

Difração de hádrons e a componente muônica de chuviros atmosféricos extensos

Luan Arbeletche

Grupo de Altas e Médias Energias (GAME)
Programa de Pós-graduação em Física
Universidade Federal de Pelotas

1 de julho de 2016



1. Motivação
2. Raios Cósmicos
3. Modelando interações hadrônicas
4. Metodologia
5. Resultados
 - Perfis longitudinais
 - Distribuições laterais
 - Densidade de múons
6. Conclusões
7. Próximos passos

Motivação

- Resultados recentes de experimentos de raios cósmicos ultra energéticos mostram que alguns resultados dependem de modelos teóricos no que diz respeito às interações hadrônicas.
- Em particular, a falta de dados de aceleradores de partículas em relação à física difrativa gera incertezas no estudo de raios cósmicos que são difíceis de estimar.

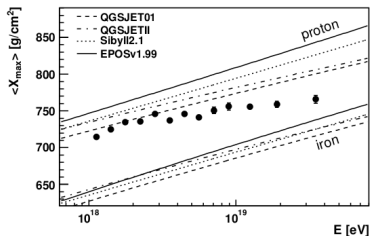


Figura 1: Os resultados do Auger indicam uma composição pesada para raios cósmicos ultraenergéticos. [arxiv:1002.0699v1]

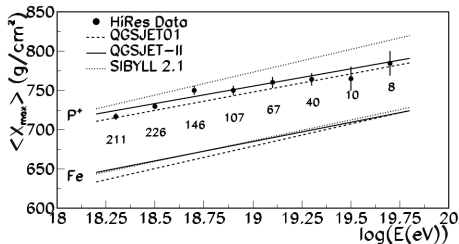


Figura 2: Contrapondo os resultados do Auger, o Telescope Array indica uma composição dominada por prótons para os raios cósmicos mais energéticos. [arxiv:0910.4184v2]

Por que estudamos os raios cósmicos?

Queremos entender a origem dos raios cósmicos mais energéticos (energias de até 10^{20} eV). Para tal, precisamos determinar:

- Composição ("*model dependent*")
- Espectro de energias
- Distribuição dos ângulos de incidência

"Multi-messenger astronomy"
Raios-X, Raios- γ , ν , RCs (prótons, íons, Fe, exóticos...)

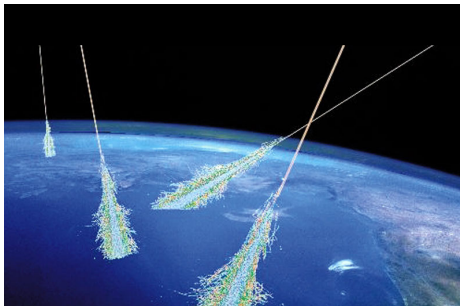


Figura 3: Raios Cósmicos altamente energéticos atingem a atmosfera terrestre e geram cascatas de partículas, conhecidas como Chuveiros Atmosféricos Extensos.

Chuveiros Atmosféricos Extensos

As cascatas de partículas geradas pelos raios cósmicos - CAEs - tem propriedades bem conhecidas.

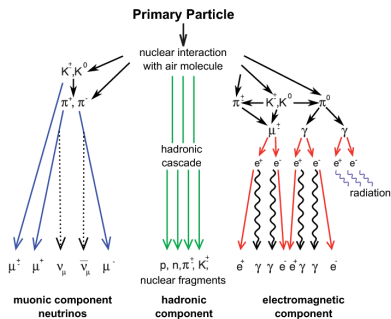


Figura 4: Um CAE possui distintas componentes geradas nas interações com a atmosfera.

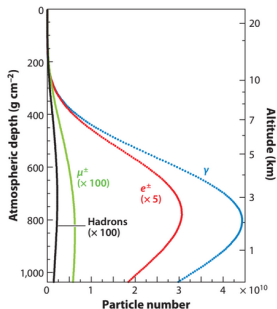


Figura 5: Perfil longitudinal de um CAE gerado por um próton a 10^{19} eV.

Detecção de CAEs

A detecção é feita, geralmente, pela combinação de técnicas.

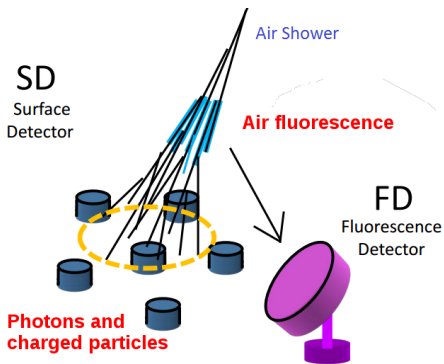


Figura 6: Detecção híbrida.

Observação no solo - SD

Energia do RC \leftrightarrow dens. de part. carregadas
Composição do RC \leftrightarrow densidade de múons

Detecção de fluorescência - FD

Energia do RC \leftrightarrow luminosidade integrada
Composição do RC \leftrightarrow posição X_{max}

Interpretação dos resultados

Depende da comparação com simulações.

Variáveis que afetam o desenvolvimento de CAEs

Usando a aproximação analítica de Heitler-Matthews:

$$X_{max}^{(A)} = \lambda_{ine} + X_0 \ln \left(\frac{E_0}{2\eta_{sec} \epsilon_c A} \right) \quad (1)$$

$$N_{\mu}^{(A)} = A^{1-\alpha} \left(\frac{E_0}{E_{dec}} \right), \quad \alpha = \frac{\ln \eta_{ch}^{\pi}}{\ln \eta_{tot}^{\pi}} < 1 \quad (2)$$

X_{max} e N_{μ} - determinam a composição - são extremamente sensíveis às características das interações hadrônicas que ocorrem na cascata.

$X_{max} \rightarrow$ seções de choque σ_{p-Ar} , $\sigma_{nucleo-Ar}$, multiplicidade $\eta_{sec} \dots$
 $\rho_{\mu} \rightarrow$ multiplicidade η_{sec} , produção de píons η_{tot}^{π} , $\eta_{ch}^{\pi} \dots$

Predizendo resultados

Descrição completa da cascata e seus observáveis.

É preciso modelar as **interações hadrônicas** e todas as suas características!

Interações hadrônicas

- Na QCD (teoria das interações fortes) os hádrons são estados ligados de quarks - partículas fundamentais.
- Os quarks interagem mediante a troca de glúons - bósons mediadores da interação forte.

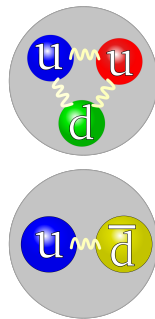
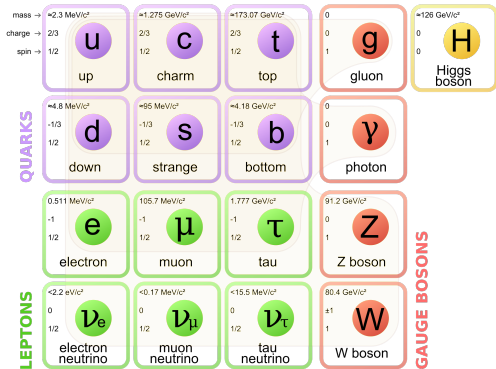


Figura 8: Quarks ligados formando um próton, acima, e um píon, abaixo. O píon se apresenta como o estado hadrônico mais leve.

Figura 7: Modelo padrão da física de partículas. São conhecidos 6 sabores distintos de quarks.

Um projétil P atinge um alvo (fixo no ref. de lab.) A , produzindo η_{sec} partículas secundárias (multiplicidade).

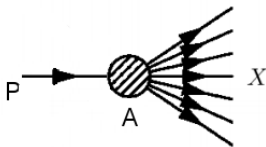


Figura 9: Uma colisão hadrônica genérica no referencial de laboratório.

Estrutura de uma interação hadrônica

- Distribuições de pártons no estado inicial
- Interação párton-párton
- Hadronização
- Decaimentos
- Múltiplas interações
- ...

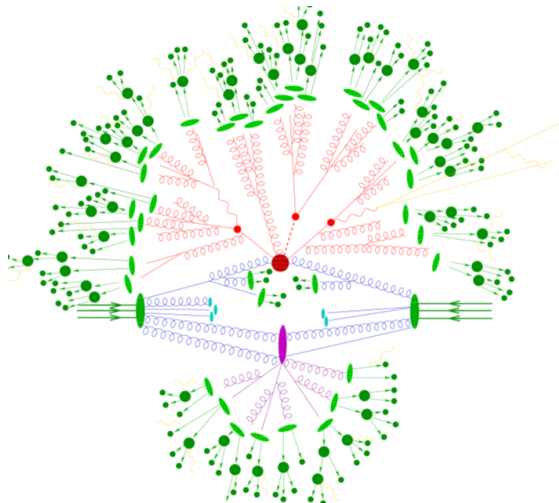


Figura 10: Uma colisão hadrônica genérica, em detalhes.

A QCD é falha em alguns aspectos. Por exemplo, a hadronização e as distribuições de pártons.

Além disso, indentificamos dois regimes de interações hadrônicas:

- *hard* (duro): interações com grande troca de momento. A constante de acoplamento é pequena e justifica um tratamento perturbativo através da QCD.
- *soft* (macio): interações com baixa troca de momento. Não é possível aplicar a QCD perturbativa.

Em geradores de evento, processos macios são tratados por modelos fenomenológicos. Nessa classe de processos, se encaixam as **interações difrativas**.

Interações difrativas compõem fração considerável da seção de choque pp :

$$\sigma_{tot} = \sigma_{ND} + \sigma_{el} + \sigma_{SD} + \sigma_{DD} + \sigma_{CD} \quad (3)$$

O estado final é caracterizado por:

- Produção de poucos secundários
- Alta elasticidade

$$f_L = \frac{E_{lead}}{E_0} \quad (4)$$

- A seção de choque decai exponencialmente com o momento trocado
- Uma das partículas (ou as duas) pode permanecer intacta

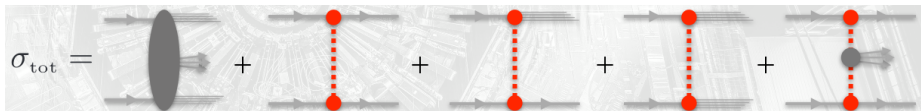


Figura 11: Soma das componentes da seção de choque pp .

São os pacotes de simulação de interações hadrônicas. Cada qual com um modelo subjacente.

- Distribuições de pártons no estado inicial (análises globais)
- Interação párton-párton (pQCD na parte hard e modelos fenomenológicos na parte soft)
- Hadronização (modelos fenomenológicos - fragmentação de cordas e recombinação)
- Decaimentos
- Múltiplas interações
- ...

Dados de aceleradores são fundamentais para ajustar os modelos. Daí, são feitas extrapolações com base na teoria subjacente à cada modelo.

Existem vários disponíveis para energias de raios cósmicos: QGSJET01, QGSTJET II, EPOS LHC, Sibyll 2.1, DPMJET, Venus, ...

CORSIKA - Simulador de chuueiros atmosféricos extensos:

- Realiza a propagação e interação de todas as partículas em um chuueiros.
- Alteramos a parte das interações hadrônicas para ativar ou desativar a geração de interações difrativas.

Geradores de evento - Utilizamos três:

- QGSJET II 04c - menor número de parâmetros
- EPOS LHC - mais detalhado
- Sibyll 2.1 - mais simplificado

Proposta - Comparamos simulações de chuueiros atmosféricos incluindo e excluindo difração. Como primários, utilizamos prótons e núcleos de ferro a energias de 10^{17} eV e 10^{20} eV.

Queremos analisar o impacto da inclusão da física difrativa sobre observáveis de CAEs, comparando os modelos de interações hadrônicas disponíveis.

Perfis longitudinais - primários a 10^{17} eV

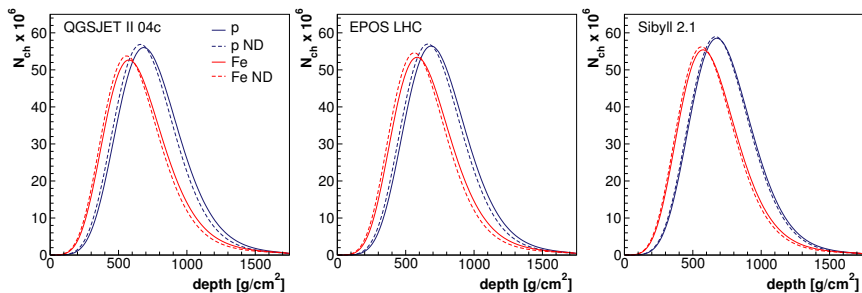


Figura 12: Número médio de partículas carregadas em função da profundidade atmosférica para primários com energia de 10^{17} eV. As curvas em azul (vermelho) são de chuviros iniciados por prótons (ferro). As curvas tracejadas representam amostras de chuviros que não incluem difração (ND).

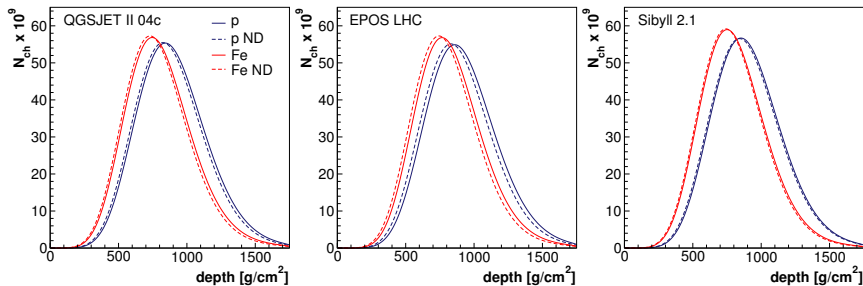


Figura 13: Número médio de partículas carregadas em função da profundidade atmosférica para primários com energia de 10^{20} eV. As curvas em azul (vermelho) são de chuviscos iniciados por prótons (ferro). As curvas tracejadas representam amostras de chuviscos que não incluem difração (ND).

Perfis longitudinais - componente muônica, primários a 10^{17} eV

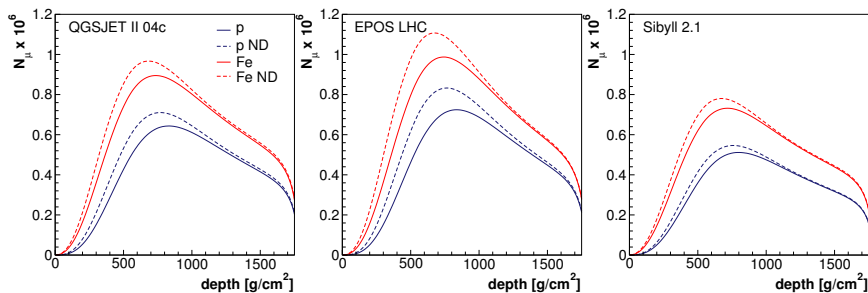


Figura 14: Número médio de múons em função da profundidade atmosférica para primários com energia de 10^{17} eV. As curvas em azul (vermelho) são de chuviscos iniciados por prótons (ferro). As curvas tracejadas representam amostras de chuviscos que não incluem difração (ND).

Perfis longitudinais - componente muônica, primários a 10^{20} eV

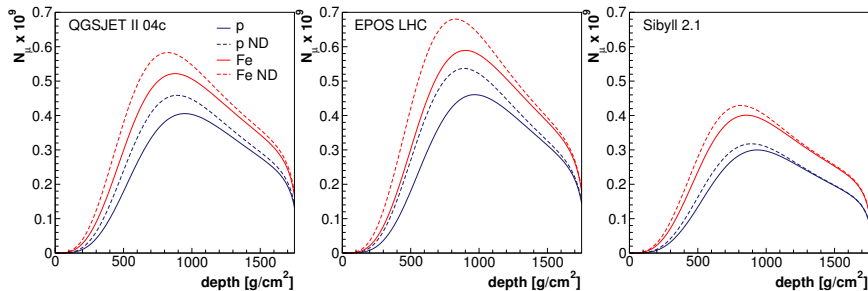


Figura 15: Número médio de múons em função da profundidade atmosférica para primários com energia de 10^{20} eV. As curvas em azul (vermelho) são de chuviscos iniciados por prótons (ferro). As curvas tracejadas representam amostras de chuviscos que não incluem difração (ND).

Distribuições laterais - próton a 10^{17} eV

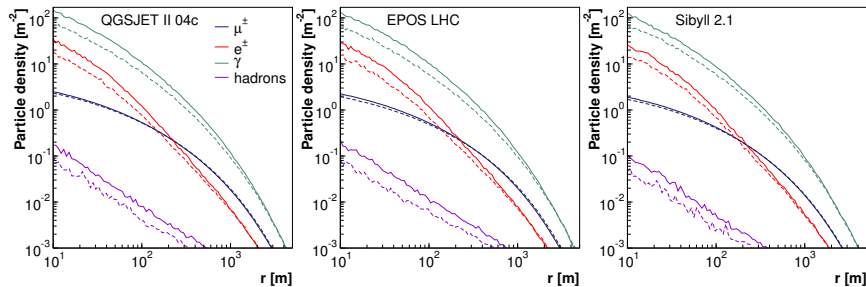


Figura 16: Densidade de diferentes espécies de partículas que atingiram o solo em função da distância ao eixo central de chuvers iniciados por prótons a 10^{17} eV. As curvas tracejadas representam amostras de chuvers que não incluem difração (ND).

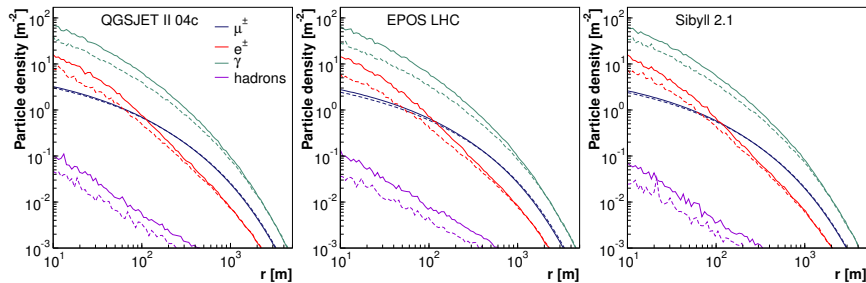


Figura 17: Densidade de diferentes espécies de partículas que atingiram o solo em função da distância ao eixo central de chuvas iniciados por núcleos de ferro a 10^{17} eV. As curvas tracejadas representam amostras de chuvas que não incluem difração (ND).

Distribuições laterais - próton a 10^{20} eV

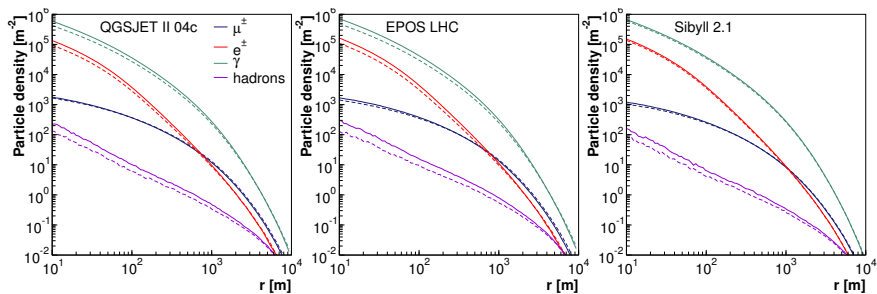


Figura 18: Densidade de diferentes espécies de partículas que atingiram o solo em função da distância ao eixo central de chuvers iniciados por prótons a 10^{20} eV. As curvas tracejadas representam amostras de chuvers que não incluem difração (ND).

Distribuições laterais - ferro a a 10^{20} eV

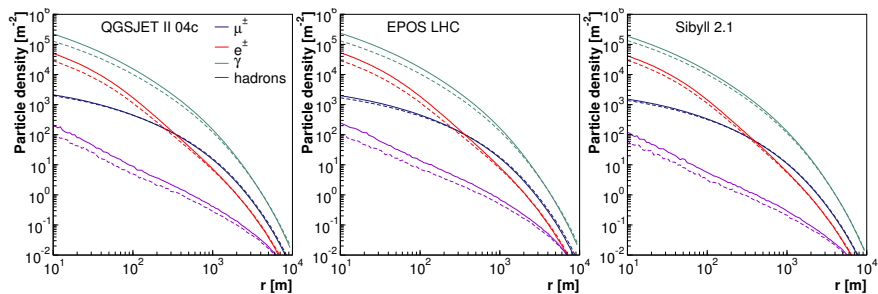


Figura 19: Densidade de diferentes espécies de partículas que atingiram o solo em função da distância ao eixo central de chuvers iniciados por núcleos de ferro a 10^{20} eV. As curvas tracejadas representam amostras de chuvers que não incluem difração (ND).

Distribuições laterais - variação da componente muônica a 10^{17} eV

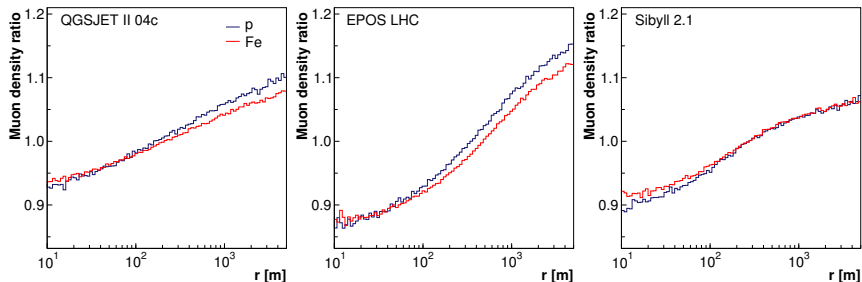


Figura 20: Razão $\rho_{\mu}^{(ND)} / \rho_{\mu}^{(normal)}$, da densidade de múons em chuviscos sem difração e chuviscos incluindo difração para energias de 10^{17} eV. As curvas em azul (vermelho) são de chuviscos iniciados por prótons (núcleos de ferro).

Distribuições laterais - variação da componente muônica a 10^{20} eV

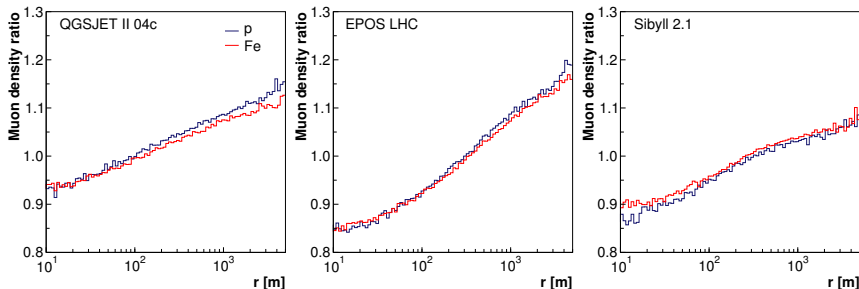


Figura 21: Razão $\rho_{\mu}^{(ND)} / \rho_{\mu}^{(normal)}$, da densidade de múons em chuviscos sem difração e chuviscos incluindo difração para energias de 10^{20} eV. As curvas em azul (vermelho) são de chuviscos iniciados por prótons (núcleos de ferro).

Conclusões I

- O valor de X_{max} diminui quando desligamos as interações difrativas nas simulações. Embora a alteração seja pequena, ela é relevante e mostra que a determinação da composição de raios cósmicos através dessa quantidade possui incertezas associadas à modelagem da física difrativa.
- O perfil da componente muônica sofre alterações ainda mais significativas. Lembrando os resultados das medidas de MPD no Auger:

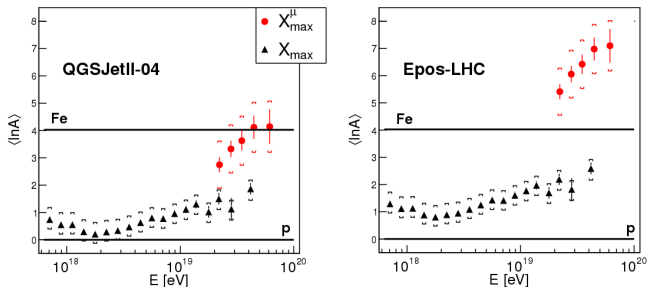


Figura 22: Média do logaritmo da massa de raios cósmicos primários como função da energia no laboratório Pierre Auger. Em vermelho estão os resultados obtidos pela técnica de reconstrução MPD e, em preto, os resultados das medidas de X_{max} nos telescópios de fluorescência. [arxiv:1407.5919]

Por outro lado, as interações difrativas tem impacto notável nas distribuições laterais de partículas dos chuveiros:

- A inclusão da difração aumenta o número de partículas na região próxima ao eixo dos chuveiros. Sendo assim, a modelagem da difração deve influenciar as medidas de energia no laboratório Pierre Auger $\rho(1000)$.
- A componente muônica dos chuveiros também sofre alterações. No nível de observação utilizado nas simulações, vimos que a alteração no número de múons nas simulações sem difração pode ser maior do que 10% em algumas regiões.
- Dos perfis longitudinais, vimos que a componente muônica sofre maior alteração próximo à profundidade de máximo. Assim, a densidade de múons no solo deve sofrer maior influência da física difrativa em chuveiros que incidem com menor ângulo zenital (nas simulações utilizamos 60°).

Próximas etapas deste trabalho:

- Aumentar da estatística de chuveiros
- Analisar distribuições laterais de chuveiros com ângulo zenital de 30°
- Estudo da alongação e do desvio RMS de X_{max}
- Extrapolação dos modelos

Próximas atividades

- Apresentação em São Paulo - PPC
- Seminário de 18 meses e pré-dissertação
- Apresentação no Encontro Nacional de Física



Grupo de Altas e Médias Energias GAME

