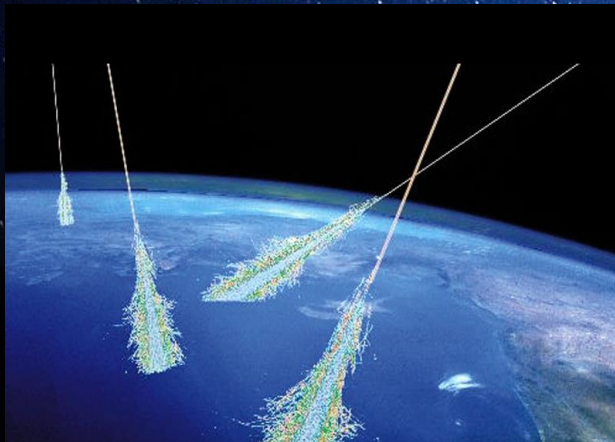
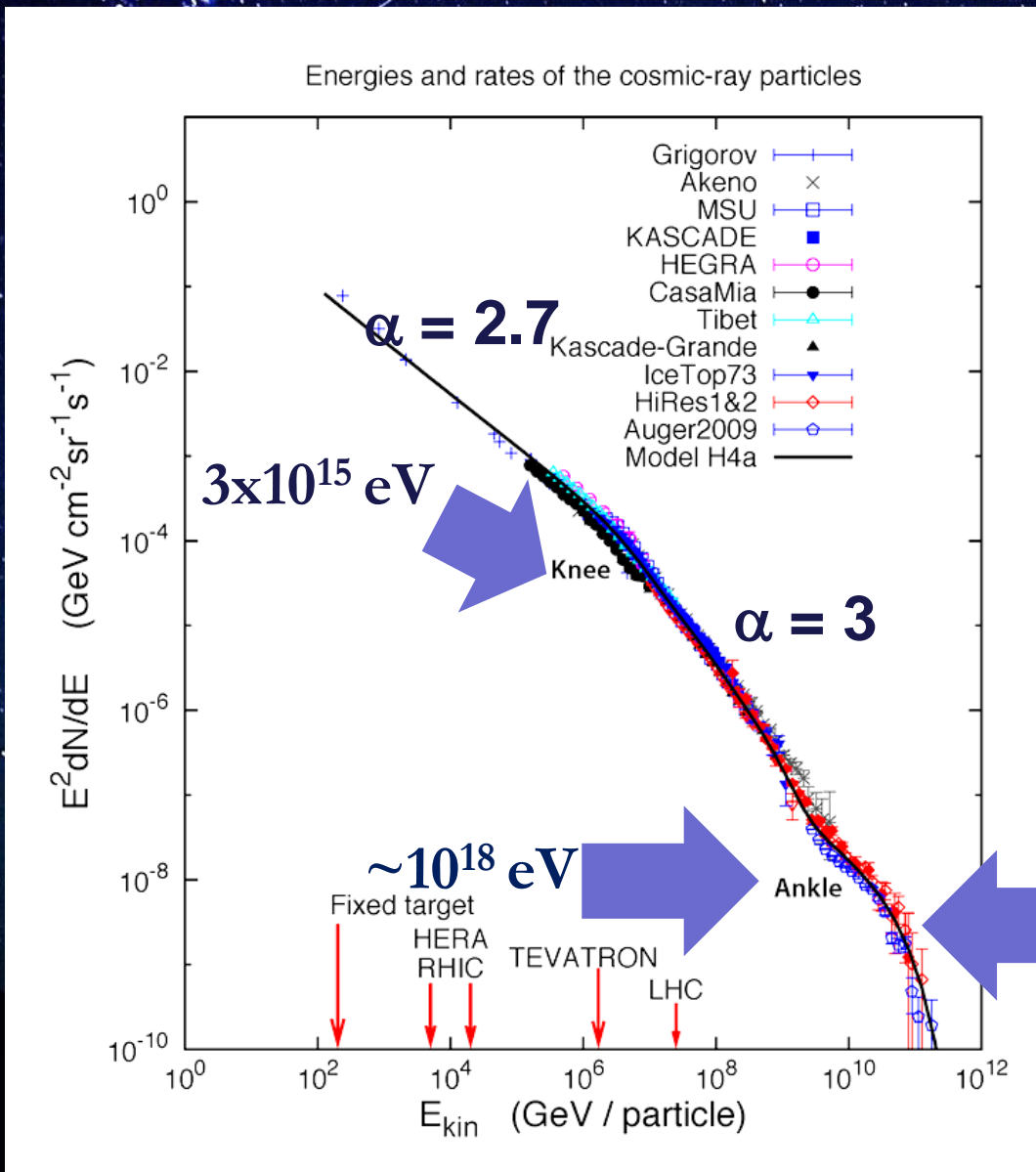


# UHECR

J.E. Horvath  
Astronomia, IAG-USP



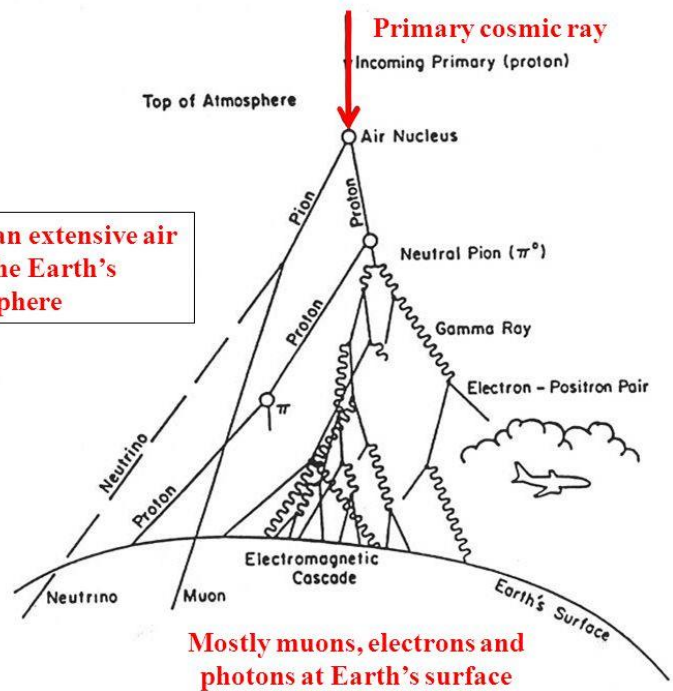
# Recapitulando: o que acontece nas maiores energias?



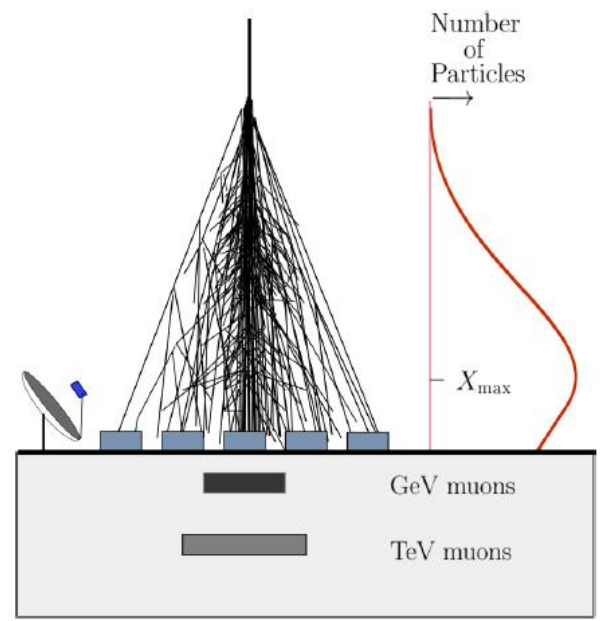
Por aquí há  
1 part/km<sup>2</sup> ano !!!



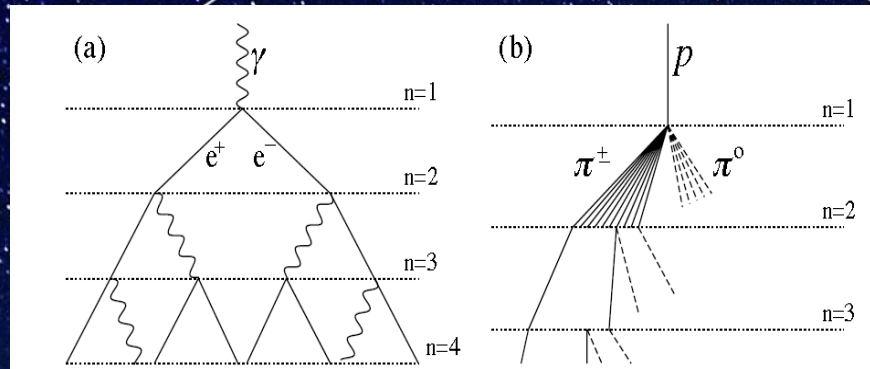
Development of an extensive air shower in the Earth's atmosphere



# Cascata hadrónica e eletromagnética



# Cascata hadrônica e eletromagnética: o modelo de Heitler



A hipótese simplificadora mais importante é a de supor que em cada estágio a cascata eletromagnética produz (via bremsstrahlung e produção de pares) duas partículas, cada vez que decorre o comprimento  $X_{EM} \approx 37.6 \text{ g cm}^{-2}$  (colunar)

Esta bifurcação continua até que as partículas atingem uma energia mínima de  $\epsilon_0 \approx 86 \text{ MeV}$ , depois desse ponto só perdem energia sem produzir novos pares

Assim, depois de  $n = X/X_{EM}$  bifurcações, o número de partículas no chuveiro é  $N \approx 2^n$  (série geométrica). Na profundidade máxima  $X_{max}$ , todas as partículas chegaram ao mínimo de energia  $\epsilon_0$ , e a energia do primário  $E_0$  está repartida nas partículas produzidas

$$N_{max} = E_0/\epsilon_0$$

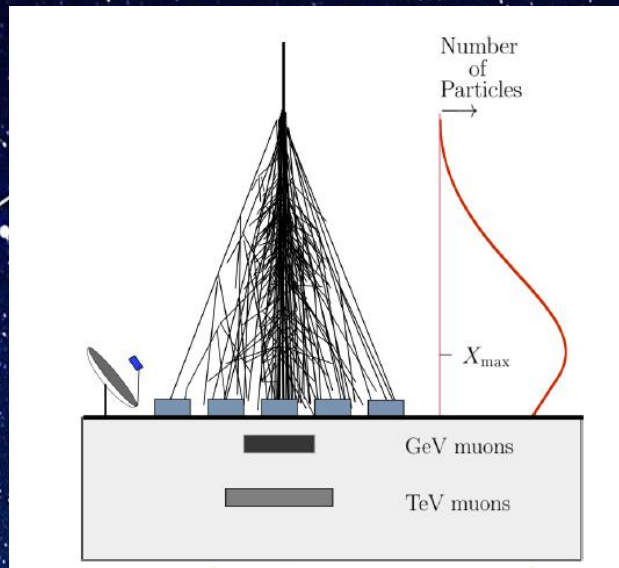
Por tanto

$$X_{max} \approx X_{EM} \frac{\ln(E_0/\epsilon_0)}{\ln 2}$$

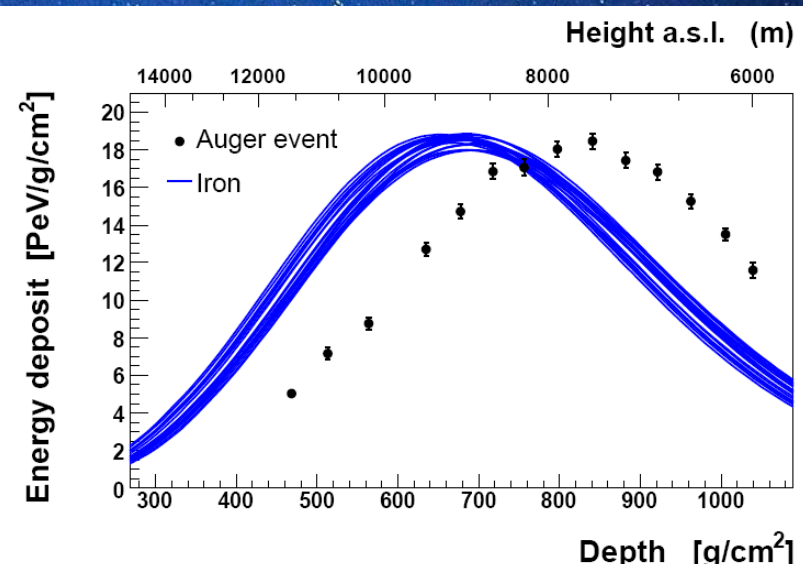
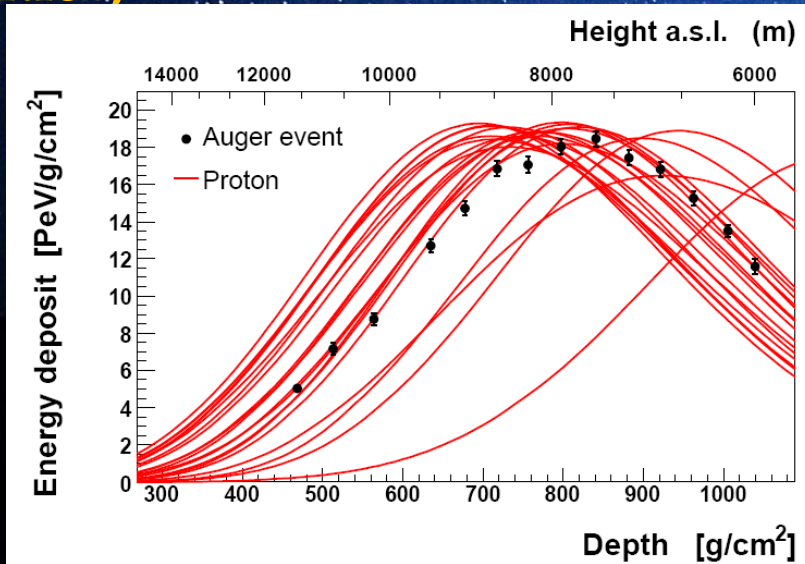
Se agora supomos que o primário é um hádron, ainda a componente e.m. domina todo (já que produz um monte de  $\pi^0$  que decaem em gamas ( $\sim 90\%$  da energia vai na cascata e.m., menos de  $10\%$  em hádrons). A idéia de Heitler pode ser aplicada para obtermos no caso de um próton

$$X_{max}(E) \approx X_0 + X_{EM} \ln[E/\langle n(E) \rangle].$$

onde  $\langle n(E) \rangle$  é o número médio de partículas secundárias, e cada uma delas carrega uma energia  $E/\langle n(E) \rangle$



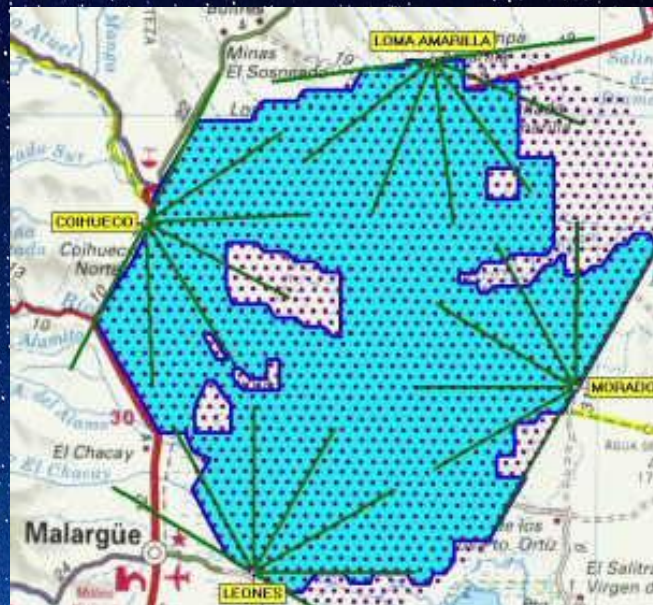
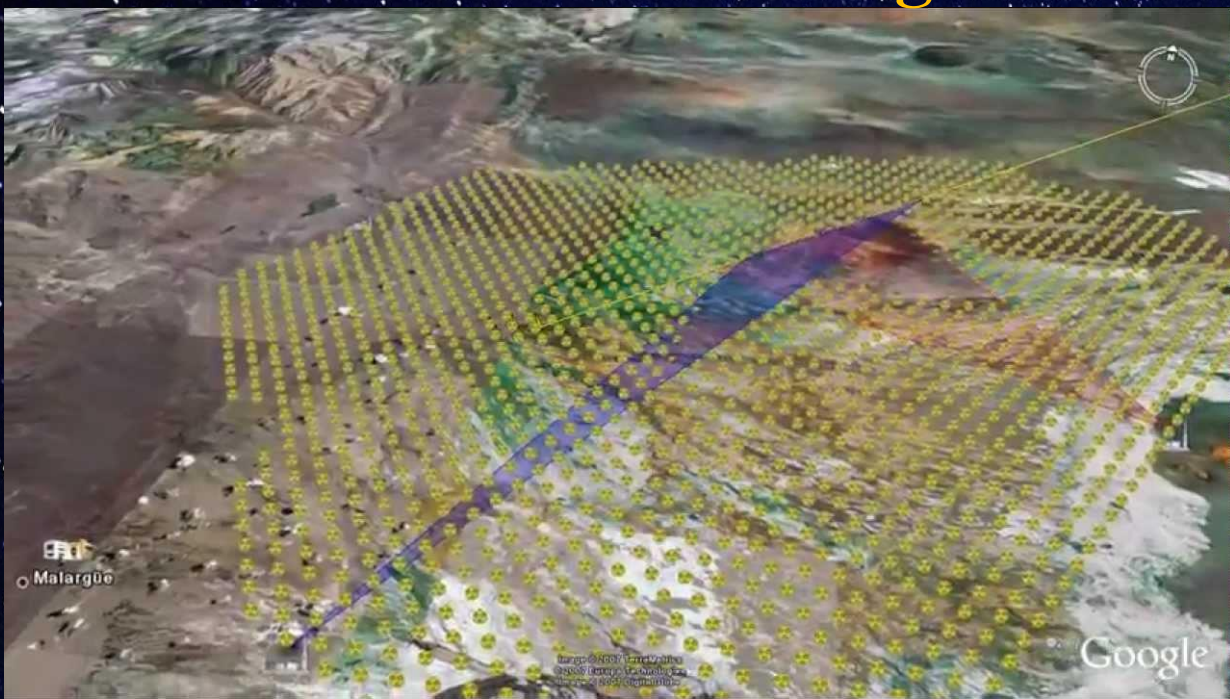
Quando um primário pesado for considerado, o  $X_{max}$  dependerá da composição, seguem dois exemplos reais de eventos no Auger e as simulações correspondentes (mais completas que o modelo de Heitler)



# O Observatório Pierre Auger

dash me

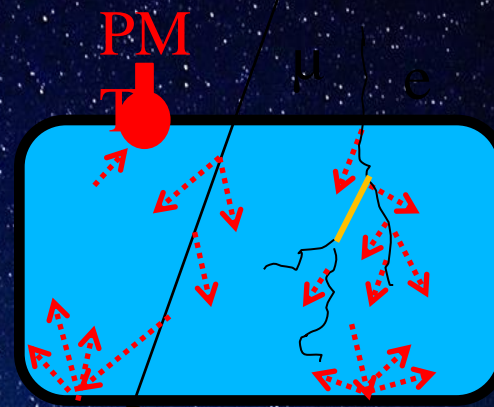
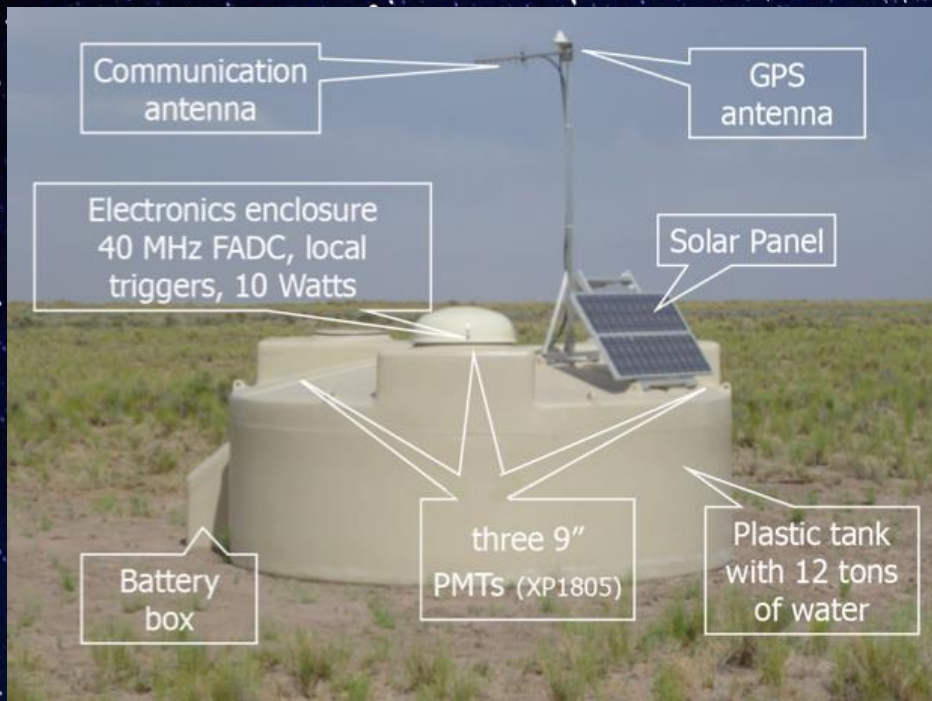
~50 km



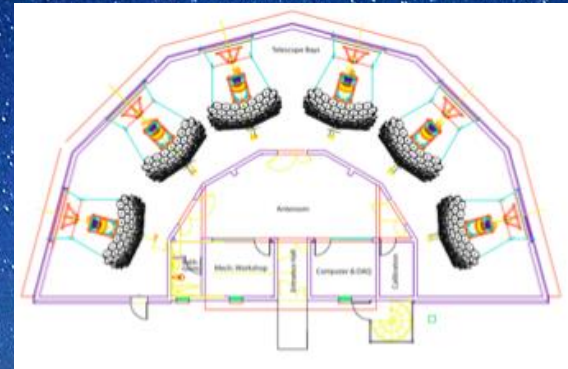
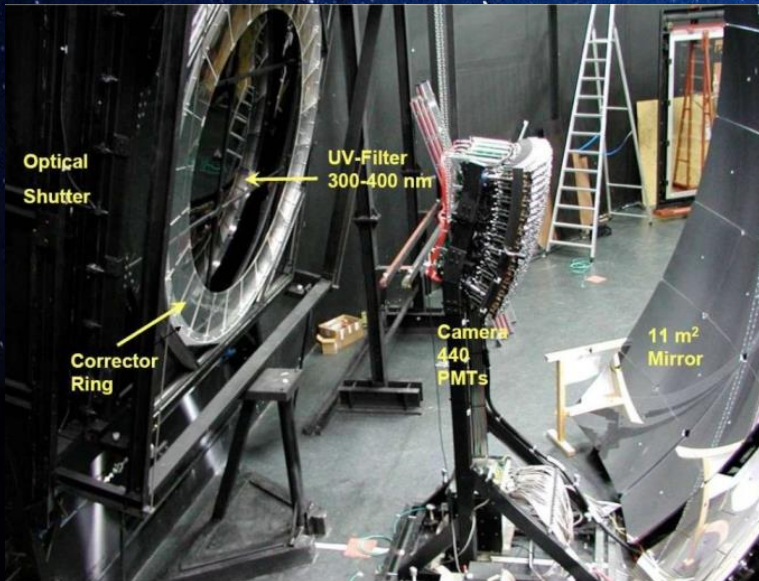
**Churrasco  
na certa!**



**Detector  
de superfície**



Detectam a radiação  
 Cerenkov das partículas  
 carregadas (muons) 100%  
 do tempo



Detectam a fluorescência na atmosfera  
 produzida pela deposição de energia  
 (calorímetro). Operam em noite sem  
 lua 13% do tempo total

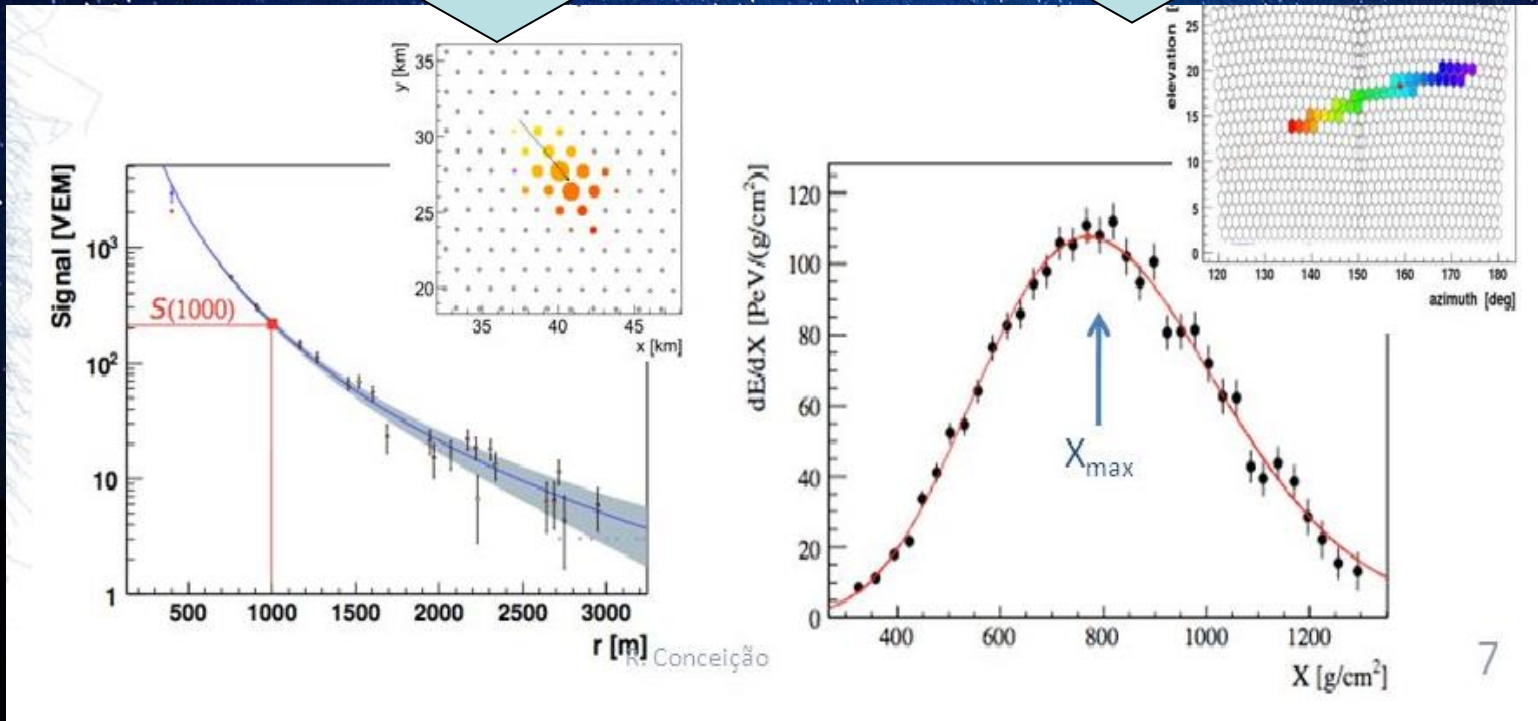


## No detector de superfície

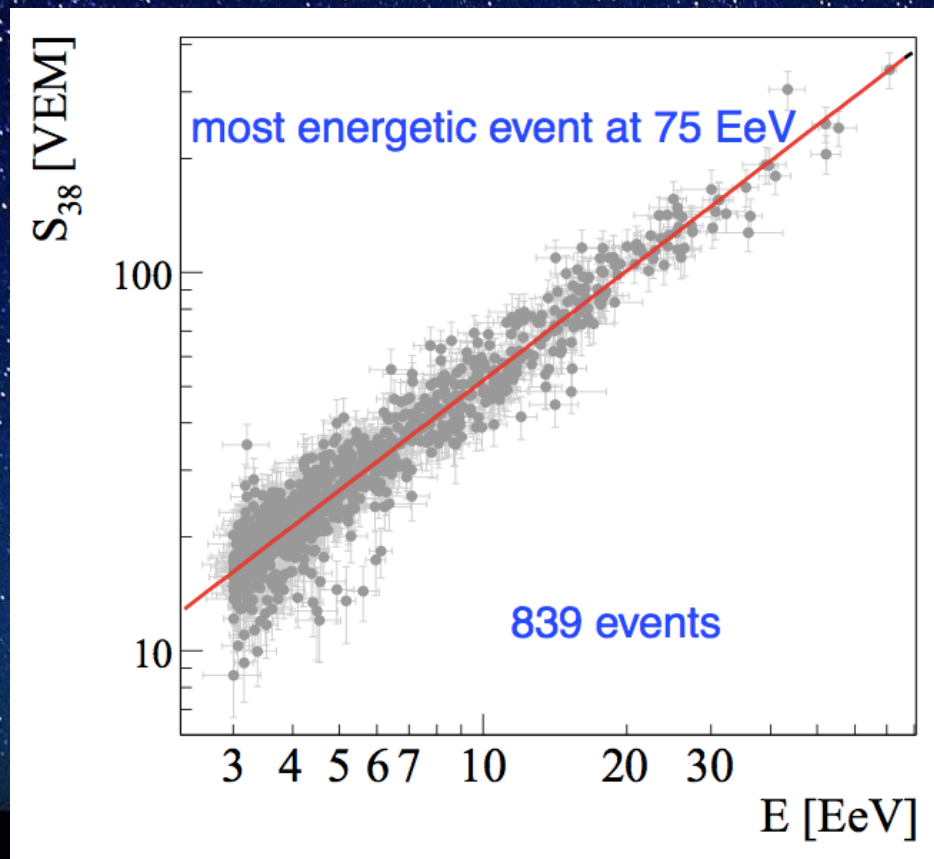
- Desenvolvimento lateral (LDF)
- O tempo de chegada relativo determina a direção de chegada
- A energia é obtida medindo todo o sinal até 1000 m do core

## No detector de fluorescência

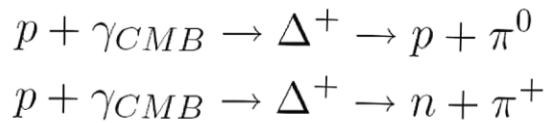
- A evolução registrada nas câmaras mostra a geometria
- A energia é medida integrando o perfil longitudinal (medida calorimétrica)



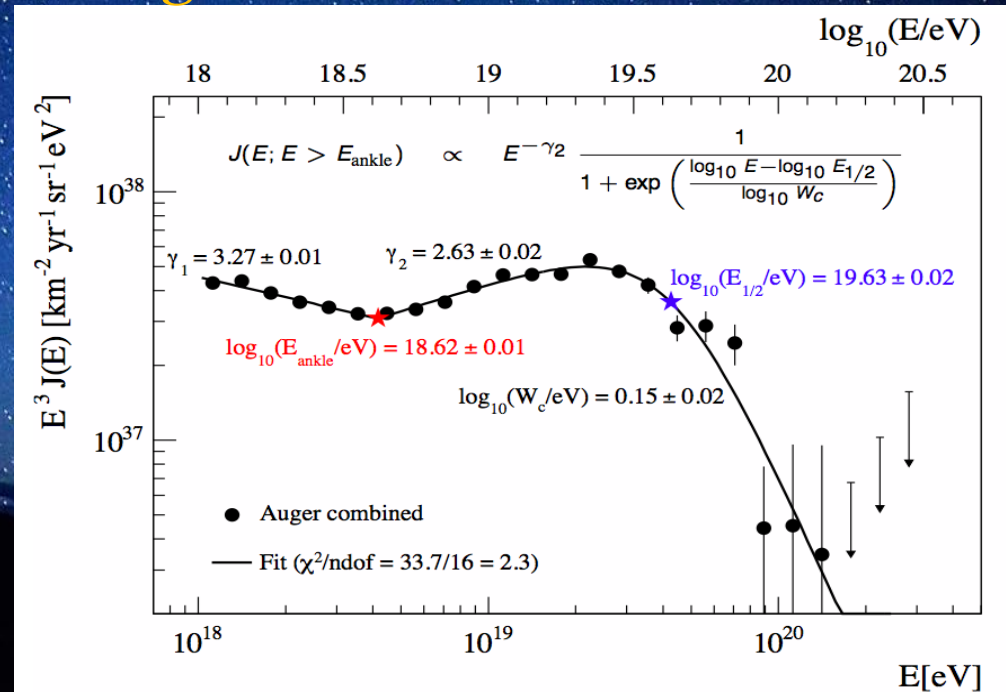
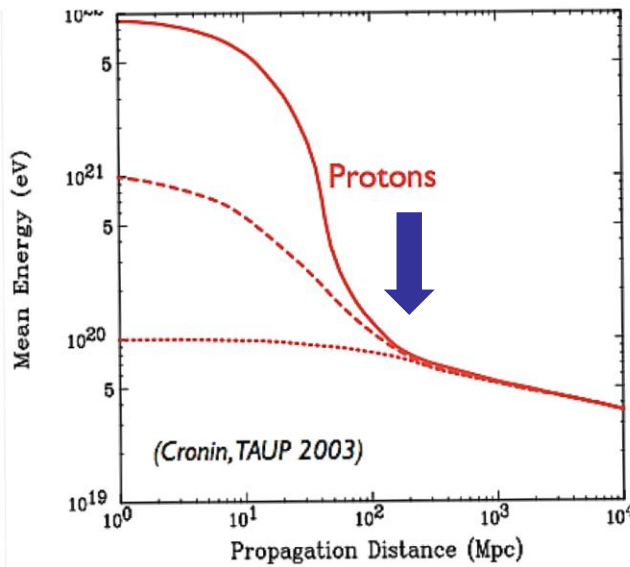
Com a construção completa em 2008, o Observatório Auger vem acumulando eventos nas maiores energias e resulta potencialmente sensível até  $E \gg 1 \text{ EeV}$



# O cutoff de GZK?



Os prótons de energia mais alta veem o fundo cósmico de radiação CMBR como fótons gama. Assim, a fotoprodução de píons drena a energia e não é possível trazé-los de muito longe. Se os primários forem pesados (Fe), os fótons do CMBR os desintegram

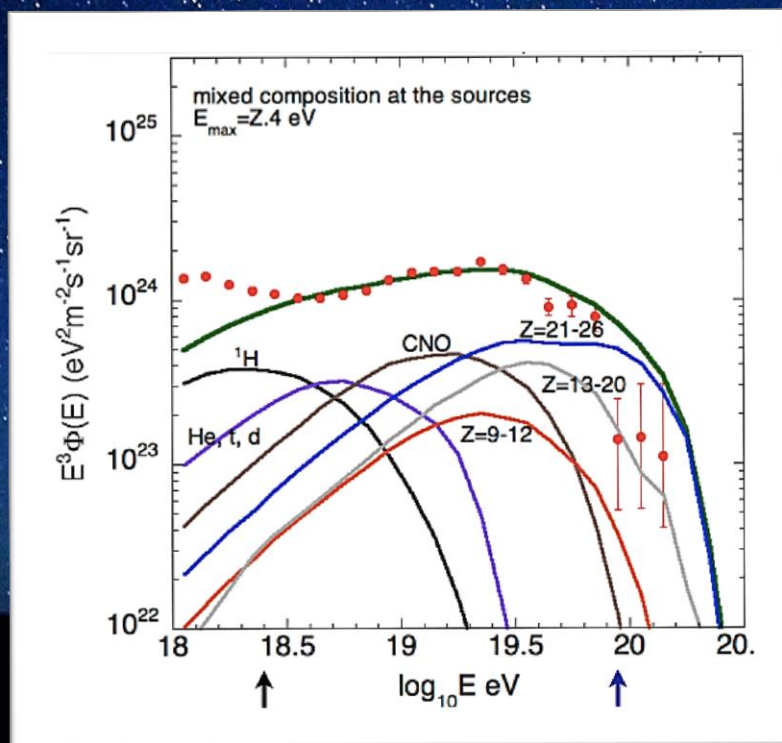


Uma supressão com  $\sim 20 \sigma$  é observada para  $\sim 6 \times 10^{19} \text{ eV}$

É o cutoff de GZK?

Possivelmente sim, mas há uma explicação alternativa:

As fontes podem estar chegando ao máximo que pode ser acelerado. Nesta interpretação, não há primários mais energéticos porque não é possível produzi-los (Alard et al. 2011)



Existem alguns eventos acima do cutoff, mas muitos menos que o esperado. O evento de maior energia ( $\sim 3 \times 10^{20}$  eV) é mais energético que o saque do melhor tenista (e seu primário uma partícula, não uma bola)



Para conseguir acelerar partículas, uma fonte qualquer deve ter um tamanho maior que o raio de Larmor  $L$  que resulte do seu campo  $B$

$$L \sim r_L = \frac{p_{\max}}{ZeB}$$

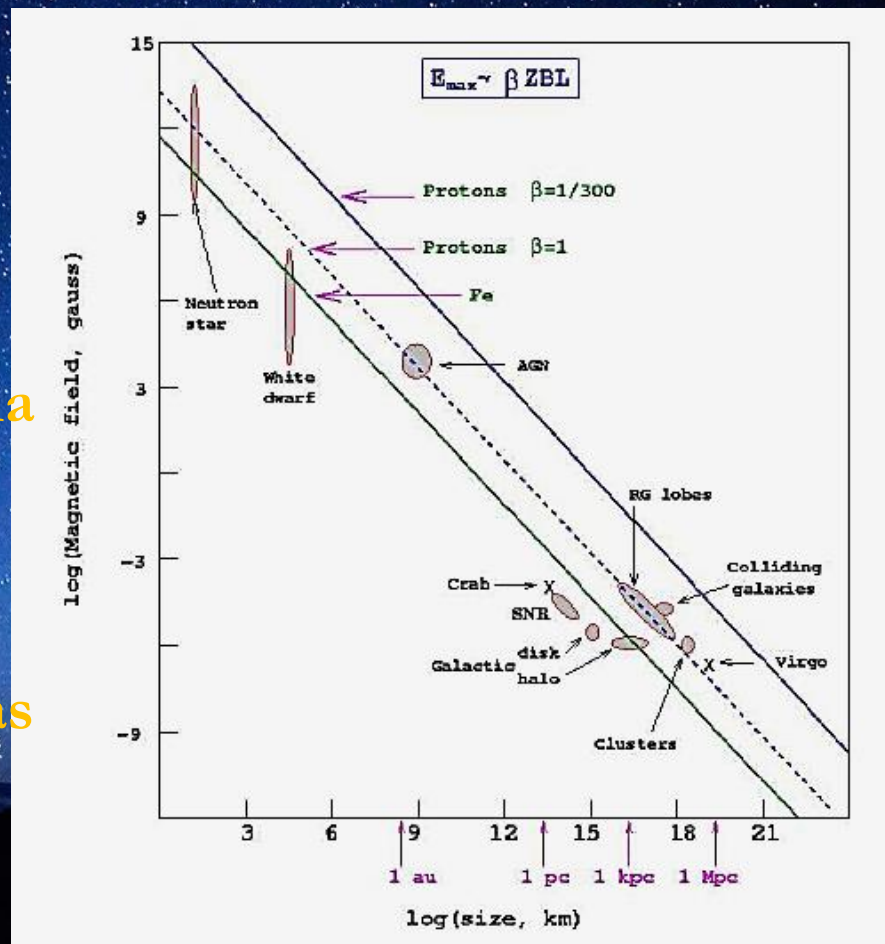
Introduzindo o  $\beta$  já discutido, e impondo energia relativística, esta relação pode ser escrita como

$$E_{\max} \sim \beta ZecBL$$

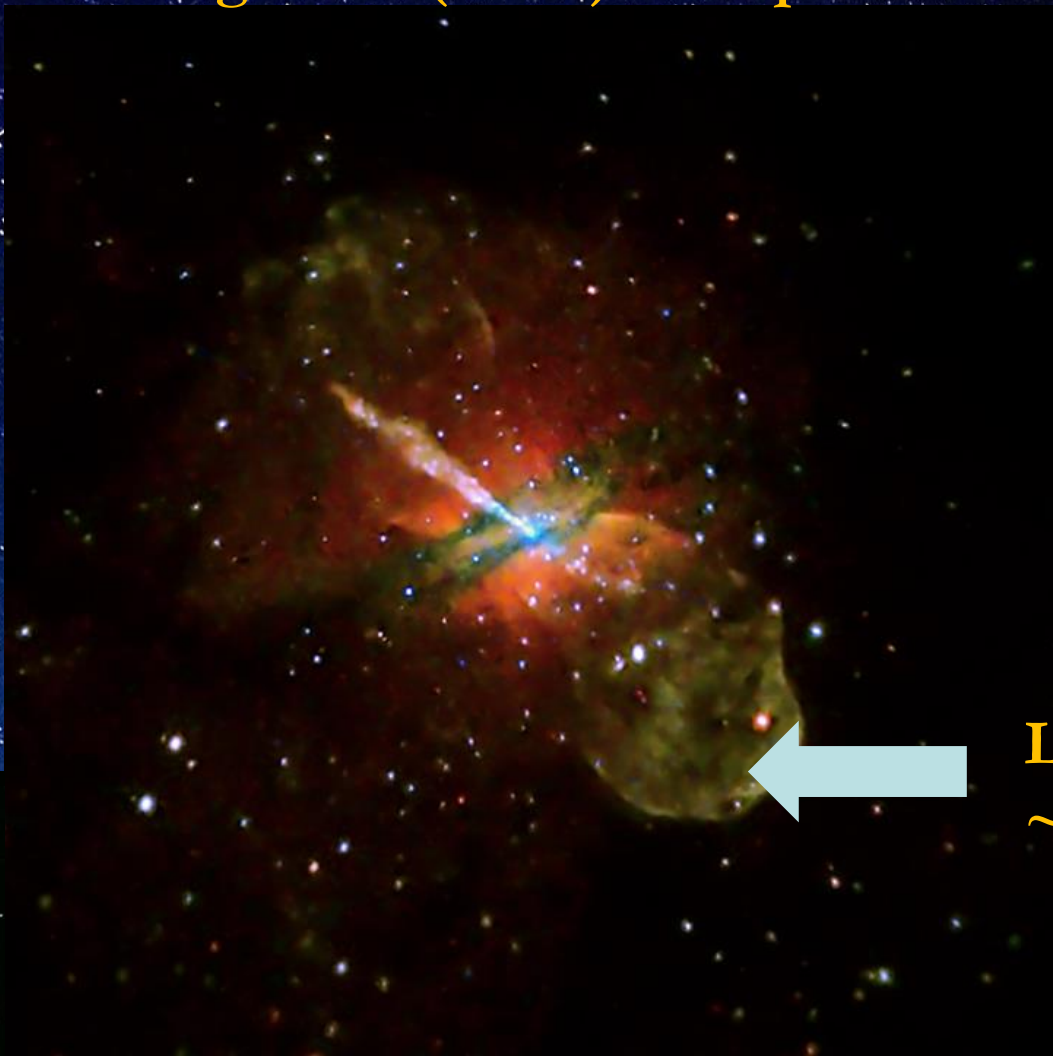
Conhecido como *critério de Hillas*

Para cada valor do campo  $B$ , as fontes capazes de produzir a energia de  $\sim 10^{20}$  eV devem estar acima da linha diagonal (que depende do  $\beta$ )

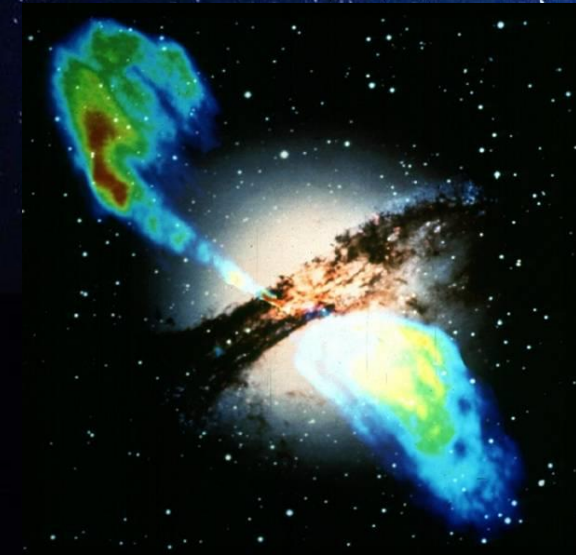
Vemos que não há fontes candidatas na galáxia (as NS com campo alto poderiam ser, mas o mais razoável é procurar as extragalácticas



# Cen A @ ~4 Mpc: a radiogaláxia (AGN) mais próxima



Lóbulos de  
~60 kpc



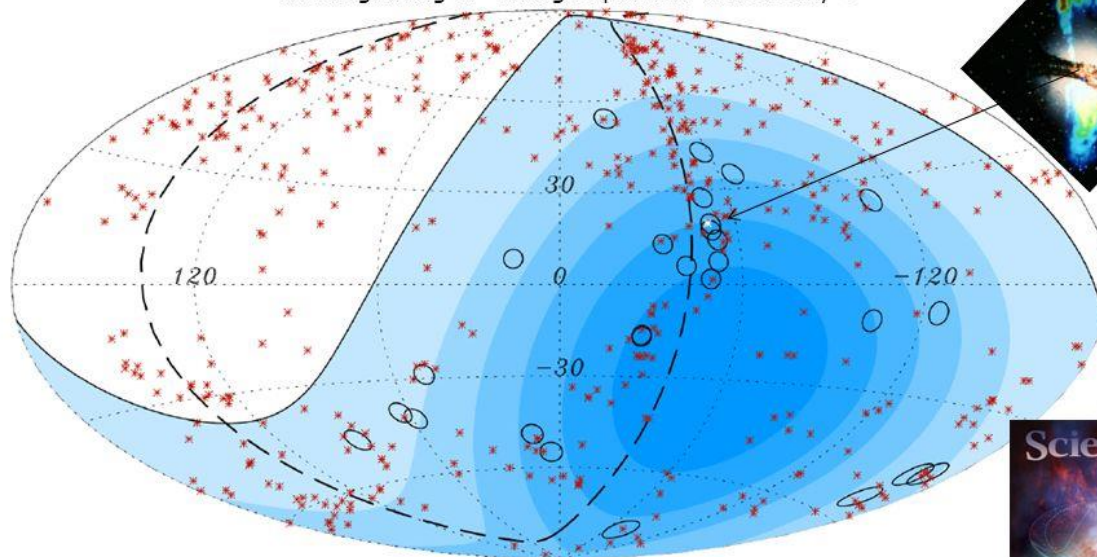
Comparação dos dados com um conjunto de dados simulados apontou evidência para uma correlação com os AGNs catalogados

## Auger: Clustering of UHECRs



New data confirms correlation with AGN clustering. Chance probability:  $2 \times 10^{-3}$

The beginning of "charged particle astronomy"!



AUGER Collaboration (2007), Science

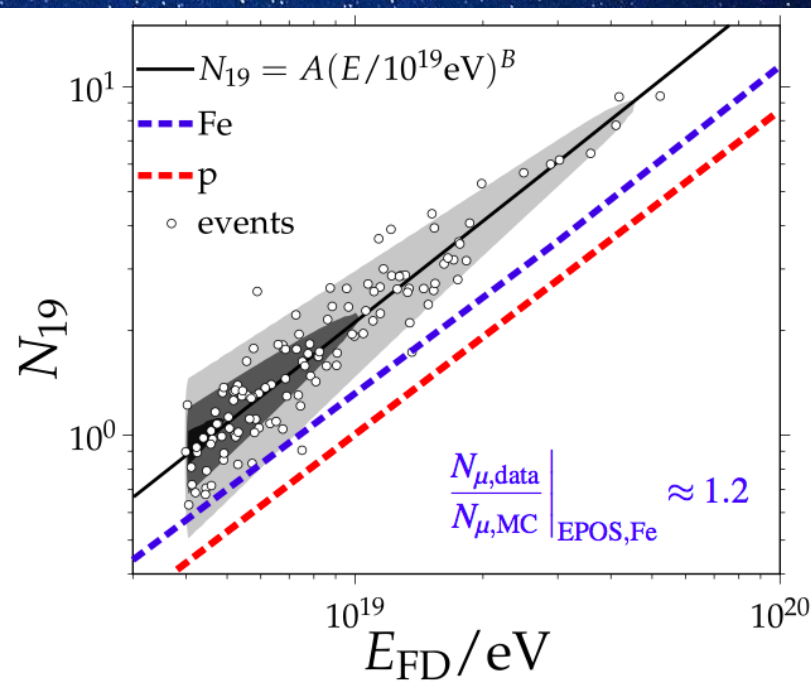
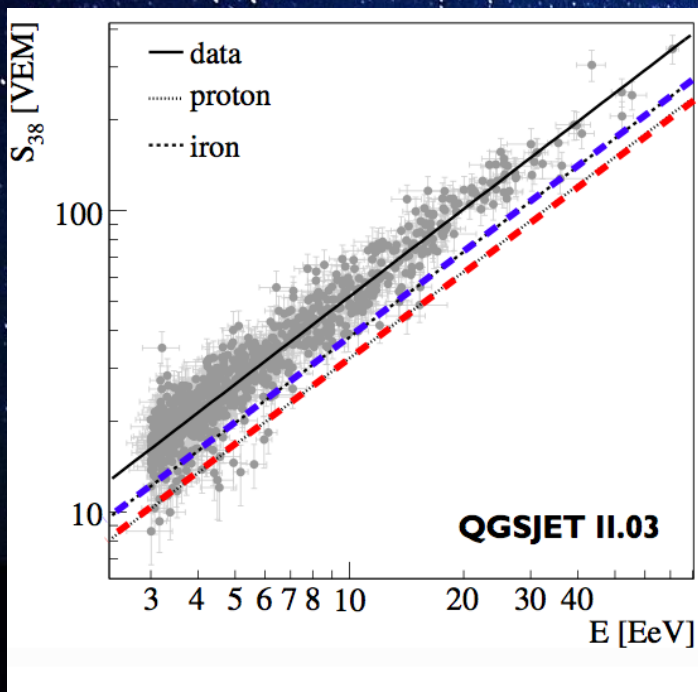


Hoje não há certeza dessa correlação, não se sustenta com a inclusão dos eventos dos últimos anos...



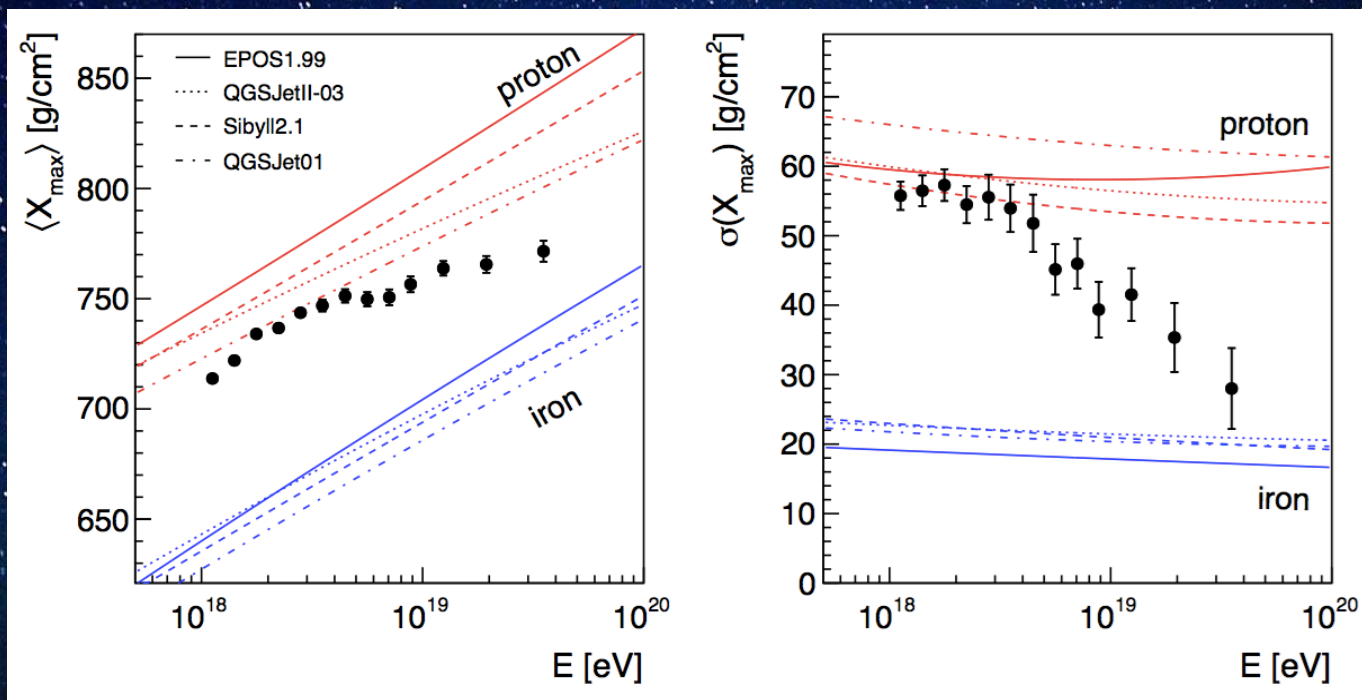
# Quanto influem as interações hadrônicas?

Medida do número de muons vs predição para primários pesados (Fe) e prótons. Mesmo para os chuveciros mais inclinados (direita) dominados pelos muons, não há acordo  $\rightarrow$  as interações acima de  $3 \text{ EeV} = 3 \times 10^{18} \text{ eV}$  não são suficientemente acuradas

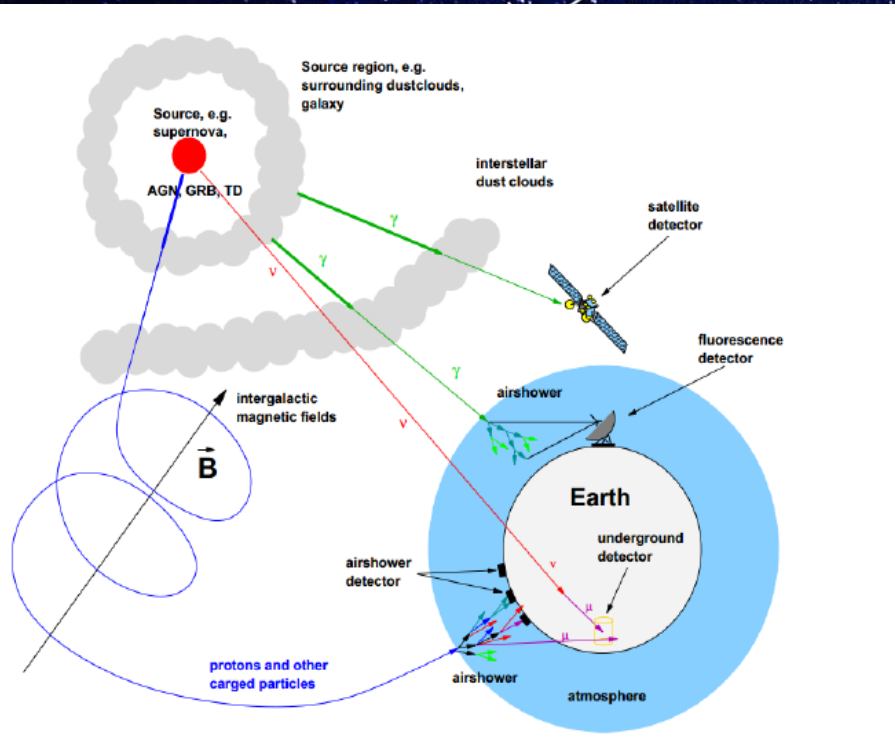


# A composição: são prótons ou são núcleos?

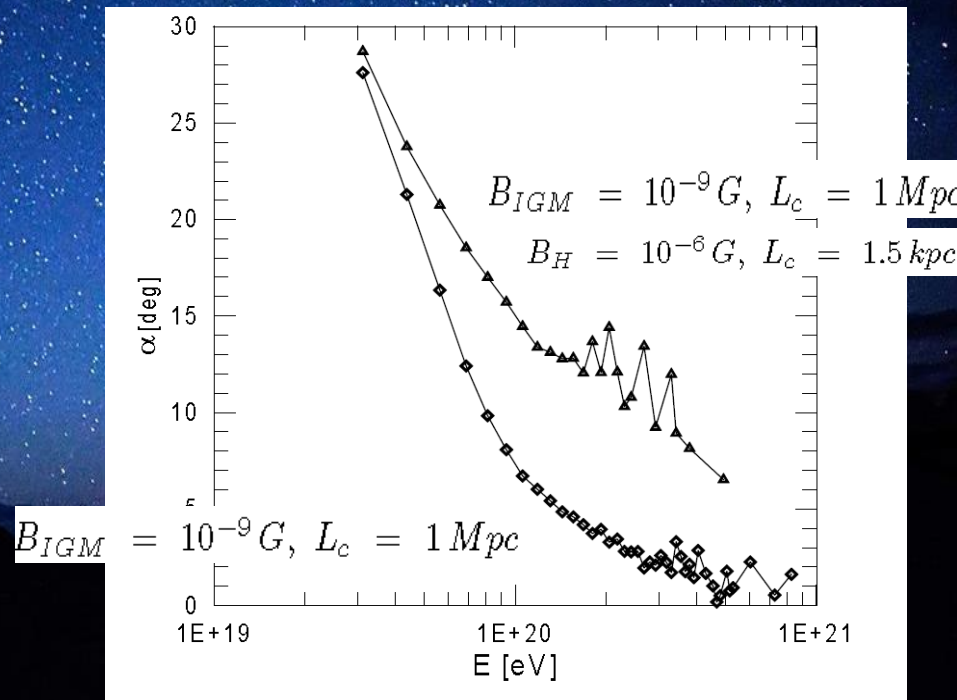
Há flutuações grandes de evento para evento, assim, o mais indicado é fazer a estatística com um conjunto de eventos para cada bin de energia



# A propagação nas maiores energias também tem seus probleminhas



Fonte extragaláctica @ 50 Mpc  
(Medina, Gouveia & Horvath 1997)



That's all  
folks !

