barros@ufpel.edu.br)

### 1. INTRODUÇÃO

A física de astropartículas, nas últimas décadas, obteve avanços significativos com estudos em regiões cinemáticas muito acima daquelas estudadas pelo Grande Colisor de Hadrons (LHC), com pesquisas acerca das colisões de raios cósmicos com a atmosfera, em que são gerados os chuueiros atmosféricos que produzem um fluxo de múons e neutrinos (GONÇALVES et al. 2017).

Os raios cósmicos, são partículas altamente carregadas, que entram na atmosfera da Terra e produzem uma infinidade de partículas secundárias em interações com núcleos de ar. Algumas dessas partículas secundárias irão decair em múons e neutrinos, que não são absorvidos na atmosfera e podem ser detectados em observatórios, como o IceCube e Auger. Os espectros desses léptons contêm não apenas informações sobre os raios cósmicos primários, mas também sobre a física das partículas de sua produção e as propriedades da atmosfera percorrida (FEDYNITCH et al. 2019).

Os dados experimentais indicam que, em baixas energias ( $E_\nu \leq 10^5$  GeV), o fluxo de neutrinos é dominado por neutrinos atmosféricos que advêm do decaimento de mesons leves (pions e kaons). Esse fluxo é chamado de fluxo de neutrinos atmosféricos convencional. Por outro lado, na faixa de energia ( $10^5$  GeV  $< E_\nu < 10^7$  GeV), o fluxo *prompt* de neutrinos atmosféricos, resultado do decaimento de hadrons de quarks pesados, que possuem um tempo de vida curto e decaem em neutrinos quase instantaneamente, torna-se importante. O conhecimento preciso dessa contribuição é crucial para a determinação do fluxo de neutrinos cósmicos (GIANNINI et al. 2018). Um dos grandes desafios teóricos é a descrição precisa destes chuueiros atmosféricos, em especial, a contribuição da produção de mesons pesados, que determinam, o comportamento do fluxo *prompt* de múons e de neutrinos nas energias estudadas pelos observatórios IceCube e Auger.

As contribuições mais significativas no estudo dos raios cósmicos ultraenergéticos são produzidas pelo observatório Pierre Auger, situado na Argentina, com uma área de aproximadamente 3 mil km<sup>2</sup>, que nos possibilita estimar o número de partículas que compõem o chuueiro. A detecção de neutrinos ultraenergéticos pelo observatório IceCube deu início uma nova era na física de neutrinos. O observatório de neutrinos IceCube, está localizado na Antártida entre 1450m e 2450m abaixo da superfície, possui uma faixa dinâmica de GeV a centenas de TeV, que nos possibilita estudar energias muito superiores daquelas estudadas no LHC.

Para estas interações, a contribuição de processos hadrônicos que podem ser calculados usando a teoria das interações forte - a Teoria da Cronodinâmica Quântica (QCD), utilizando métodos perturbativos. O cálculo do fluxo de neutrinos atmosféricos do *prompt* tem sido objeto de intensa atividade. Como os quarks pesados são uma fonte importante de neutrinos, tornou-se necessário descrever

sua produção com melhor precisão (GONÇALVES et al. 2017). Para determinar o fluxo de neutrinos atmosféricos prompt, devemos descrever a produção e a decaimento dos hádrons pesados, assim como a propagação das partículas associadas através da atmosfera. Para o cálculo do fluxo de neutrinos associado à produção de um hádron pesado H e seu decaimento em um neutrino  $\nu$  nos regimes de baixa e alta energia, podem ser representados, respectivamente, pelas equações (GONÇALVES et al. 2017)

$$\phi_{\nu}^{H,low} = \frac{Z_{NH}(E)Z_{H\nu}(E)}{1-Z_{NN}(E)} \phi_N(E, 0) \quad (1)$$

$$\phi_{\nu}^{H,high} = \frac{Z_{NH}(E)Z_{H\nu}(E)}{1-Z_{NN}(E)} \frac{\ln(\Lambda_H/\Lambda_N)}{1-\Lambda_N/\Lambda_H} \frac{m_H c h_0}{E \tau_H} f(\theta) \phi_N(E, 0) \quad (2)$$

O momento Z associado a produção do charm em altas energias pode ser expresso por

$$Z_{pc}(E) = \int_0^1 \frac{dx_F}{x_F} \frac{\phi_p(E/x_F)}{\phi_p(E)} \frac{1}{\sigma_{pA}(E)} \frac{d\sigma_{pA \rightarrow charm}(E/x_F)}{dx_F} \quad (3)$$

Neste trabalho, estudamos a produção de partículas compostas por mésons pesados e seu decaimento em neutrinos e múons ultraenergéticos. Nosso objetivo é obter previsões mais precisas para o fluxo de mesons, os quais são medidos pelos observatórios IceCube e Auger. De acordo com estudos feitos por GONÇALVES et al. (2017) a região cinemática provada no IceCube, no estudo de neutrinos ultraenergéticos, é determinada por neutrinos que advêm do decaimento de mesons pesados à grandes valores da variável de Feynman, além daquela estudada no LHC. Portanto podemos afirmar que o observatório IceCube comprova a produção de mesons pesados em uma região cinemática complementar ao LHC, em que novos efeitos dinâmicos podem estar presentes.

Para a realização deste estudo utilizaremos o gerador Matrix Cascade Equations (MCEq), que resolve numericamente as equações de cascata que descrevem a evolução do chuveiro na atmosfera e trata as interações hadrônicas, incluindo a produção de mesons pesados, usando o gerador de eventos Sybill 2.3 (FEDYNITCH et al. 2019).

## 2. METODOLOGIA

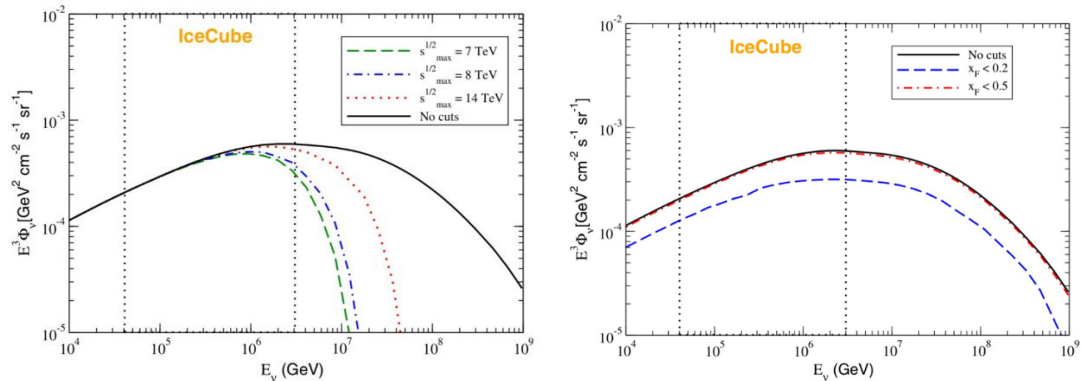
Para a realização deste trabalho, desenvolvemos inicialmente uma fundamentação teórica acerca do estudo dos raios cósmicos abordando, sua produção, propagação e detecção; realizamos também o cálculo analítico e numéricos do número de múons e neutrinos gerados em chuveiros atmosféricos extensos gerados por raios cósmicos ultraenergéticos, em que analisamos a equação de cascata das partículas, hádrons pesados, para descrever o fluxo de neutrinos.

Realizamos também um estudo do gerador de Monte Carlo, Matrix Cascade Equations (MCEq), e a realização das simulações numéricas para os fluxos prompt, convencional e fluxo total e discursões acerca dos resultados obtidos, fazendo uma análise das regiões cinemáticas dominantes baseados nos resultados de GONÇALVES et al. (2017)

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Faremos uma análise dos resultados parciais onde inicialmente faremos uma análise teórica acerca dos resultados apresentados por GONÇALVES et al. (2017), para entendermos qual é a faixa de variáveis cinemáticas relevantes para a produção dos neutrinos de alta energia observados recentemente pelo IceCube ou para energias mais altas do que os possíveis atualmente e em seguida apresentamos alguns dos resultados provenientes das simulações com o MCEq.

Primeiro analisamos como o fluxo de neutrinos dos decaimentos semileptônicos de mésons D depende da energia máxima de colisão no centro de massa. Na Figura 1(a esquerda), apresentamos os resultados obtidos para diferentes valores das energias máximas. Em nosso cálculo, consideramos três valores diferentes para a energia máxima permitida no centro de massa na colisão  $pp$  que gera o par de quarks pesados. Para comparação, a previsão completa para o fluxo, denotada como “sem cortes” na figura, é apresentada. Aqui, não há limitações de energia. A figura demonstra que o fluxo depende da seção transversal para a produção de quarks pesados na faixa de energia do LHC e em energias ainda maiores. Apresentamos os resultados obtidos para diferentes valores das energias máximas consideradas na análise da seção de choque diferencial na Equação (3) (GONÇALVES et al. 2017).



*Figura 1: Impacto de diferentes cortes na energia máxima no centro de massa das colisões  $pp$  para o fluxo prompt de neutrinos e efeitos de corte sobre a variável de Feynman  $x_F$  no fluxo prompt de neutrinos*

Na Figura 1 (a direita), apresentamos os resultados para o fluxo de neutrinos em prompt para diferentes cortes na variável  $x_F$  de Feynman. Descobrimos que a contribuição dominante para o fluxo de neutrinos normalmente vem de  $x_F$  na região  $0.2 < x_F < 0.5$  (GONÇALVES et al. 2017).

Na figura 2, apresentamos o fluxo de múons onde escolhemos dois diferentes graus de incidência,  $\theta = 60^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$ , onde observamos que o fluxo convencional e o fluxo total, para ambos os ângulos, apresentam um decaimento para as regiões de altas energias. Já o fluxo prompt para o ângulo de  $60^\circ$  (a esquerda) converge na região entre  $10^0$  GeV à  $10^1$  GeV e para o ângulo de  $90^\circ$  (a direita) na região de  $10^1$  GeV à  $10^2$  GeV isso ocorre por que os múons para o fluxo convencional possuem menor tempo de vida, enquanto os múons para o fluxo prompt, que advém de decaimentos rápidos e de altas energias, possuem maior tempo de vida.

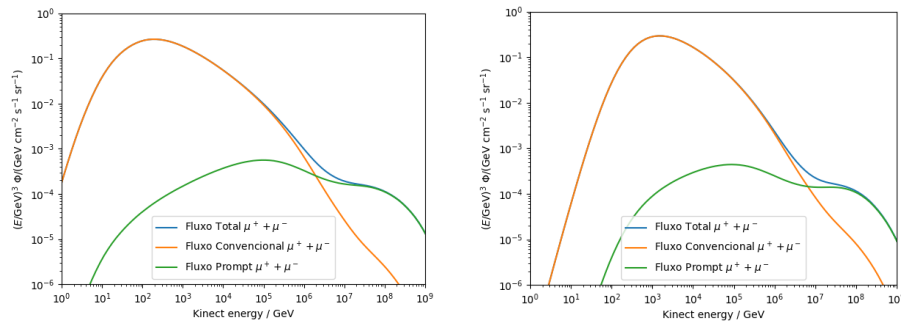


Figura 2: fluxo de múons ( $\mu^+, \mu^-$ ) para os ângulos de  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , respectivamente.

Na figura 3, analisamos o fluxo de neutrinos, mantendo os ângulos de incidência de  $\theta = 60^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$ , assim como na figura 2, o fluxo convencional apresenta um decaimento para as regiões de altas energias para ambos os casos. O fluxo *prompt* de neutrinos por não depender do ângulo de incidência, não apresenta variação.

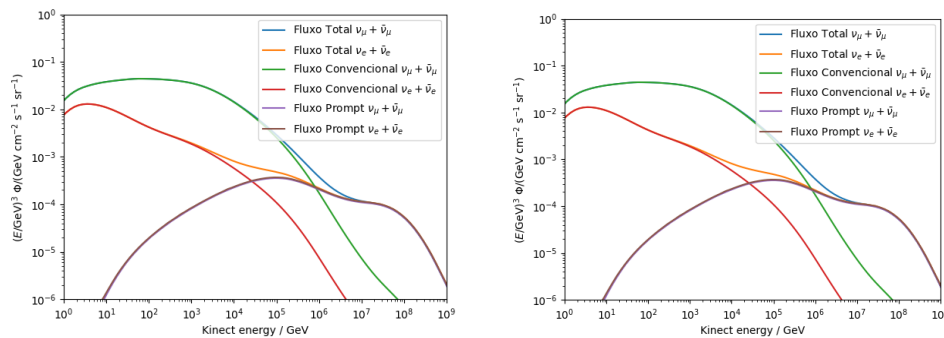


Figura 3: fluxos de neutrino e antineutrinos ( $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu, \nu_e + \bar{\nu}_e, \nu_\tau + \bar{\nu}_\tau$ ) para os ângulos de  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , respectivamente

#### 4. CONCLUSÕES

A descrição precisa dos fluxos de neutrinos atmosféricos convencionais e prompt é fundamental para a interpretação dos resultados dos Observatórios de neutrinos, como o IceCube. Neste trabalho analisamos que os resultados obtidos no LHC apesar de satisfatórios, não são suficientes. Para o estudo do fluxo prompt de neutrinos ultraenergéticos precisamos conhecer para energias acima das estudadas pelo LHC.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GONCALVES V. P., MACIULA R., PASECHNIK R., SZCZUREK A., Mapping the dominant regions of the phase space associated with cc production relevant for the prompt atmospheric neutrino flux. **Physical Review**, v. 96, 2017.
- 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.
- GIANNINI, A.V. GONCALVES V.P, NAVARRA F.S. Intrinsic charm contribution to the prompt atmospheric neutrino flux, **Physical Review**, v. 98 p. 1, 2018.