

# XXV REunião de Trabalho sobre Interações Hadrônicas RETINHA XXV



## Método de identificação da composição de massa do raio cósmico primário usando o sinal de tanques Cherenkov do Observatório Auger

Vanessa Menezes Theodoro  
José Augusto Chinellato (orientador)  
Márcio A. Muller (coorientador)

Trabalho de doutorado em  
andamento no IFGW/UNICAMP

# Sumário

- ✓ **Raios Cósmicos**
- ✓ **Chuveiros atmosféricos (Perfis Longitudinal e Lateral)**
- ✓ **Observatório Auger (Métodos de detecção, Detector de Superfície)**
- ✓ **Observáveis sensíveis a composição dos raios cósmicos**
  - **Profundidade  $X_{max}$**
  - **Estrutural sinal temporal dos chuveiros**
- ✓ **Modelos de Interações hadrônicas e raios cósmicos altas energias**
- ✓ **Considerações finais**

# Raios C3smicos

## Composi7o de massa dos RCs

- "Knee"
- "Ankle"
- Distin7o diversas teorias e modelos.

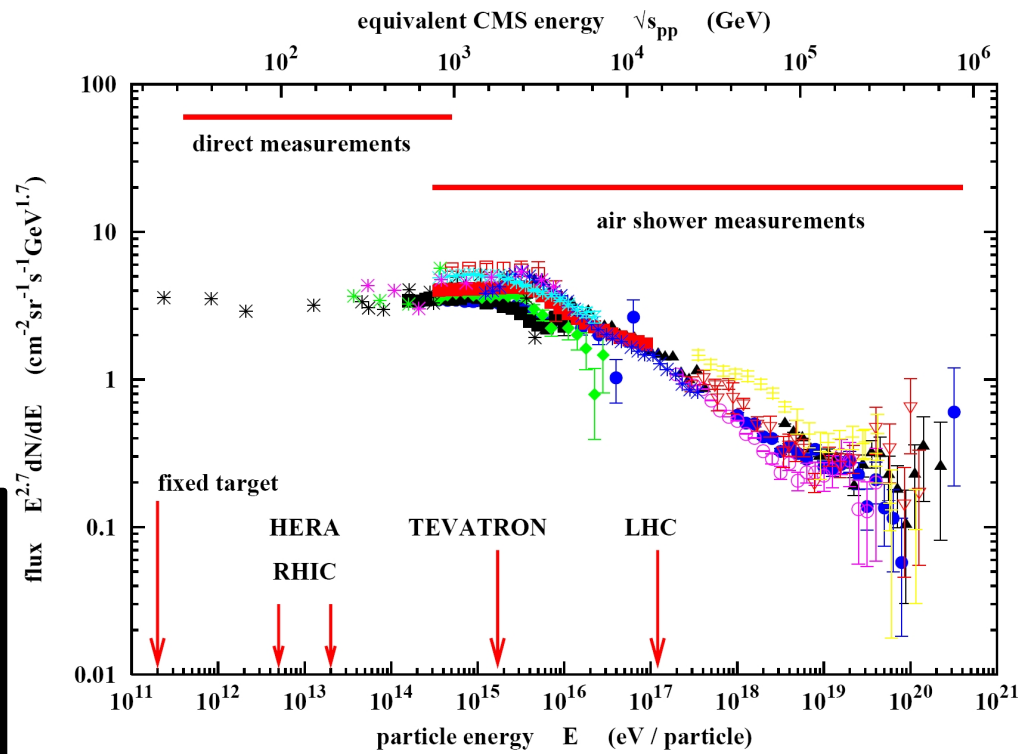
- Origem
- Mecanismos de acelera7o
- Propaga7o

$E < 10^{14}$  eV – composi7o dos raios c3smicos medida direta – Bal3es e sat3elites na estratosfera .

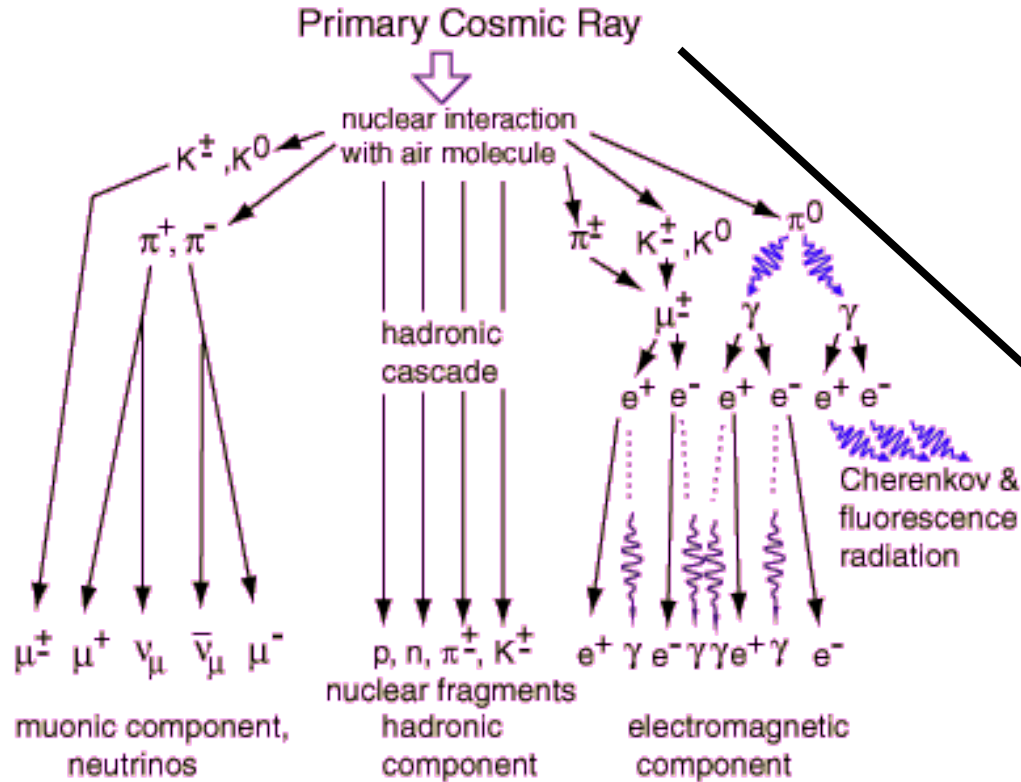
$E > 10^{15}$  eV – medidas indiretas de energia e composi7o. Estudo dos chuveis atmosf3ericos.

Massa do raio c3smico prim3rio - compara7es de observ3veis experimentais com simula7es de CAEs (envolvendo incertezas das intera7es hadr3nicas para altas energias).

**Dados do LHC/CERN – Modelos de intera7o para raios c3smicos de  $\sim 10^{17}$  eV com extrapola7es para energias de CAEs de  $10^{20}$  eV.**



# Chuveiros Atmosféricos Extensos



Energia  
Massa

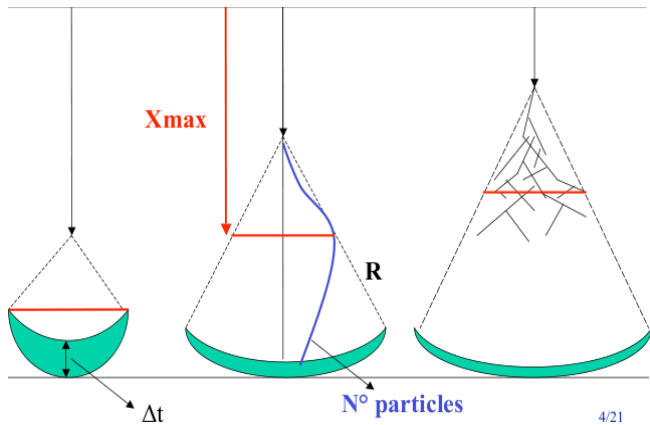
- Desenvolvimento longitudinal do chuveiro
- Razão das componentes muônica e eletromagnética no solo

# Perfil Longitudinal

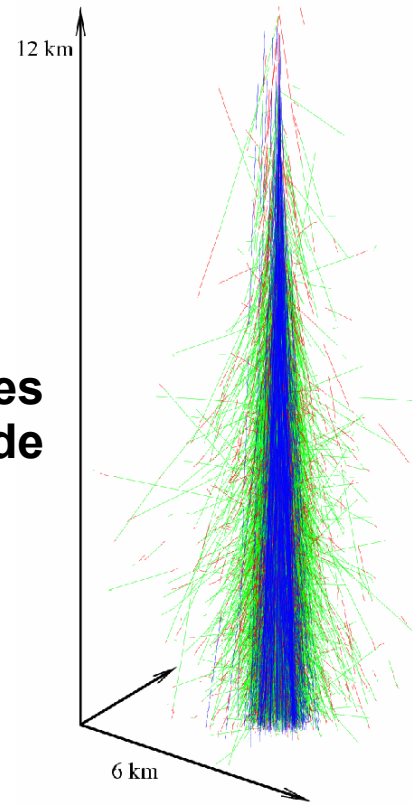
A profundidade  $X_{max}$  depende da energia e composição do raio cósmico primário

$$\langle X_{max} \rangle = \alpha (\ln E - \ln A) + \beta,$$

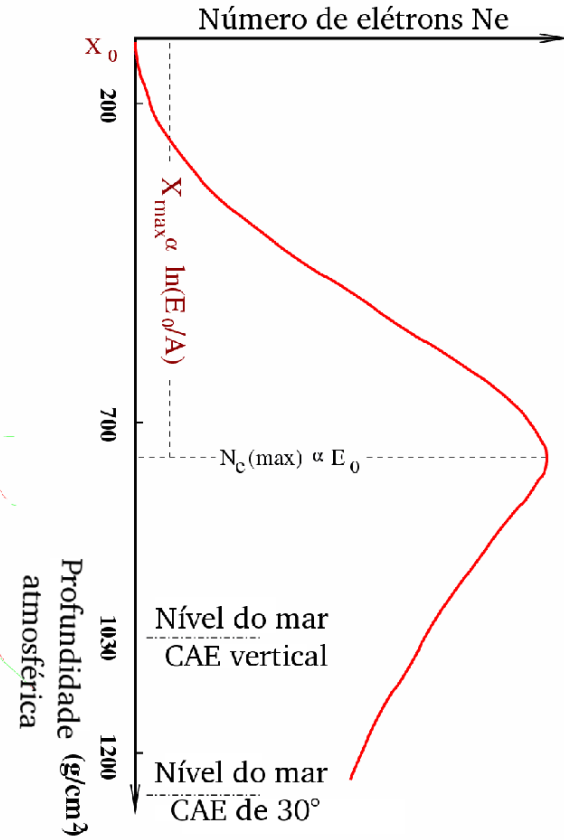
Dependem dos modelos de interações hadrônicas (secção de choque, multiplicidade e elasticidade)



Primários mais pesados



Menor  $X_{max}$

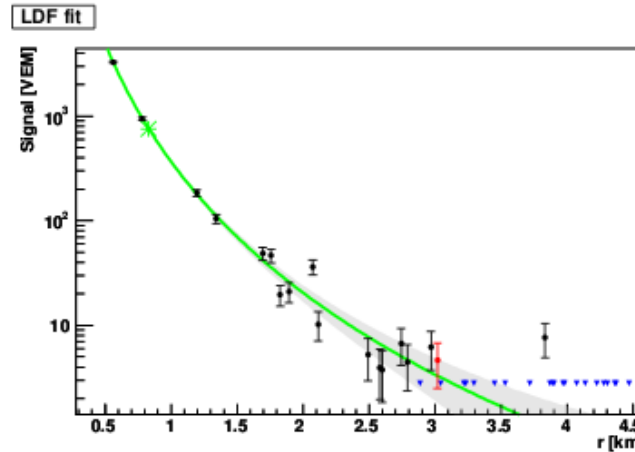
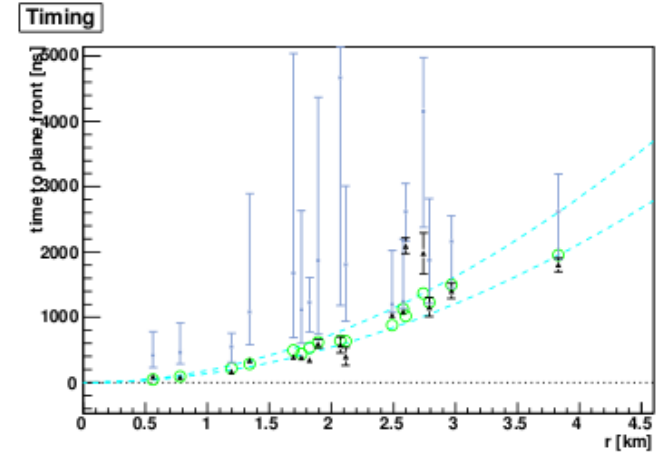
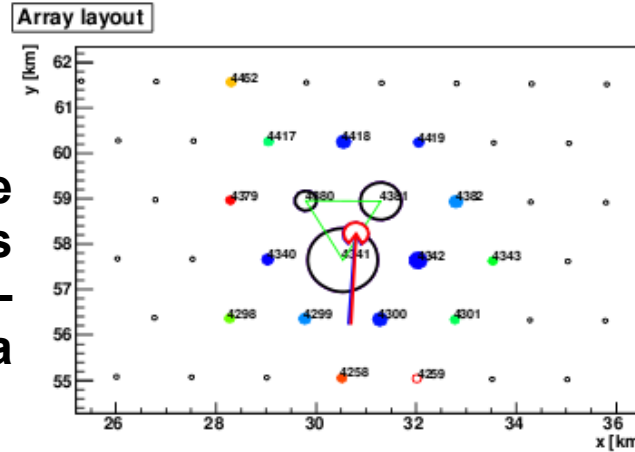


# Perfil Lateral

LDF – Função NKG modificada

$$S(r) = S(\dots) \left( \frac{r}{\dots} \right)^\beta \left( \frac{r + \dots}{\dots} \right)^\beta$$

$S(1000)$  – Interpolação de dos sinais nos tanques obtido para cada evento-  
Correlacionado com a energia do chuveiro.



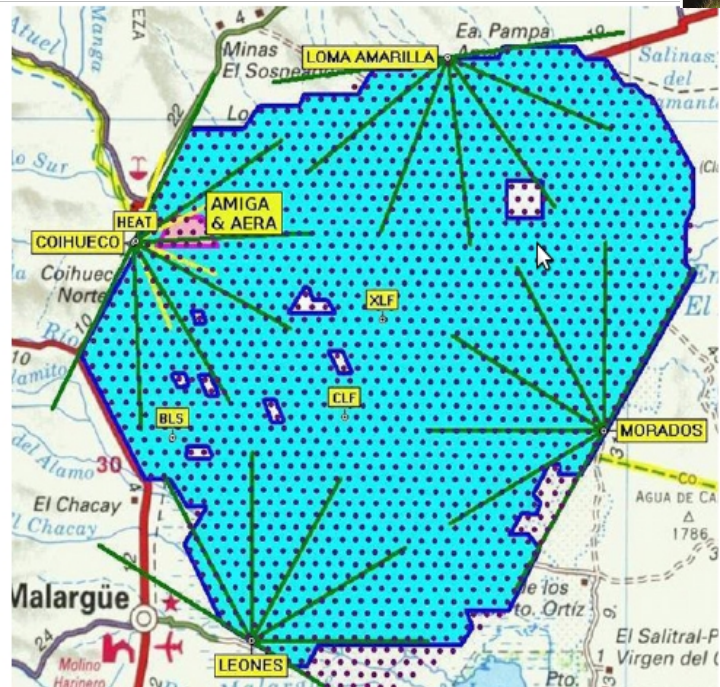
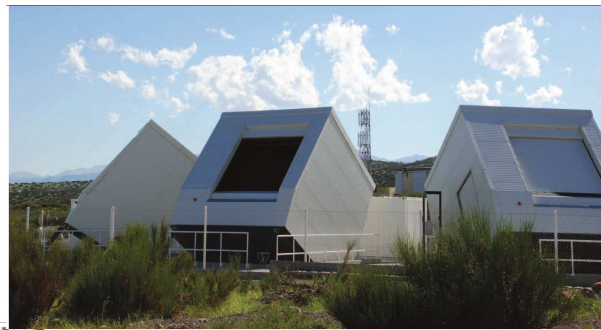
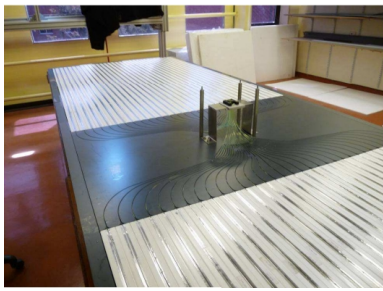
```

Event: Library_Test:Run_201:Shower_1:Use_1
Time: 04:33:12 01 JAN 2004
GPS Time: 756966805 s, 500000000 ns
T4: 3TOT+4C1 T5: Prior+Posterior
Reconstruction stage: 4.5
Easting: 470390.26 ± 11.3 (MC: 470377.42) [m]
Northing: 6118400.47 ± 8.21 (MC: 6118392.7) [m]
Distance to MC core: 22.081 [m]
θ: 30.27 ± 0.14 (MC: 29.46) [°] φ: -92.903 ± 0.25 (MC: -94.013) [°]
Rc: 10.62 ± 0.24 [km]
S1000: 367.4 ± 5.5 (±18 sys) [VEM] ropt: 831.04 [m]
β: -2.498 ± 0 (±0.15 sys)
Energy: 79.84 ± 1.3 (MC: 100) [EeV]
    
```

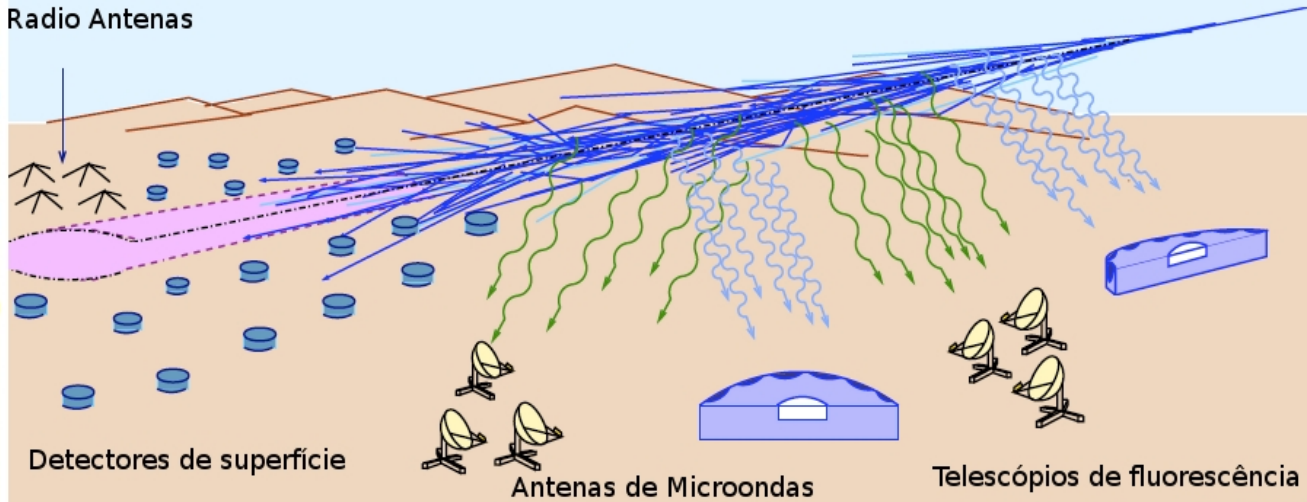
$\beta$  – Inclinação da LDF – Dependência com a inclinação do chuveiro e energia.

# Observatório Pierre Auger

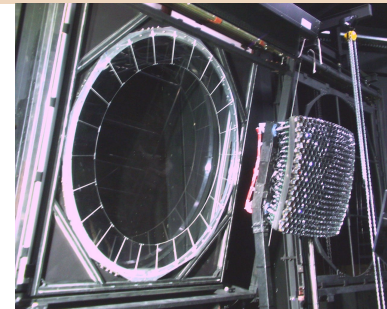




Radio Antenas



- FD, SD, AMIGA, AMBER, MIDAS e AERA.





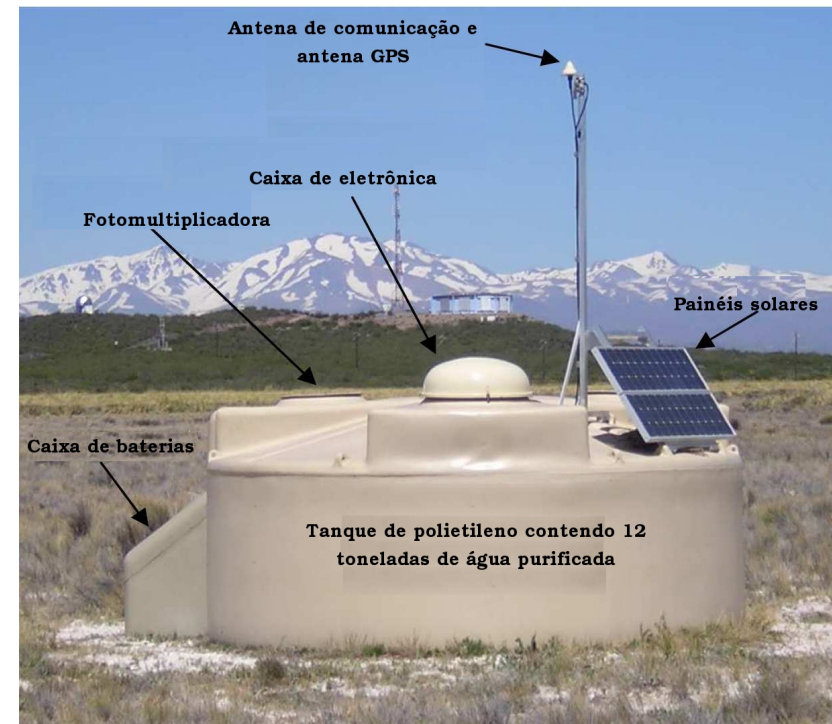
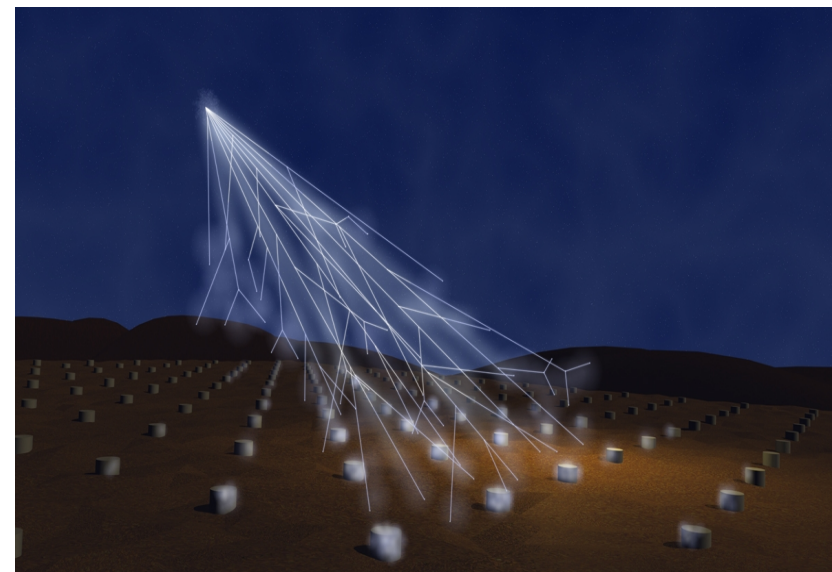
# Detector de Superfície

- Rede com mais de 1660 tanques Cherenkov cobrindo 3000 km<sup>2</sup>.
- Sistema de calibração e seleção de eventos (triggers de sinal e tempo).
- Unidade de sinal depositado VEM (*Vertical Equivalent Muon*).

Depósito de energia

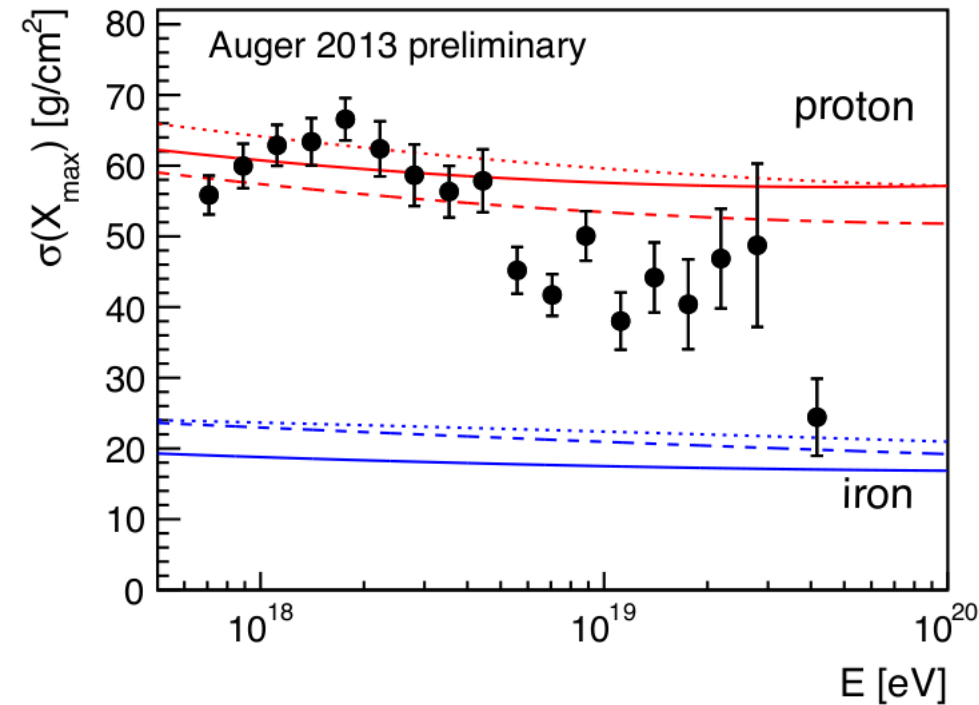
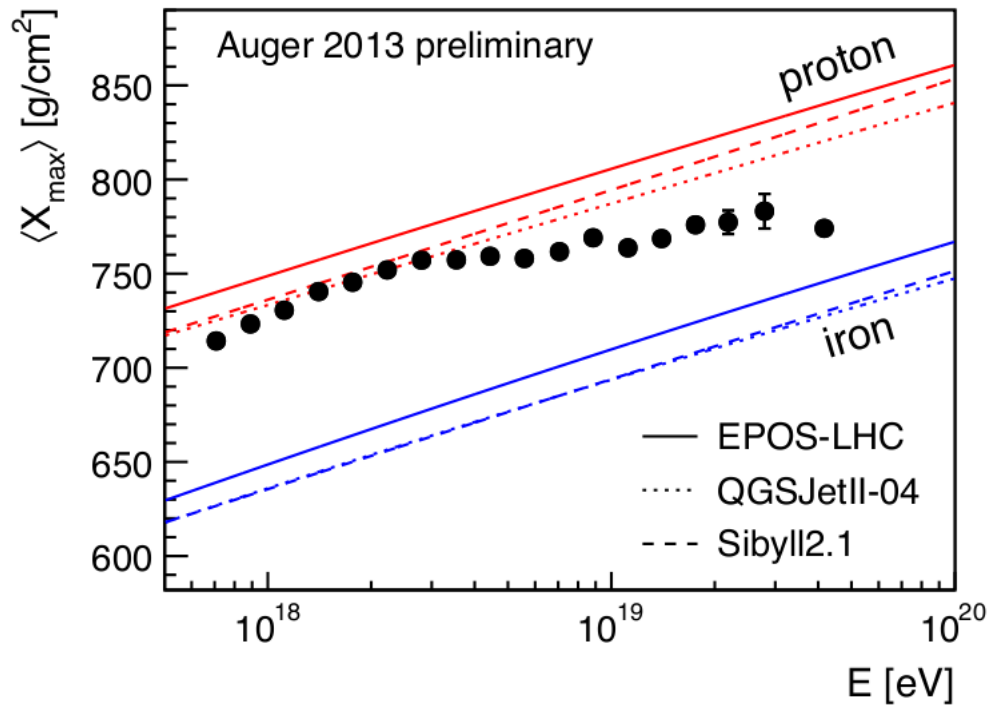
Comp. muônica – ionização

Comp. Eletromagnética – criação de pares, ionização e Bremsstrahlung.



# Observáveis

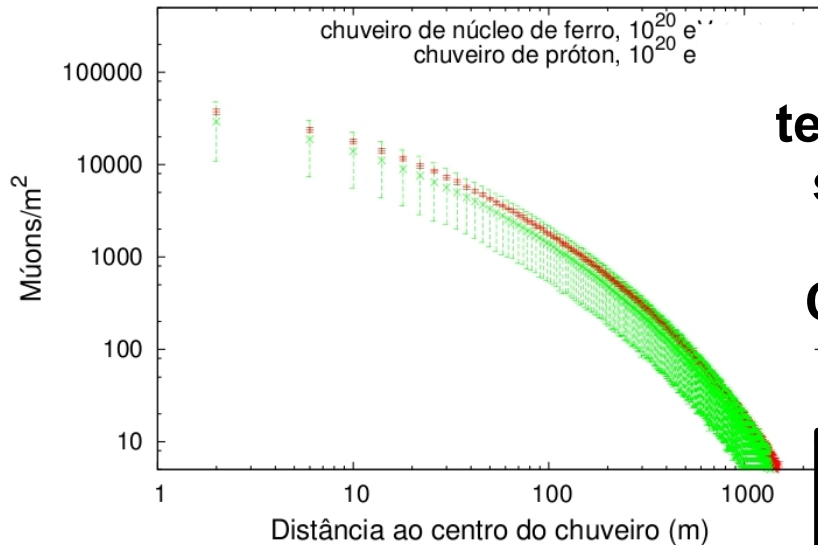
## Profundidade do máximo desenvolvimento longitudinal do CAE



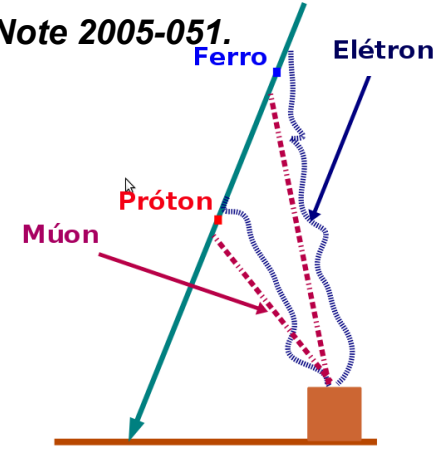
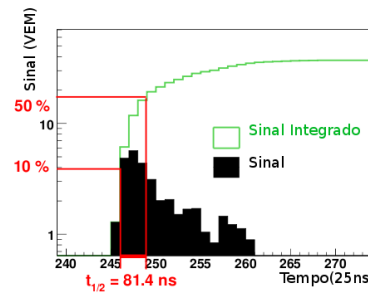
Kampert, Karl-Heinz for the Auger collaboration) arXiv:1207.4823 [astro-ph.HE] - ICRC 2013

## Taxa de alongação e a flutuação do Xmax

- Dados coletados pelo FD- Parâmetro sensível a composição de massa

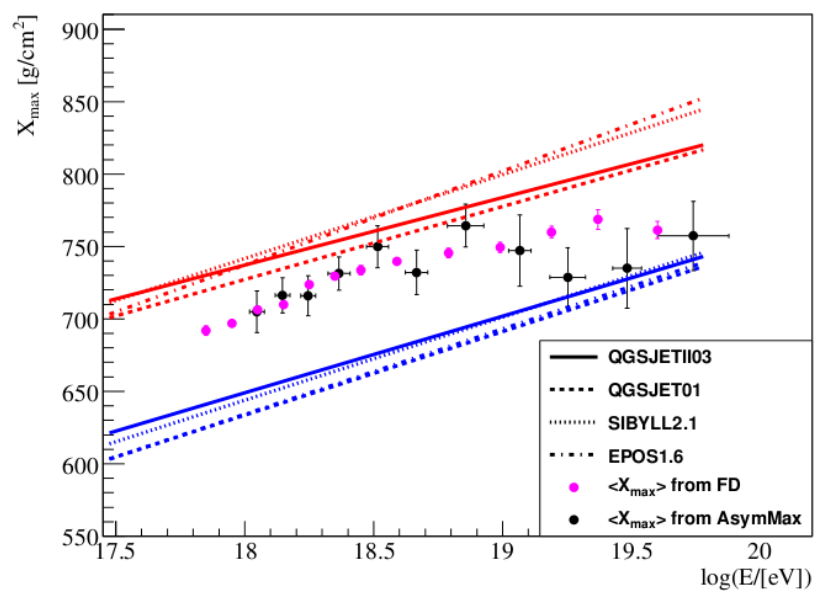


## Estrutura temporal dos sinais nos tanques Cherenkov



Rise Time  $t_{1/2}$  - tempo do sinal integrado aumentar de 10% a 50% do sinal total.

Profundidade  $X_{max}$  e razão entre as componentes.



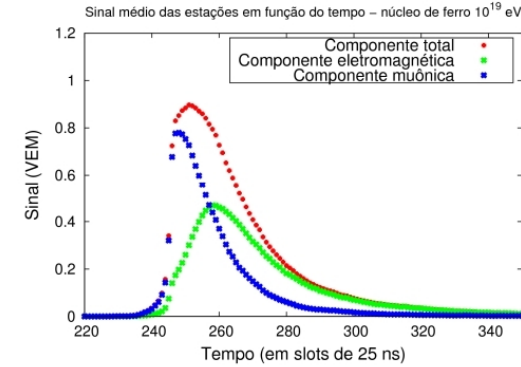
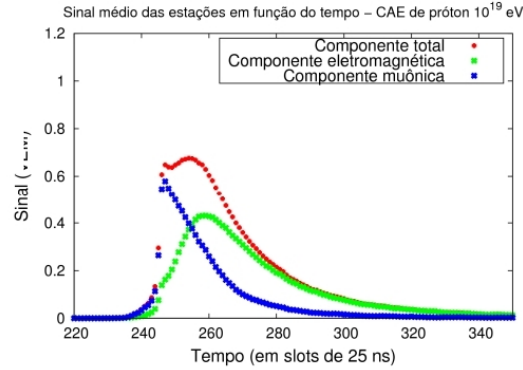
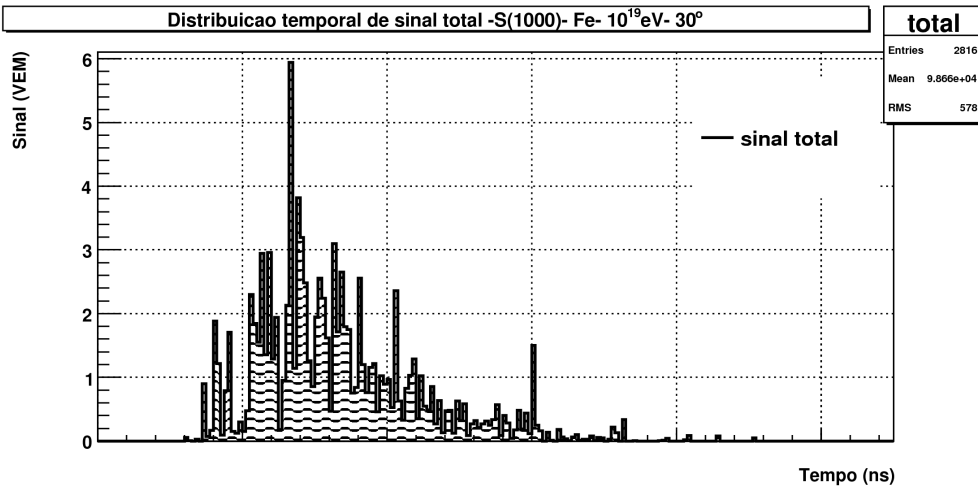
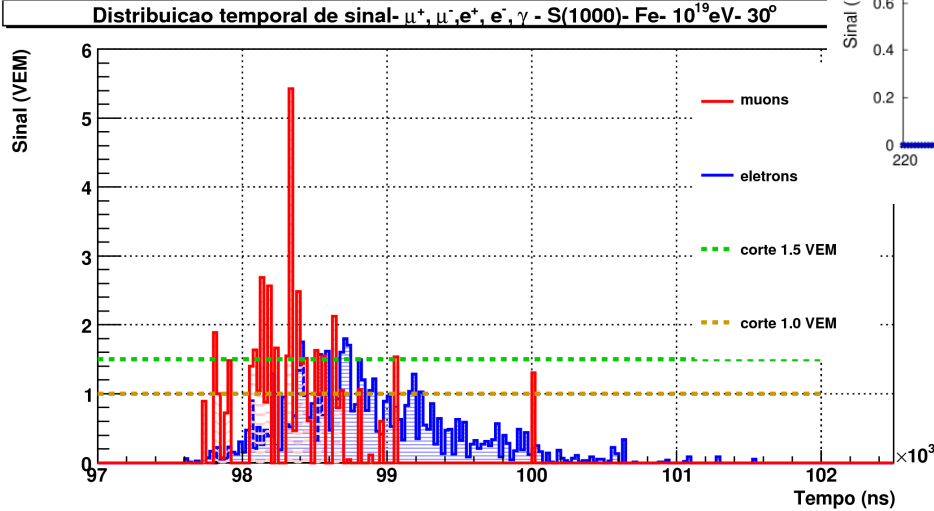
Comparação com chuveiros simulados segundo diferentes modelos de interações hadrônica (número de múons).

Assimetria azimutal de  $t_{1/2}$  - fortemente correlacionado com a composição do primário.

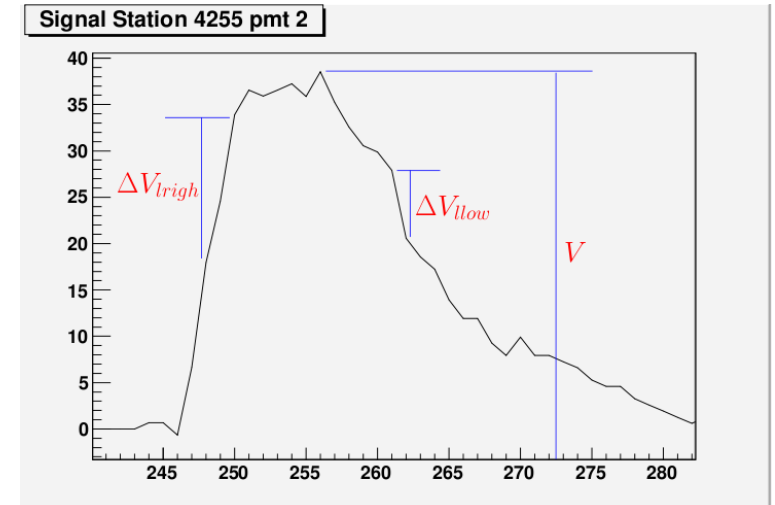
# Muon Jump

X.Garrido. Auger Technical Note, GAP Note 2007-060.

## Conteúdo muônico sensível a composição de massa dos RCs.



Picos de múons acima de um contínuo sinal eletromagnético- Explora a estrutura das derivadas dos sinais



# Estimando os sinal de múons

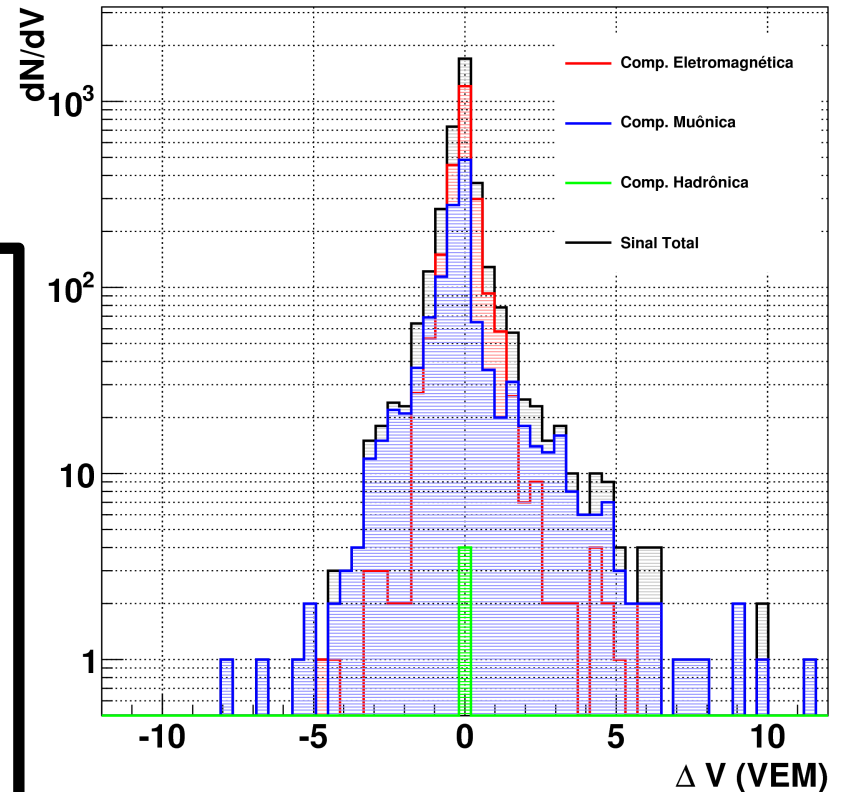
## Método de filtros baseado no múon Jump

$$\Delta V(i) = V(t_{i+1}) - V(t_i)$$

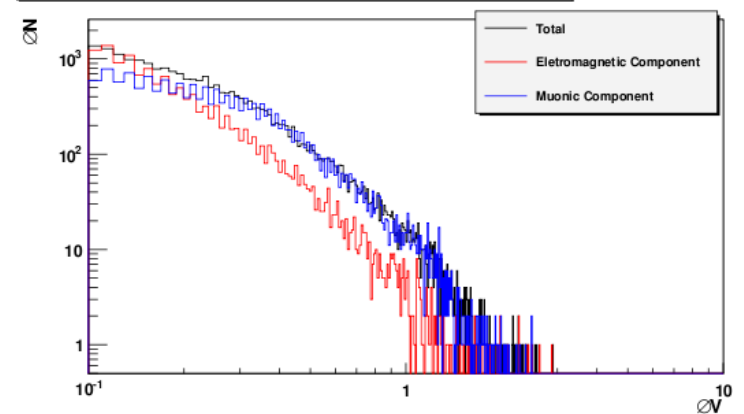
$$J_{\text{signal}} = \sum V(i) \left[ \Theta(\Delta V_i > V_l^+) + \Theta(\Delta V < V_l^-) \right] + \sum V(i) \Theta(V_l^- < \Delta V_i < V_l^+) \Theta(V(t_i) > V_s)$$

**Conjunto de filtros dependentes de E, r,  $\theta$  e modelo de interação hadrônica**

$$(V_l^+, V_l^-, V_s)$$



Sinal das estações entre 800 e 1600 m - CAE de ferro 1019



# Modelos de Interações Hadrônicas

Simulações de interações hadrônicas

Parâmetros ajustáveis fitados a dados

Compreensão das medidas e interpretação dos dados dos experimentos de RCs

QDC perturbativa + Modelos fenomenológicos MC

DMJET, QGSJET(I, II), SIBYLL, EPOS

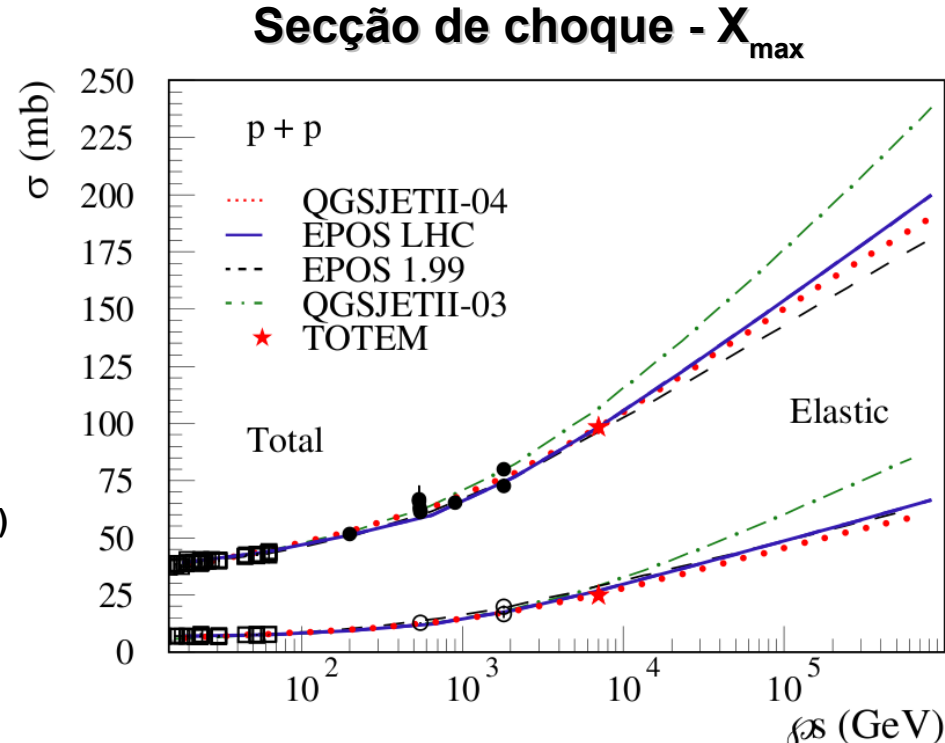
Observáveis dos chuvereiros

- Secção de choque
- Multiplicidade
- Produção de bárions

## QGSJET II-04 e EPOS LHC (pQCD, Regge, string frag.)

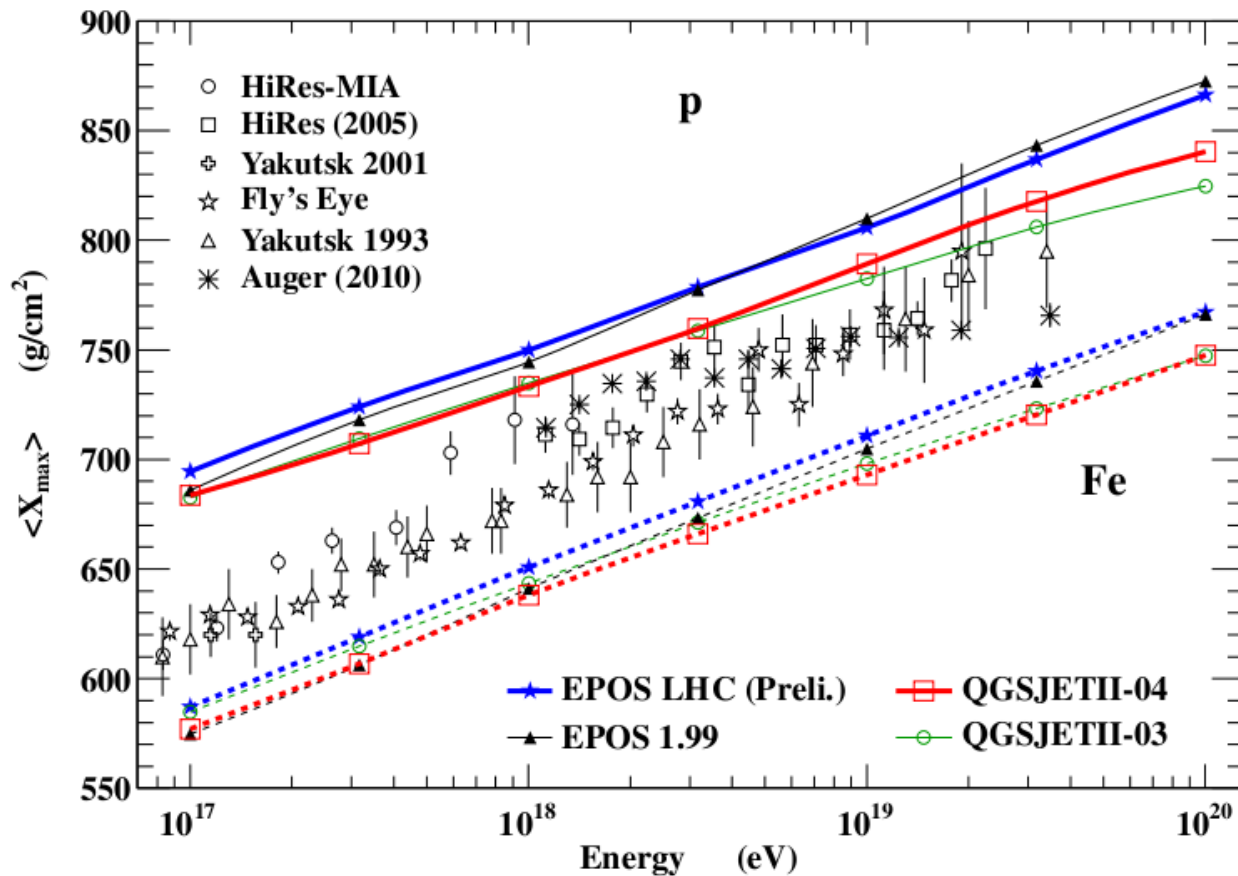
- Reprodução da secção de choque TOTEM
- Dados LHC a 7 TeV

$$X_{max}(E_0) \propto \lambda_h + \lambda_e \cdot \ln \left( \frac{E_0}{n_{tot} E_c} \right)$$



Tanguy Pierog. *J. Phys.: Conf. Ser.* 409, 012008 (2013).

## Estudo da composição dos raios cósmicos primário



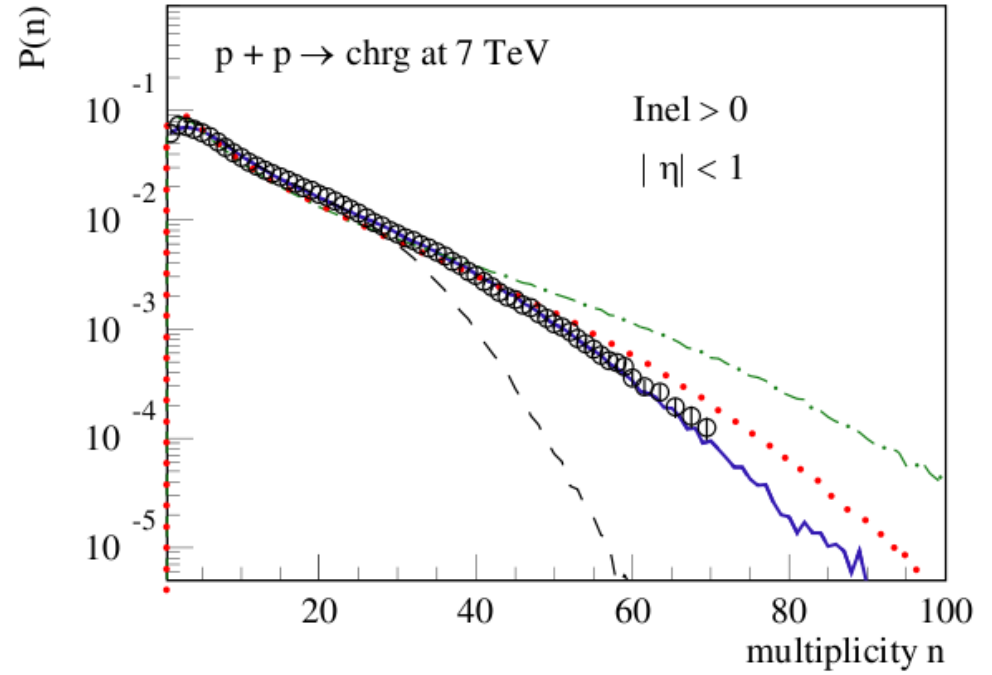
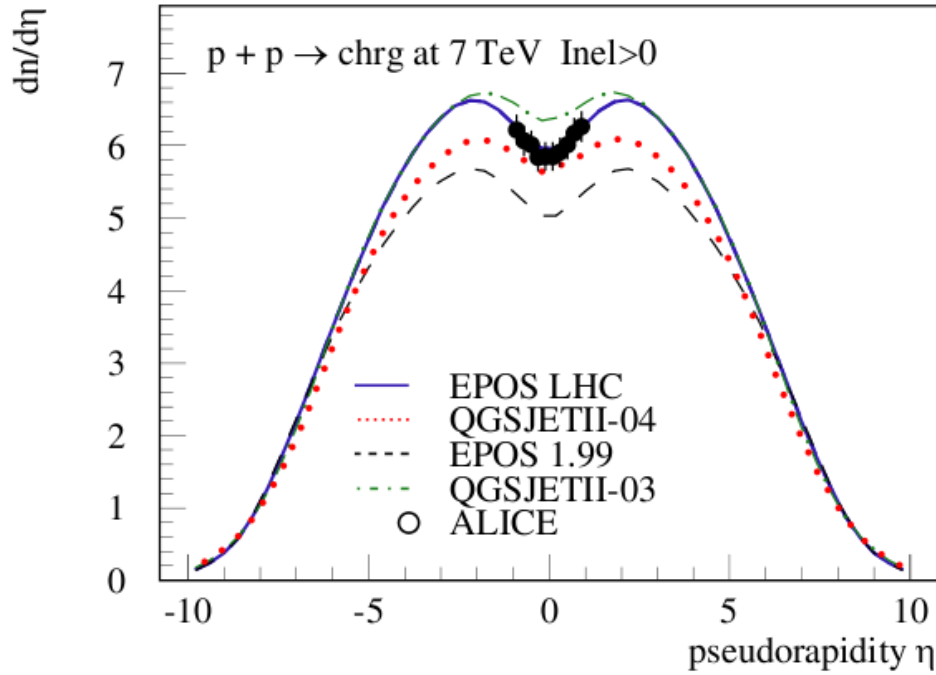
$X_{\max}$  - Diferença de  $20\text{g}/\text{cm}^2$  (na faixa dos erros sistemáticos do OPA) entre as novas versões dos modelos contrasta com diferenças de até  $50\text{g}/\text{cm}^2$  das versões anteriores .

Tanguy Pierog. J. Phys.: Conf. Ser. 409, 012008 (2013).

Modelos convergindo para semelhantes taxa de alongação



maior precisão nas mudanças na composição da "ankle"

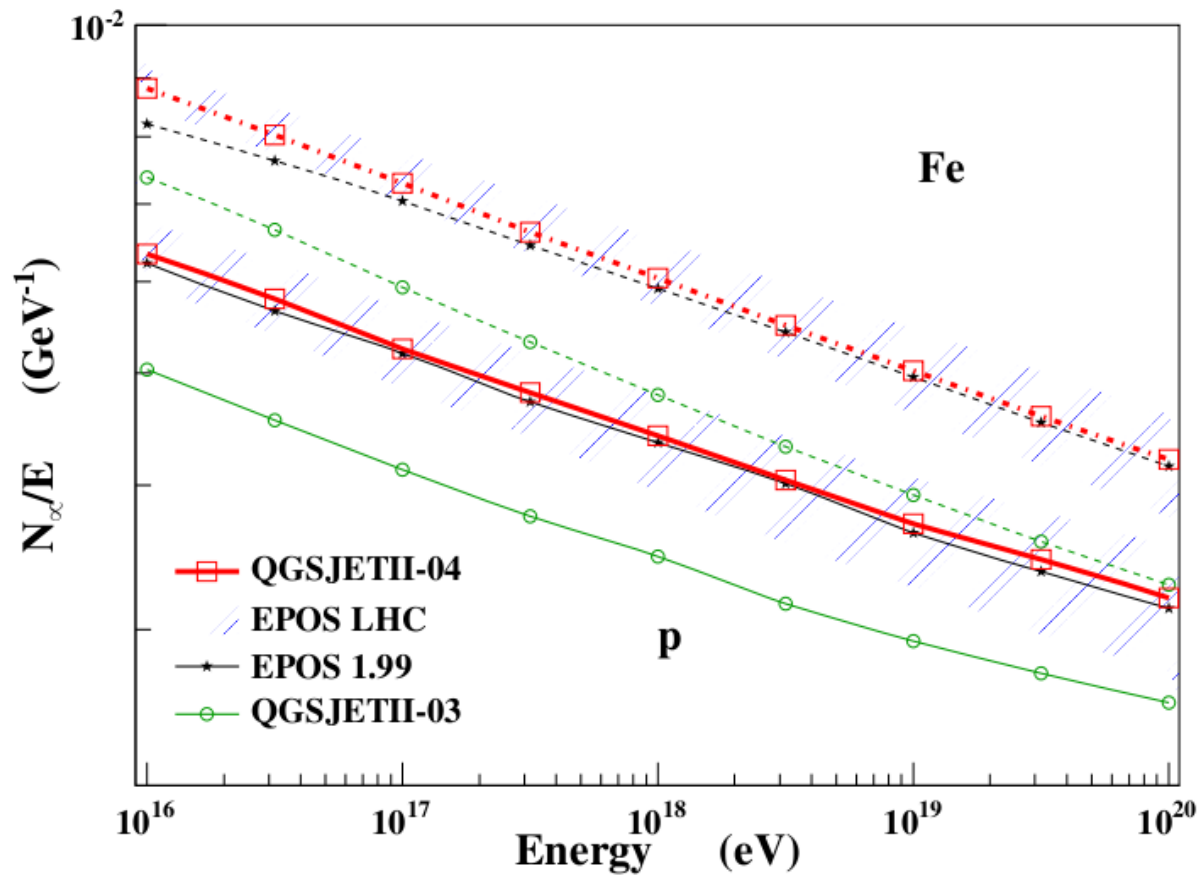


$$X_{\max}(E_0) \propto \lambda_h + \lambda_e \cdot \ln\left(\frac{E_0}{n_{\text{tot}} E_c}\right)$$

Tanguy Pierog. J. Phys.: Conf. Ser. 409, 012008 (2013).

Multiplicidade – fraca dependência (ln) com o  $X_{\max}$  e forte impacto na  $\text{RMS}(X_{\max})$ .





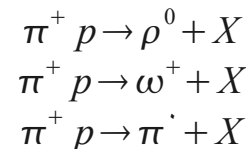
## Produção de bárions – número de múons ao nível do solo

$$N_{\mu} = \left( n_{carg}^{had} \right)^n = \left( \frac{E}{E_c} \right)^{\alpha}$$

$$\alpha = \lambda + \ln R / \ln n_{tot},$$

onde  $R = n_{carg}^{had} / n_{tot} < 1$

Tanguy Pierog. J. Phys.: Conf. Ser. 409, 012008 (2013).



Maior produção de  
 múons em novos  
 modelos

QGSJET II-04 e EPOS 1.99  
 prevêm um número de múons de  
 ~20% maior que QGSJETII-03.

EPOS LHC – incertezas de 5% a 15%  
 não há dados da produção frontal de  
 bárions. Dados futuros do LHCf e  
 NA61.

**A energia média dos múons é maior no QGSJETII-04 do que no EPOS.**

# Considerações finais

- **Dados dos aceleradores contribuem muito para reduzir as incertezas em simulações de CAEs proporcionando melhores ferramentas para analisar dados de raios cósmicos, com um dos objetivos principais a composição dos raios primários.**
- **Para o nosso estudo de composição de raios cósmicos primário usando uma metodologia baseada em estimar o sinal da componente muônica, os ajustes dos modelos de interações hadrônicas a dados experimentais de aceleradores são fundamentais.**
- **Mudanças nos modelos com respeito produção de bárions influem diretamente nos valores de filtros que temos selecionados. Alguns resultados já foram apresentados em eventos internacionais.**