

INFLUÊNCIA DA FÍSICA DIFRATIVA EM CHUVEIROS ATMOSFÉRICOS EXTENSOS ULTRAENERGÉTICOS

LUAN ARBELETCHE¹; MÁRCIO MÜLLER²; VICTOR GONÇALVES³

¹Universidade Federal de Pelotas – luan.arbeletche@gmail.com

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

³Universidade Federal de Pelotas – victorpbg@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

As partículas mais energéticas já observadas na Terra tem origem cósmica e podem atingir energias da ordem de 10^{20} eV, superando em quase duas ordens de grandeza as energias atingidas em aceleradores terrestres. Embora o fluxo desses Raios Cósmicos (RCs) tenha sido medido com precisão nas energias mais baixas, região do espectro onde a composição é bem conhecida, os Raios Cósmicos Ultraenergéticos (RCUEs) ainda apresentam mistérios em relação à sua origem, fluxo e composição (LIPARI, 2012).

Não obstante os recentes esforços na detecção de RCUE, existem ainda incertezas intrínsecas ao método indireto de detecção utilizado nos observatórios atuais que não podem ser totalmente controladas. Dito método de detecção consiste em observar as cascatas de partículas geradas na interação do Raio Cósmico primário com a atmosfera, chamadas de Chuveiros Atmosféricos Extensos (CAEs), e comparar com resultados de simulações computacionais detalhadas dessas cascatas. Essas simulações normalmente são feitas utilizando-se o software CORSIKA (CAPDEVIELLE et al, 1998), cujo intuito é simular a propagação das partículas do chuveiro na atmosfera e todas suas interações. Enquanto as interações eletromagnéticas são bem descritas pela Eletrodinâmica Quântica (QED), o mesmo não ocorre para as interações fortes (ENGEL; HECK; PIEROG, 2011). Sabe-se que a maior contribuição à incerteza na detecção de RCUEs advém da modelagem das colisões hadrônicas em altas energias. Isso, aliado ao fato de que não dispomos de ferramentas para aplicar a Cromodinâmica Quântica (QCD), teoria das interações fortes, a todos os processos envolvendo interações fortes, resulta em uma grande janela para interpretação das observações dos RCUEs: a determinação da composição torna-se dependente do modelo fenomenológico escolhido para descrever as colisões hadrônicas e existem incertezas na medição da energia.

Os modelos de interação hadrônica mais utilizados atualmente são os geradores de evento Monte Carlo QGSJET-II 04c, EPOS LHC e Sibyll 2.1. Os dois primeiros são implementações distintas do Pomeron *semi-duro*, que contém uma contribuição perturbativa (QCD) e outra não-perturbativa, abordada fenomenologicamente. Ambos foram parametrizados de acordo com dados recentes obtidos no LHC. Já o Sibyll 2.1 é baseado no modelo de *mini-jatos*, possuindo também uma escala de separação entre a parte perturbativa e a parte não perturbativa.

A seção de choque de difração contribui com algo em torno de 25% da seção de choque total em colisões próton-próton em energias de aceleradores (KHACHATRYAN et. al., 2015). O estado final nesse tipo de interação é caracterizado pela baixa multiplicidade (poucas partículas), com secundários produzidos essencialmente na região frontal, e pela elasticidade média próxima à unidade. Essas peculiaridades na configuração das partículas secundárias

oriundas de interações difrativas evidenciam a importância desse tipo de colisão no desenvolvimento de chuveiros atmosféricos, justificando nosso interesse no seu estudo: a produção de secundários altamente energéticos na região frontal deve providenciar um mecanismo para transportar energia mais profundamente na atmosfera, influenciando drasticamente ambos perfis, lateral e longitudinal, dos chuveiros (CANAL et. al., 2004). Ainda assim, não dispõe-se na literatura de um estudo quantitativo desse impacto com os atuais modelos de física hadrônica.

Se, por um lado, espera-se que a difração de hadrons tenha papel preponderante no desenvolvimento de CAEs, por outro, no que concerne à modelagem dessas interações, encontra-se ambiguidades. Interações difrativas são caracterizadas como *interações macias*, dominadas pela baixa troca de momento, e, portanto, somente podem ser tratadas por modelos fenomenológicos, normalmente através de diferentes abordagens à teoria de campos efetiva conhecida como teoria de Regge (BARONE; PREDAZZI, 2002). Assim, é de suma importância suprir uma carência na literatura no que diz respeito ao estudo do impacto da física difrativa sobre Chuveiros Atmosféricos Extensos, considerando os modelos mais recentes para física hadrônica em energias de Raios Cósmicos.

É nessa direção que alinhavamos a nosso trabalho. Em uma primeira etapa, vamos estudar detalhadamente a produção partículas com os modelos QGSJET-II 04 c, EPOS LHC e Sibyll 2.1, considerando, em particular, a física difrativa. Logo após, estudaremos o impacto da difração sobre observáveis em simulações de CAEs utilizando os mesmos modelos. Por último, realizaremos uma extrapolação em diversas características dos modelos de interação com intuito de analisar a sensibilidade de diferentes observáveis em relação às características das colisões hadrônicas que se dão no desenvolvimento dos chuveiros. Uma descrição detalhada do modelo de extrapolação utilizado aqui pode ser encontrada em ENGEL; ULRICH; UNGER, 2011. Neste resumo incluímos alguns resultados ilustrativos do nosso estudo.

2. METODOLOGIA

Em uma primeira etapa, utilizamos um código escrito na linguagem Fortran junto com os geradores de evento QGSJET-II 04c, EPOS LHC e Sibyll 2.1 para analisar a produção de partículas nesses modelos em colisões próton-ar com energias (no referencial de laboratório) entre 100 GeV e 100 EeV. Nessa primeira etapa, realizamos 10^4 colisões para cada valor de energia, simulando, separadamente, amostras incluindo e excluindo interações difrativas. Logo após, empregamos o software CORSIKA para simular CAEs iniciados por prótons e núcleos de ferro a energias de 10^{17} eV e 10^{20} eV. Aqui, tomamos médias sobre amostras de 1000 chuveiros, separando novamente amostras incluindo e excluindo interações difrativas.

Para estudar a relação entre as características das interações hadrônicas e os observáveis de CAEs, empregamos o software CONEX (BERGMANN et. al., 2006), um programa híbrido que realiza interações de partículas através de geradores Monte Carlo para energias acima de um dado limiar e resolve equações de cascata para partículas menos energéticas. O código utilizado é o mesmo empregado em ENGEL; ULRICH; UNGER, 2011, porém com os modelos de interação atualizados. Com esse programa simulamos amostras de 1000 chuveiros para cada valor do parâmetro de extrapolação f_{19} .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por concisão, omitimos os resultados obtidos na comparação entre os modelos em relação à produção de secundários. Salientamos apenas que os modelos apresentam divergências que crescem com a energia. Em particular, as distribuições de elasticidade, o número médio de secundários produzidos e a fração de eventos difrativos diferem consideravelmente entre os modelos.

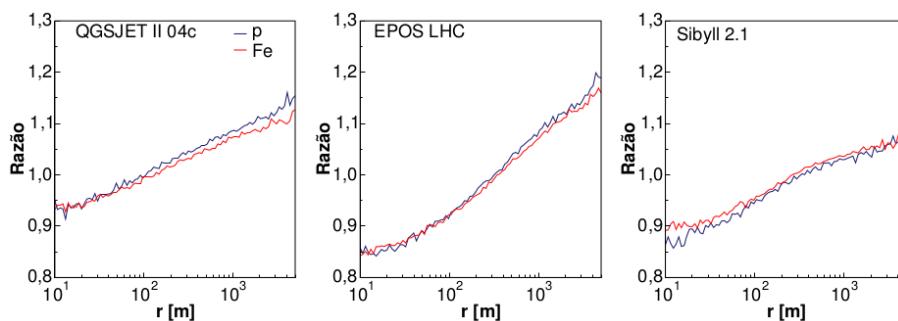
Quanto à influência da física difrativa sobre observáveis de CAEs, observamos que o maior impacto está para a componente muônica. Na Tabela 1 mostramos a mudança na profundidade de máximo dessa componente com a exclusão das interações difrativas para os três modelos considerados para chuveiros a 10^{20} eV. O que observamos é que as interações difrativas aumentam a profundidade de máximo em até 75 g/cm^2 para o caso do EPOS LHC. Com o modelo Sibyll 2.1, não observamos grande impacto da física difrativa.

Tabela 1 – Mudança na profundidade de máximo devido à exclusão da física difrativa em CAEs iniciados por prótons e núcleos de ferro a 10^{20} eV.

	QGSJET II 04c		EPOS LHC	Sibyll 2.1
$X_{max}^{\mu(normal)} - X_{max}^{\mu(ND)}$	p	Fe		
		50 g/cm^2	75 g/cm^2	35 g/cm^2
		55 g/cm^2	70 g/cm^2	40 g/cm^2

Na Figura 1 representamos a alteração na densidade de múons devido à exclusão da difração nas simulações. No eixo vertical representamos a razão $\rho_\mu^{(ND)}/\rho_\mu^{(normal)}$ entre a densidade média de múons nas simulações sem difração em relação às simulações com difração, como função da distância ao eixo central dos chuveiros. As curvas azuis (vermelhas) correspondem a chuveiros iniciados por prótons (núcleos de ferro). Nesses gráficos, vemos que a exclusão da difração acarreta em uma menor quantidade de múons na região próxima ao eixo, ao passo que aumenta a quantidade de múons a grandes distâncias do eixo, chegando a uma diferença de até 10% a 1 km do eixo.

Figura 1 – Razão média das densidades de múons entre as simulações excluindo e incluindo difração para chuveiros a 10^{20} eV.



Por último, com as extrapolações dos modelos de interação encontramos correlações entre observáveis de CAEs e propriedades dos secundários produzidos nas interações. Por exemplo, nesse estudo vemos que a quantidade de múons nos chuveiros é fortemente influenciada pela quantidade de píons carregados produzidos nas interações; ao passo que a profundidade de máximo dessa componente sofre maior influência da seção de choque total (o mesmo ocorre para a profundidade de máximo global dos chuveiros).

4. CONCLUSÕES

Com este trabalho, mostramos que a física difrativa tem um impacto não negligenciável na simulação de Chuveiros Atmosféricos Extensos. Em particular, vimos que o perfil longitudinal da componente muônica é fortemente alterado pela existência das interações difrativas. Como mostrado em AAB et. al., 2015, nenhum dos modelos atuais é capaz de predizer corretamente a quantidade de mûons em CAEs e, portanto, nossos resultados indicam que essa falha pode estar associada à modelagem das interações difrativas.

Nas extrapolações dos modelos de colisões hadrônicas, vimos que a componente muônica é fortemente influenciada pela produção de píons e, em menor escala, pela multiplicidade.

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.

BERGMANN, T; ENGEL, R; HECK, D; KALMYKOV, N; OSTAPCHENKO, S; PIEROG, T; THOUW, T; WERNER, K. One-dimensional hybrid approach to extensive air shower simulation. **Astroparticle Physics**, Estados Unidos, v. 26, p. 420-432, 2007.

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.

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.

ENGEL, R; ULRICH, R; UNGER, M. Hadronic Multiparticle Production at Ultra-High Energies and Extensive Air Showers. **Physical Review D**, Estados Unidos, v. 83, p. 1–21, 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.