

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE INTERAÇÕES DIFRATIVAS EM SIMULAÇÕES DE CHUVEIROS ATMOSFÉRICOS EXTENSOS

LUAN ARBELETCHÉ¹; MÁRCIO MÜLLER²; VICTOR GONÇALVES³

¹Universidade Federal de Pelotas – luan.arbeletche@ufpel.edu.br

²Universidade Federal de Pelotas – mamuller@ifi.unicamp.br

³Universidade 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 maiores que 10^{20} eV, onde o fluxo de eventos é fortemente suprimido devido ao efeito GZK (ENGEL; HECK; PIEROG, 2011). Raios cósmicos com energias maiores que 10^{14} eV são tão raros que torna-se inviável a realização de experimentos para observá-los diretamente. No entanto, esses raios cósmicos altamente energéticos interagem com átomos presentes na atmosfera e produzem cascatas de partículas, conhecidas como Chuviros Atmosféricos Extensos (CAEs), cujo desenvolvimento pode ser observado por detectores terrestres (ENGEL; HECK; PIEROG, 2011).

Obter informações sobre raios cósmicos através da observação de CAEs não é uma tarefa simples. Tradicionalmente, comparam-se observações experimentais com simulações computacionais detalhadas. Ou seja, a interpretação de dados experimentais depende da modelagem computacional de CAEs. Atualmente, um dos códigos Monte Carlo mais utilizados para simular o desenvolvimento de CAEs na atmosfera é o CORSIKA, criado originalmente para o experimento KASCADE, na Alemanha (HECK; PIEROG, 2013). Nele, todas as partículas produzidas e suas interações ao longo do desenvolvimento do chuveiro são simuladas com o maior detalhamento possível. Para tal, é necessário modelar interações hadrônicas com energias de centro de massa de até $\sqrt{s} \approx 430$ TeV, valor que supera em quase duas ordens de grandeza as maiores energias atingidas pelos atuais aceleradores de partículas (LIPARI, 2012).

Em altas energias, as colisões hádron-hádron são dominadas pela interação forte. Nelas, de acordo com a teoria da Cromodinâmica Quântica (QCD – do termo em inglês *Quantum Chromodynamics*), as interações hádron-hádron ou hádron-núcleo são mediadas pela troca de glúons. Embora forneça embasamento teórico consistente, a QCD permite cálculos por métodos perturbativos somente para processos onde há grande troca de momentum entre as partículas interagentes, conhecidas como interações “duras” (do inglês *hard*), que constituem apenas uma pequena fração de todos os processos que ocorrem a altas energias. No outro extremo, temos as interações “suaves” (do inglês *soft*), caracterizadas por uma pequena troca de momentum e que podem ser abordadas somente através de modelos fenomenológicos (DOVA; FERRARI, 2007).

Processos hadrônicos difrativos são reações a altas energias nas quais não há troca de números quânticos entre as partículas que colidem. Nessas interações, a troca de momentum normalmente é pequena e, portanto, elas não podem ser tratadas pela QCD através de métodos perturbativos (BARONE, 2002). Os processos difrativos apresentam, em média, produção de poucos secundários e alta elasticidade (CANAL; LUNA; SCIUTTO; ZEPEDA, 2004), definida por

$$f_L = \frac{E_{lead}}{E_p}, \quad (1)$$

onde E_{lead} é a energia da chamada *leading particle*, a partícula que emerge da interação portando a maior fração da energia do projétil, denotada por E_p .

Por apresentarem, em média, alta elasticidade, as interações difrativas em raios cósmicos são responsáveis por fazer com que CAEs transportem energia mais profundamente na atmosfera. Espera-se que no limite assintótico 25% das interações próton-próton sejam difrativas (KHACHATRYAN et. al., 2015). Embora atualmente não se saiba em que escala de energia a componente difrativa se aproxime do limite assintótico, ela é uma componente não desprezível e sua modelagem nos códigos Monte Carlo tem grande influência sobre a interpretação dos dados de CAEs.

Atualmente existem diversos modelos disponíveis para a simulação de interações hadrônicas para raios cósmicos. Os códigos mais utilizados são o EPOS LHC e o QGSJETII-04. Existem outros modelos como o Sibyll 2.1 (uma revisão breve sobre esses modelos pode ser encontrada em DOVA; FERRARI, [2011]). Nesses pacotes de simulação, as interações duras são tratadas pela QCD perturbativa, enquanto que os processos suaves apresentam abordagens fenomenológicas diferentes. Embora tenham sido ajustados para concordar com os resultados obtidos na primeira tomada de dados do LHC, a $\sqrt{s} = 7$ TeV, eles produzem resultados diferentes quando extrapolados para energias de raios cósmicos. Neste trabalho apresentamos uma comparação extensa entre esses três modelos citados no que diz respeito à física das interações difrativas. Nosso intuito é preencher uma lacuna presente na literatura sobre qual é a influência dessas abordagens diferentes à física difrativa na interpretação de dados de CAEs.

2. METODOLOGIA

Em nossa análise, utilizamos os códigos Monte Carlo QGSJET-II 04, Sibyll 2.1 e EPOS LHC para simular colisões próton-ar. Com eles, simulamos primeiramente 10^4 colisões para cada valor de energia entre 10^{11} eV e 10^{20} eV sem fazer restrições quanto ao tipo de interação produzida. A seguir, repetimos as simulações permitindo somente interações que os próprios modelos classificam como sendo não-difrativas. Após a interação, todas as partículas instáveis são forçadas a decair.

Como alvo, consideramos uma mistura de oxigênio, nitrogênio e argônio, que são os elementos mais abundantes na atmosfera. A escolha do alvo é feita aleatoriamente em cada evento considerando a seção de choque e a fração de cada elemento na composição da atmosfera. Esse método é baseado no código do CORSIKA (HECK; PIEROG, 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Começamos nossa análise comparando o número de secundários produzidos em cada interação. Na Figura 1 representamos a distribuição do número de secundários para três valores representativos de energia. Nos três gráficos vemos um pico característico das interações difrativas na região de poucos secundários. Além disso vemos que existem diferenças entre os modelos nessas distribuições.

O painel à esquerda na Figura 2 é complementar às distribuições de secundários. Nele, mostramos o número médio de secundários em função da energia do projétil (no referencial de laboratório). As curvas sólidas correspondem às

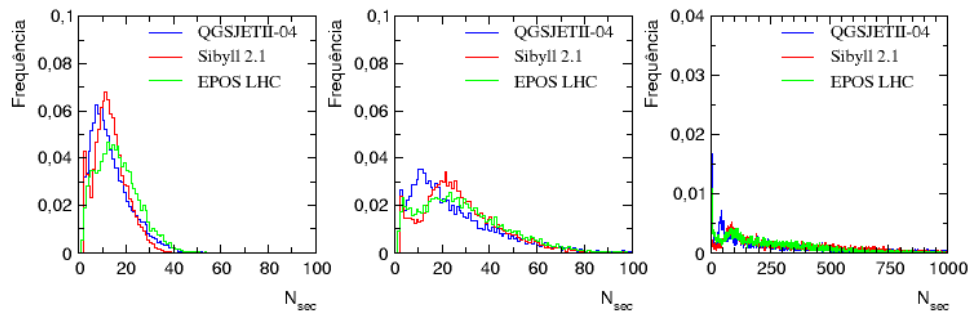


Figura 1 – Distribuições de secundários para 100 GeV (à esquerda), 1 TeV (no centro) e 100 PeV (à direita).

médias gerais e as curvas tracejadas correspondem às médias sobre os eventos não-difrativos. O gráfico mostra que os modelos concordam razoavelmente bem em baixas energias e que, para os projéteis mais energéticos o modelo QGSJETII-04 produz o maior número de secundários, enquanto que o Sibyll 2.1 produz a menor quantidade de partículas. Esse resultado é de grande importância no desenvolvimento de um CAE, pois espera-se que quanto mais partículas sejam produzidas em cada interação, mais rapidamente o chuveiro atinja o seu máximo.

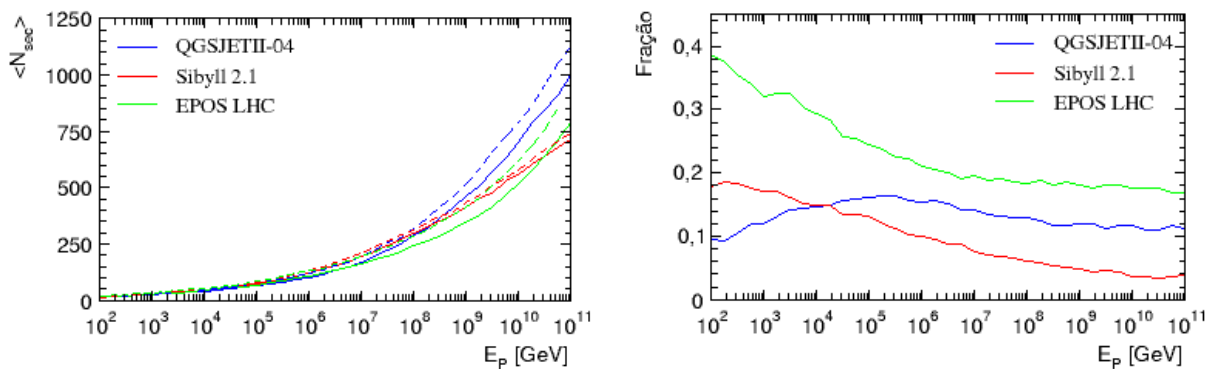


Figura 2 – À esquerda: número médio de secundários em função da energia. À direita: fração de eventos difrativos.

Além disso, vemos que para o Sibyll 2.1 a curva de eventos não-difrativos difere muito pouco da curva que contém todos os eventos. Esse resultado está relacionado à probabilidade de ocorrência de eventos difrativos em cada modelo. No painel à direita na Figura 2 mostramos a fração de eventos difrativos em função da energia. O EPOS LHC é responsável por produzir a maior fração de eventos difrativos em todo o espectro de energias analisado, iniciando com um valor de quase 40% para 100 GeV e tendendo a um valor menor constante à medida que a energia aumenta. Já no QGSJETII-04, a fração de eventos difrativos aumenta até que atinge um valor máximo e logo diminui tendendo a um valor constante em torno de 12% para altas energias. No Sibyll 2.1, a curva tende a diminuir assintoticamente. Esse resultado é importante por estar relacionado à maneira como os modelos calculam as seções de choque total e difrativa.

Além dos resultados aqui apresentados, realizamos uma análise sobre a elasticidade das interações geradas com cada modelo, que revelaram grandes diferenças entre si. Esse resultado deve ter impacto sobre o perfil longitudinal médio, pois uma interação primária com alta elasticidade deve fazer com que o chuveiro transporte energia mais profundamente na atmosfera. Outro objeto de nossa análise foi a fração de píons produzida em cada interação, na qual os modelos também apresentaram diferenças. A importância desse resultado reside no fato de que píons

neutros decaem quase que instantaneamente em pares de fótons, alimentando a cascata eletromagnética de um CAE, cujo papel é preponderante no número total de partículas. Por outro lado, os píons carregados tem no seu principal canal de decaimento a produção de múons, cujo impacto na interpretação de dados de CAEs tem sido objeto de estudos recentes em observatórios como o Pierre Auger, na Argentina (AAB et. al., 2014).

4. CONCLUSÕES

Realizamos uma comparação entre os produtos de colisões próton-núcleo geradas com os pacotes de simulação para colisões hadrônicas QGSJETII-04, Sibyll 2.1 e EPOS LHC. Mostramos que existem diferenças na abordagem da física difrativa entre esses modelos. Na próxima etapa deste trabalho pretendemos estudar os impactos da maneira como cada modelo aborda a física difrativa sobre o desenvolvimento de CAEs, incluindo a análise de observáveis e o papel das interações difrativas na interpretação de dados experimentais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAB, A. et al. (Auger Collaboration). Muons in air showers at the Pierre Auger Observatory: Measurement of atmospheric production depth. **Physical Review D**, Estados Unidos, v.90, p. 1 – 15, 2015.

BARONE, V.; PREDAZZI, E. **High Energy Particle-Diffraction**. Nova Iorque: Springer, 2002.

CANAL, C. A. G.; LUNA, R.; SCIUTTO, S. J.; ZEPEDA, A. Influence of diffractive interactions on cosmic ray air showers. **Physical Review D**, Estados Unidos, v.70, p. 1 – 11, 2004.

CAPDEVIELLE, J. N.; HECK, D.; KNAPP, J.; SCHATZ, G.; THOUW, T. **CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers**. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe. 1998. Acessado em 27 jul. 2015. Online. Disponível em: https://web.ikp.kit.edu/corsika/physics_description/corsika_phys.pdf

DOVA, M. T.; FERRARI, S. Confronting models of cosmic ray interactions with particle physics at LHC energies. **The European Physics Journal C**, Berlin, v.52, p. 673 – 681, 2007.

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

KHACHATRYAN, V. et. al. (CMS Collaboration). Measurement of diffractive dissociation cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. **Physical Review D**, Estados Unidos, v.92, p. 1 – 32, 2015.

LIPARI, P. Cosmic ray and hadronic interactions. In: **XII HADRON PHYSICS**, Bento Gonçalves, 2012. AIP Conference Proceedings, Estados Unidos: AIP, v. 1520, p. 27 – 67, 2013.