

Resumo

A medida de raios cósmicos sempre foi de grande interesse tanto para a área de astrofísica quanto para a de física de partículas. O estudo de raios cósmicos ultra-energéticos ganhou novo destaque com o início das operações e tomada de dados do Observatório Pierre Auger situado na Argentina. A medida de raios cósmicos é feita através da detecção de chuviscos atmosféricos extensos gerados por partículas primárias que incidem na atmosfera terrestre. A reconstrução da informação de raios cósmicos a partir destes chuviscos depende da comparação com modelos que descrevem os detalhes do desenvolvimento das interações secundárias, os quais são influenciados pelos modelos de interação hadrônica. Atualmente, existem discrepâncias entre os resultados obtidos por diferentes modelos, pois estes são ajustados baseando-se em dados de aceleradores de partículas em energias mais baixas, e portanto, a extrapolação para energias mais altas varia significativamente de modelo para modelo. Neste trabalho, ao invés de aplicar os mesmos modelos utilizados pela comunidade de pesquisadores de raios cósmicos, utilizamos um novo modelo ajustado por dados experimentais mais atualizados de aceleradores. Os resultados da comparação entre os diferentes modelos de interação hadrônica e o impacto destes na avaliação do desenvolvimento de chuviscos de raios cósmicos serão apresentados e discutidos.

Introdução

Por quase um século, o entendimento de raios cósmicos de baixa a média energias vêm progredindo muito, porém os raios cósmicos com energias extremamente altas (energia $> 10^{18}$ eV) continuam misteriosos (nessa região de energia, o tipo e a origem dessas partículas são ainda desconhecidos). A solução dos mistérios envolvendo essas partículas pode aumentar a compreensão sobre os possíveis corpos celestes envolvidos em sua produção e até mesmo ampliar os horizontes da física de partículas para além do modelo padrão.

Além disso, raios cósmicos ultra-energéticos sofrem pouca deflexão pelos campos magnéticos galácticos, carregando, assim, a direção de sua origem; mas para tais valores de energia, os raios cósmicos devem ter origem próxima (de 50 a 100 Mpc), como é previsto pelo corte GZK.

Para uma análise bem sucedida dos dados experimentais, deve-se utilizar simuladores que representem o mais fielmente possível a realidade. Neste trabalho, estudamos as diferenças entre os diversos modelos de interação hadrônica no desenvolvimento de chuviscos atmosféricos extensos.

Resultados e Discussões

O objetivo específico deste trabalho foi comparar as diferenças nos resultados da evolução do chuvisco atmosférico devido à utilização de diferentes modelos de interação hadrônica. Mais especificamente, comparamos os resultados obtidos com os modelos QGSJet II e Sybill 2.1, que já são tradicionalmente utilizados pela comunidade de raios cósmicos, e os resultados obtidos aplicando-se o modelo Hijing, que é mais utilizado pela comunidade de física nuclear de altas energias de experimentos de aceleradores. A evolução do chuvisco (utilizando estes diferentes modelos) foi efetuada pelo método de Monte Carlo por um programa conhecido como Corsika.

- Análise da primeira interação: comparação entre os resultados de interações hadrônicas

A fim de avaliar as principais diferenças entre os modelos de interação hadrônica que são utilizados no simulador Corsika (modelos QGSJet e Sybill) e no Hijing, analisamos a multiplicidade média dos eventos gerados em cada simulador em função da energia do evento.

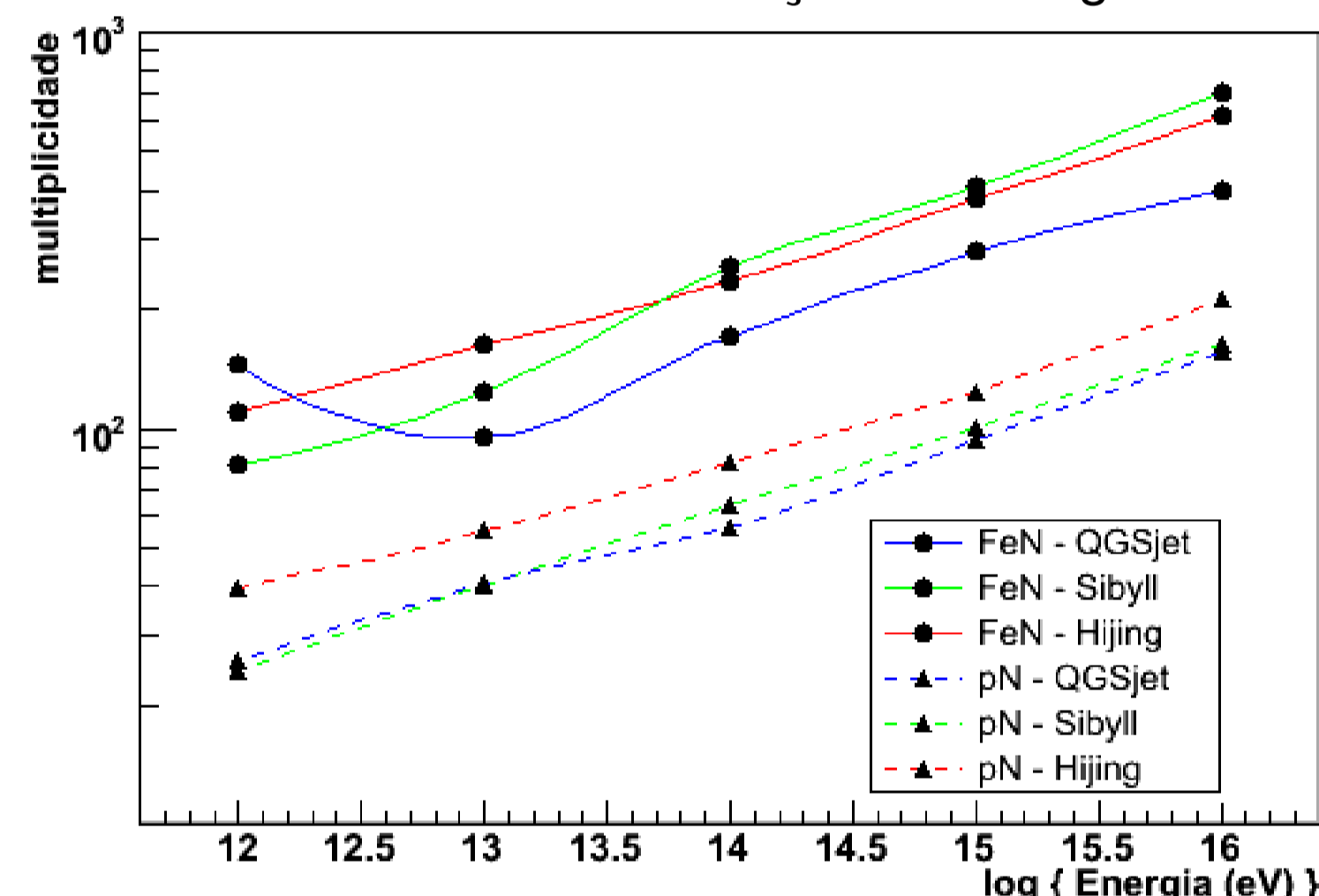


Figura 1: Multiplicidade total média de eventos gerados por diferentes modelos de interação hadrônica em função da energia das partículas primárias. Linha contínua: colisões entre ferro e nitrogênio. Linha pontilhada: colisões entre próton e nitrogênio.

Para uma análise mais completa da primeira interação entre núcleos pesados, deve-se estudar não só a multiplicidade média de eventos, mas também outros parâmetros, tais como os números de cada tipo de partícula produzidos em uma dada colisão.

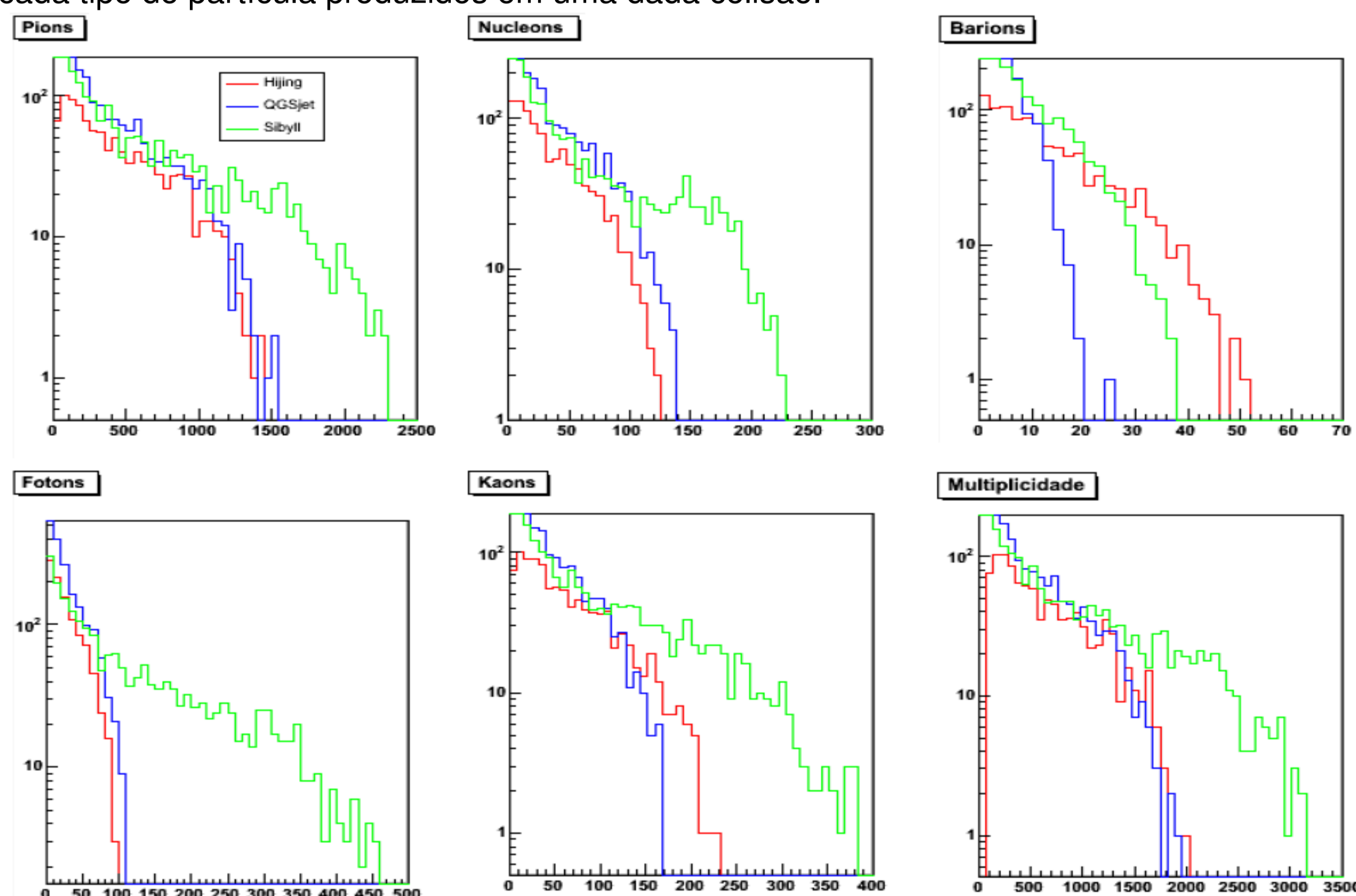


Figura 2: Distribuições das multiplicidades de diferentes partículas para uma colisão entre núcleos de ferro e nitrogênio com energia de 10^{16} eV.

Sabemos que o desenvolvimento de um chuvisco para um dado primário depende de dois fatores fundamentais: a seção de choque inelástica do primário e das partículas secundárias com os núcleos de ar, e a fração de energia transferida para as partículas secundárias (inelasticidade).

O modelo QGSJet tem maior inelasticidade, restando mais energia para as partículas secundárias que no modelo Sibyll; conseqüentemente, a multiplicidade é maior no QGSJet que no Sibyll.

Chuviscos gerados usando o modelo QGSJet desenvolvem-se mais cedo na atmosfera que os chuviscos Sibyll; porém, o Sibyll apresenta seção de choque inelástica maior, ou seja, menores caminhos de interação hadrônica, de tal forma que essas diferenças podem se compensar. Logo, chuviscos que viveram várias gerações, gerados tanto com QGSJet quanto com Sibyll, podem ter desenvolvimentos longitudinais semelhantes.

- Análise do perfil longitudinal do chuvisco atmosférico extenso

Buscando analisar a influência dos resultados da primeira interação hadrônica no desenvolvimento de um chuvisco, estudamos alguns parâmetros da forma da distribuição longitudinal como $X_{\text{máx}}$ (profundidade atmosférica onde o número de partículas do chuvisco é máximo), $N_{\text{máx}}$ (número de partículas em $X_{\text{máx}}$), sigma (largura do perfil), "kurtosis" (medida do "achatamento" do perfil), assimetria e "skewness" (medidas de assimetria do perfil).

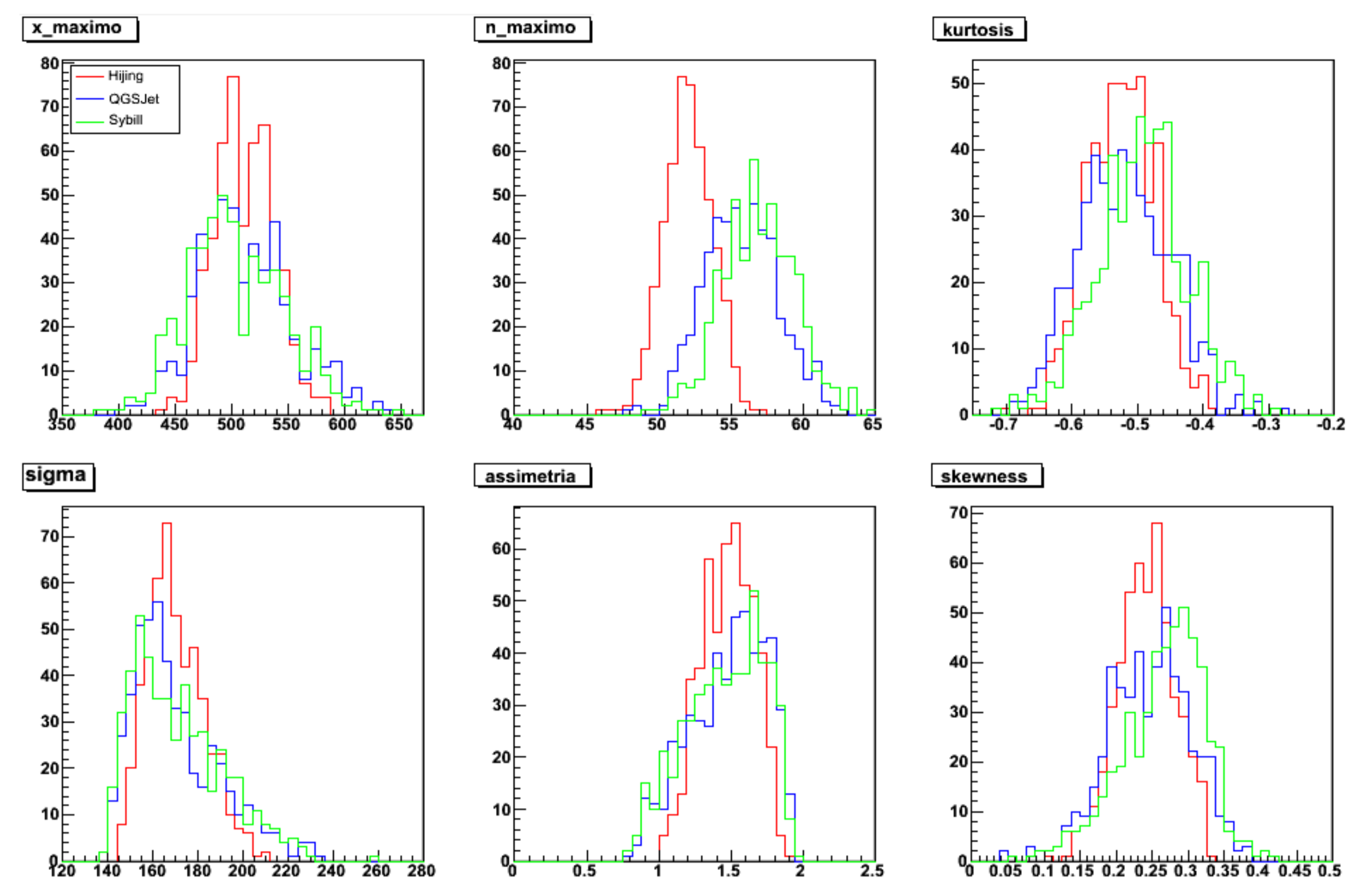


Figura 3: Histogramas dos parâmetros que caracterizam o desenvolvimento longitudinal de chuviscos atmosféricos extensos para colisões entre ferro e nitrogênio.

É possível notar (Figura 3), que a distribuição de $N_{\text{máx}}$ difere entre modelos e, com isso, podemos inferir que algumas partículas em particular deverão ter suas multiplicidades variando entre modelos, o que nos leva de volta à Figura 2, que confirma tal hipótese.

Além dos aspectos mais gerais de um chuvisco atmosférico, temos de analisar o número de múons, já que não há concordância com o perfil longitudinal de chuviscos atmosféricos e o número de múons medidos na superfície terrestre: as simulações não têm mostrado a mesma multiplicidade de múons detectados em experimentos. E, além disso, as maiores diferenças encontradas entre os modelos são os números de múons produzidos.

Sabemos que o número de múons detectados na superfície terrestre está relacionado com a energia da partícula primária que produziu o chuvisco atmosférico extenso, logo, podemos analisar o comportamento da curva do número de múons na superfície dividido pela energia do primário em função da energia do primário (Figura 4).

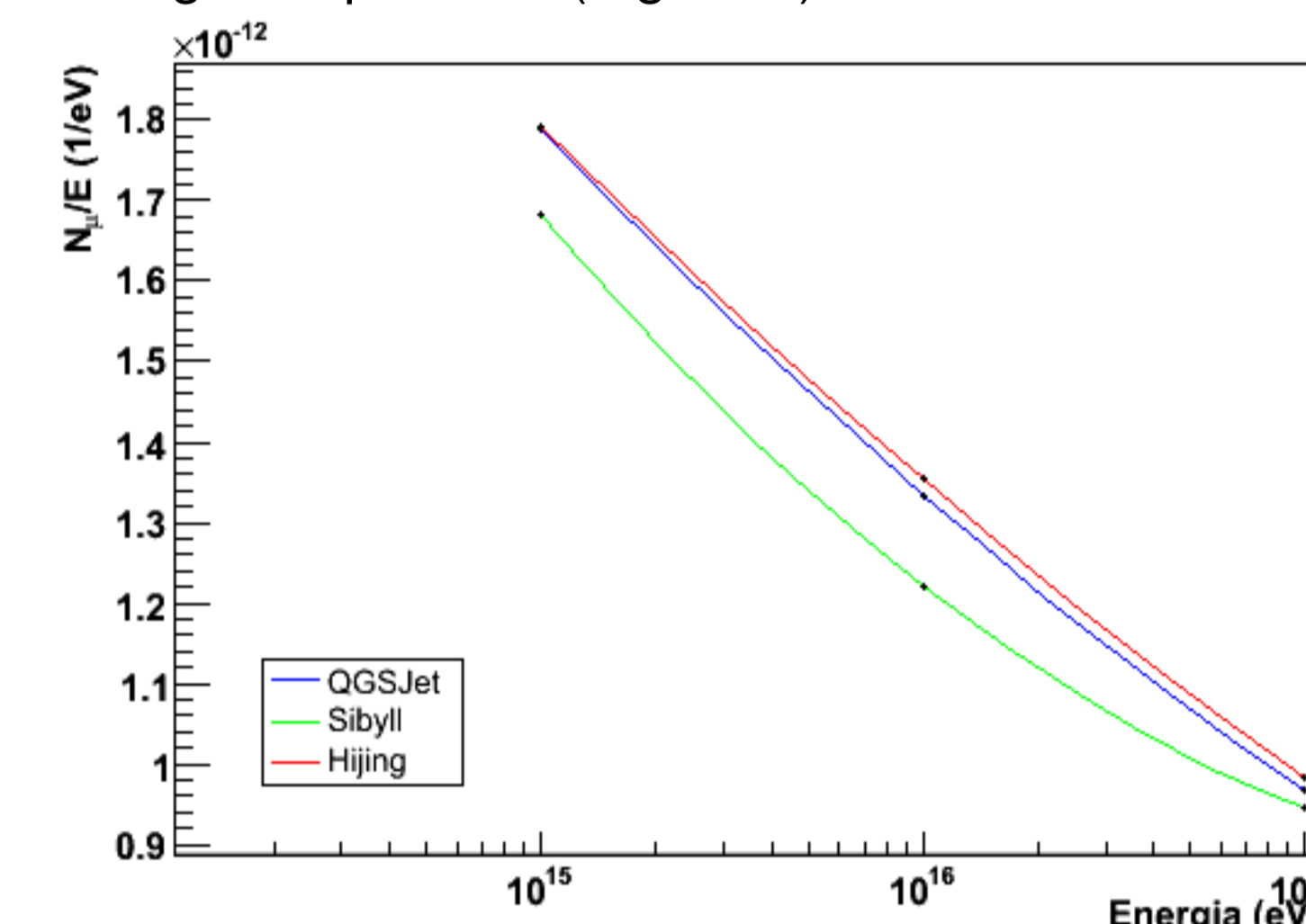


Figura 4: Número de múons detectados na superfície terrestre dividido pela energia da partícula primária em função da energia da partícula primária para os diferentes modelos de interação hadrônica.

Temos que o número de múons gerados por um chuvisco atmosférico em uma colisão de hádrons utilizando o modelo Hijing é maior que aquele dado pelo QGSJet.

Além disso, é interessante analisar a proporção entre as componentes hadrônica e eletromagnética do chuvisco. Para isso, avaliamos o número de múons detectados (componente hadrônica) dividido pelo número de elétrons produzidos (componente eletromagnética) em função da energia da partícula primária (Figura 5).

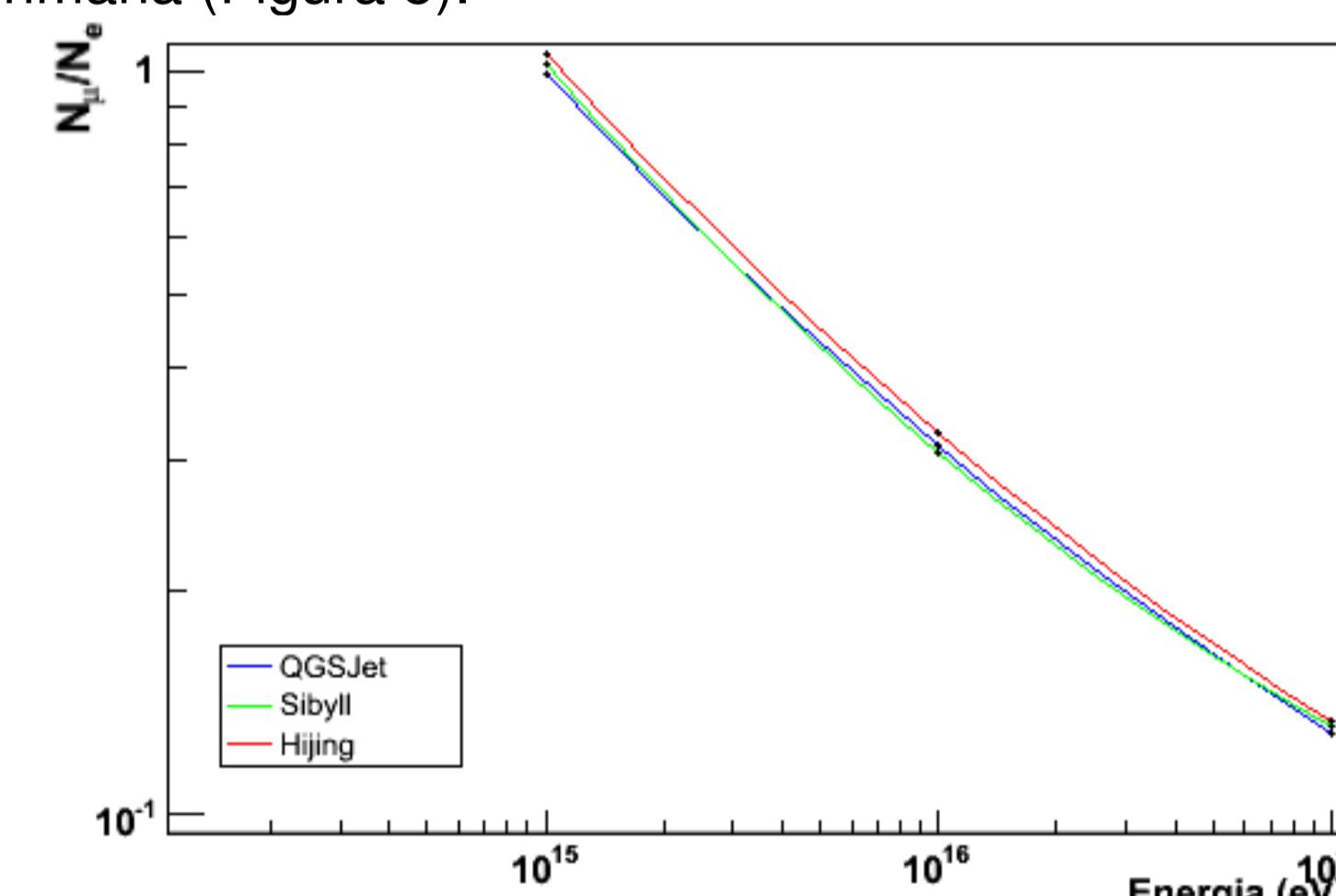


Figura 5: Número de múons detectados na superfície terrestre dividido pelo número de elétrons em função da energia da partícula primária para os diferentes modelos de interação hadrônica.

Conclusões

Da análise da primeira interação, podemos verificar consideráveis diferenças entre os modelos de interação hadrônica Hijing, QGSJet e Sibyll. O modelo Sibyll fornece valores de multiplicidade de diferentes partículas que se afastam consideravelmente daqueles do QGSJet e Hijing.

Se avaliarmos com mais detalhes as diferenças entre QGSJet e Hijing, percebemos que o número de bárions produzidos em uma interação realizada pelo Hijing é maior que pelo QGSJet (e maior também que o Sibyll), o que se deve, principalmente, a uma melhor descrição do fenômeno de produção de bárions-antibárions em interações hadrônicas pelo Hijing.

Com o aumento no número de bárions produzidos, temos uma diminuição no número de partículas da componente eletromagnética de um chuvisco atmosférico, ou seja, menor energia transferida para tal componente. Como os múons fazem parte da componente muônica de um chuvisco, quanto mais bárions e antibárions são produzidos na primeira interação entre a partícula primária e a atmosfera, mais múons são gerados.

Portanto, temos que simulações de chuviscos atmosféricos extensos realizadas utilizando-se o modelo de interação hadrônica Hijing ao invés dos modelos QGSJet e Sibyll resulta em um aumento no número de múons produzidos.

Com os resultados obtidos neste trabalho, fica claro que existe uma forte influência do modelo hadrônico no resultado da evolução do chuvisco atmosférico, tanto na primeira interação como também nos parâmetros finais do chuvisco.

Bibliografia

- D. Heck, J. Knapp, J.N. Capdevielle, G. Schatz, T. Thouw, "Corsika: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers"
- N.N. Kalmykova, S.S. Ostapchenko, A.I. Parlor, "Quark-Gluon-String Model and EAS Simulation Problems at Ultra-High Energies"
- <http://www.nsdth.lbl.gov/~xnwang/hijing.html>, "Hijing Monte Carlo Model"
- R. Engel, for the Pierre Auger Collaboration, "Test of hadronic interaction models with data from the Pierre Auger Observatory"
- C. Meurer, J. Bluemer, R. Engel, A. Haungs, M. Roth, "Muon production in extensive air showers and its relation to hadronic interactions"

Agradecimentos

Ao Pibic/CNPq e ao SAE/Unicamp pelo financiamento do projeto e ao IFGW pela infraestrutura necessária para seu desenvolvimento.