

Raios Cósmicos Ultra Energéticos

M. A. Betemps[†]

`† marcos.betemps@ufrgs.br`

High Energy Phenomenology Group

Instituto de Física

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, Brazil

GFPAE - UFRGS

`http://www.if.ufrgs.br/gfpae`

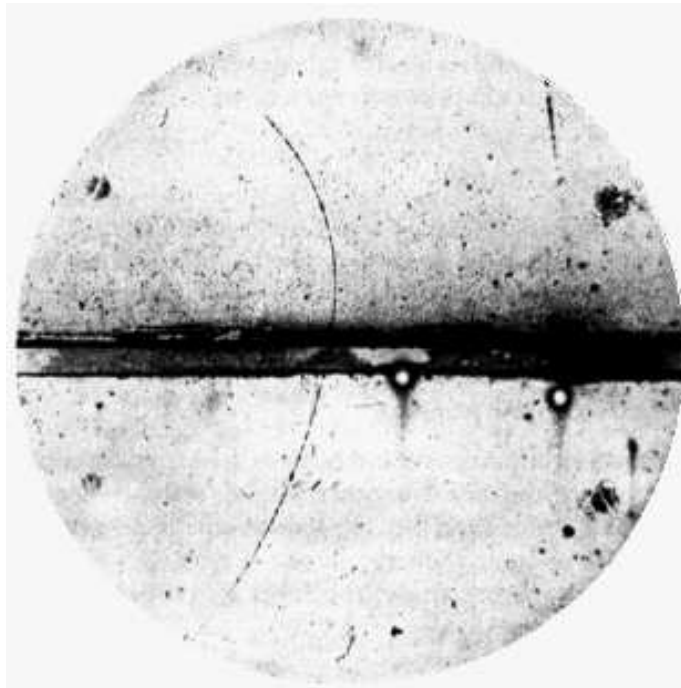


Outline

- Breve histórico
- Raios Cósrmicos
- Definições importantes
- Raios cósmicos ultra energéticos (UHECR)
- Cenários "Bottom-up" e "Top-down"
- Neutrinos e raios γ
- Direção de chegada
- Métodos de Detecção
- Observatório Pierre Auger
- Constituição dos chuveiros
- Resultados experimentais recentes
- Conclusões

Um breve histórico

- Final do século XIX \Rightarrow propriedades elétricas do ar.
 - Radiatividade natural que vinha do chão.
 - Começo do século XX Goeckel com balão \Rightarrow radiação diminuía.
 - Entre 1911-1914, V. Hess e Kolhöster com balão \Rightarrow radiação aumenta.
- 1927 D. Zkobelzyn fotografou o primeiro traço de um raio cósmico.
- Millikan e Compton \Rightarrow medidas da intensidade da radiação.
- Anderson em 1932 \Rightarrow descoberta do pósitron com raios cósmicos.



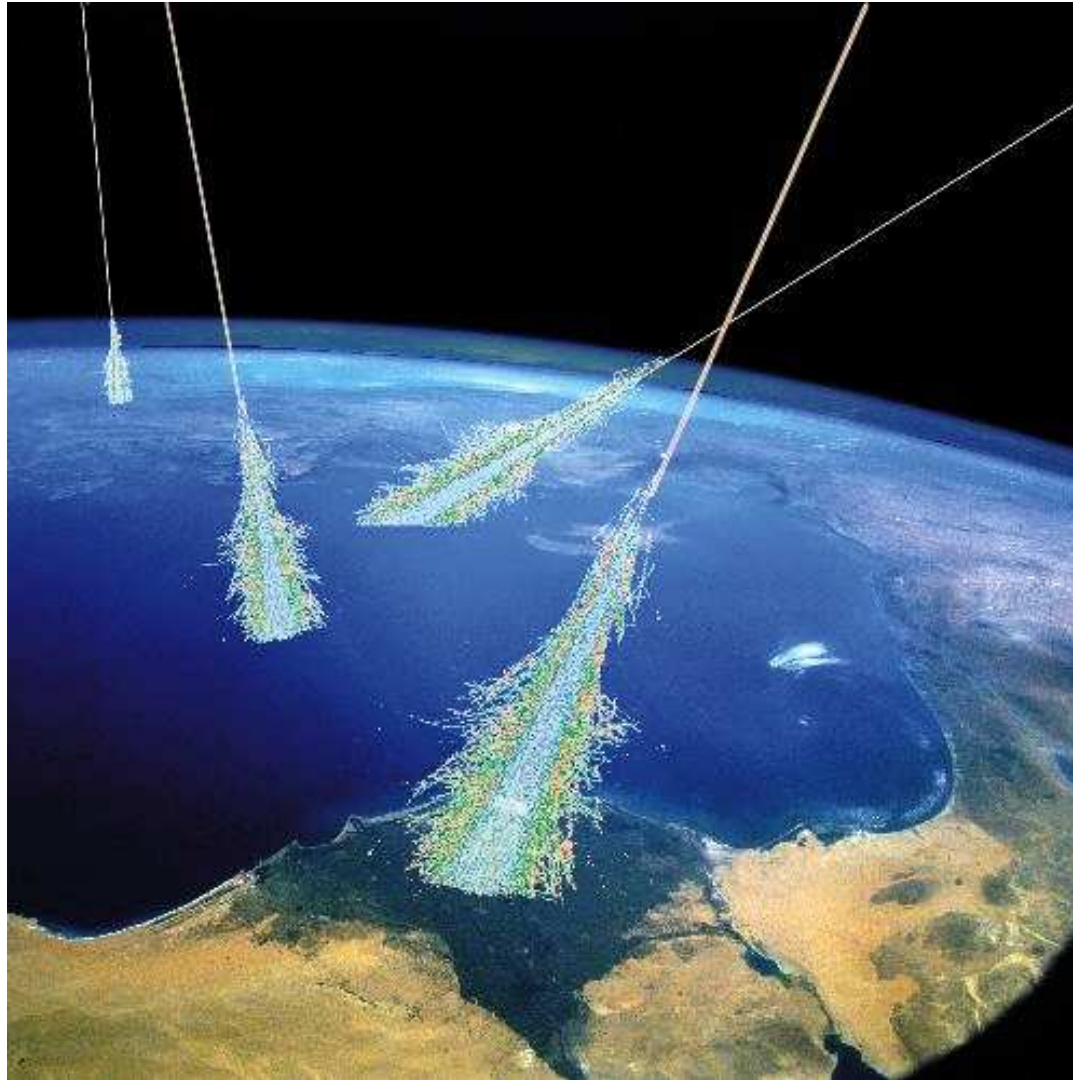
Um breve histórico

- 1937 Neddermeyer e Anderson detectam o múon
- 1938 Pierre Auger detecta os chuueiros extensos.
- 1946 Primeiro experimento para detectar chuueiros extensos.
- 1949 surge a teoria de Fermi dos raios cósmicos (tenta explicar um mecanismo de aceleração das partículas).
- 1962 Detecção do primeiro raio cósmico com 10^{20} eV.
- 1964 Detecção da radiação de microondas de fundo do Universo.
- 1966 Proposta do cutoff GZK.
- 1991 Fly's Eye detecta raios cósmicos ultra energéticos
- 1994 AGASA detecta evento de raio cósmico ultra energético.
- 1995 Início do projeto Pierre Auger.



O que são Raios C3smicos

- Part3culas que prov3em do espa3o exterior e bombardeiam a Terra, de todos os lados.





Definições Importantes: Relembrar

- 1 parsec (pc) é igual a 3,3 anos luz

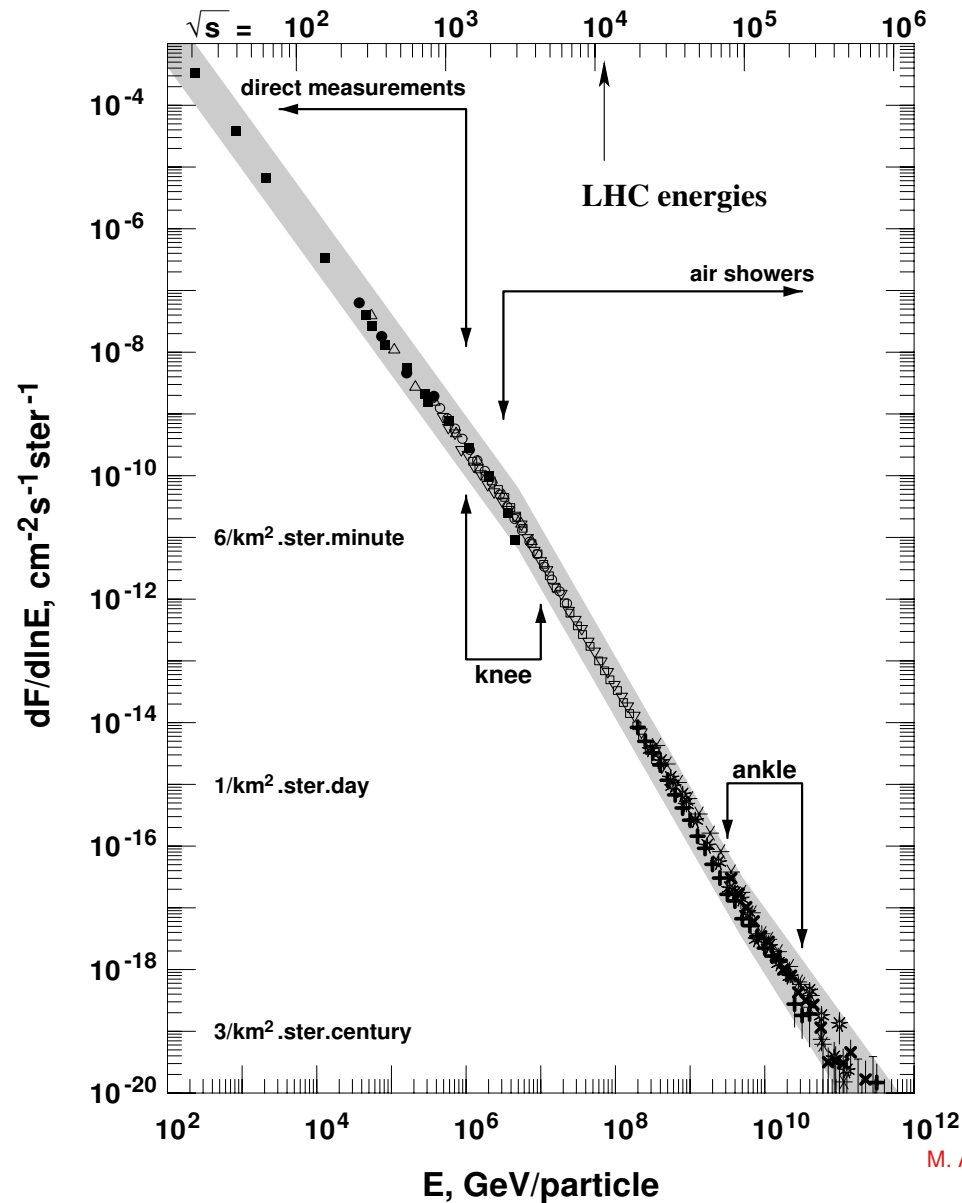
$$30Mpc = 30 \cdot 10^6 \times 3,3 = 99 \cdot 10^6 \text{ anos luz}$$

- Steradians (estereoradiano) é a medida de um ângulo sólido. Uma esfera completa, subentende 4π estereoradianos (rad^2). Dada uma esfera de raio 1, a região com área igual a unidade na superfície da esfera subentende um ângulo sólido de 1 estereoradiano.

ângulo contínuo subentendido no centro de uma esfera do raio r por uma parcela da superfície da esfera que tem uma área r^2 .
- Raio de Larmor: raio da órbita circular que uma partícula carregada descreve transversalmente ao campo magnético.
- Radiação Cherenkov \Rightarrow radiação emitida quando partículas carregadas passam através da matéria com uma velocidade maior que a da luz no meio.
- Luz Fluorescente \Rightarrow luz emitida por moléculas de nitrogênio da atmosfera quando excitadas por raios cósmicos.

Raios C3smicos

- Os raios c3smicos foram medidos at3 energias da ordem de 10^{20} eV.
- Abaixo apresentamos o fluxo destes raios em termos da energia dos mesmos.





Raios C3smicos Ultra-energ3ticos

- Podemos considerar raios c3smicos ultra-energ3ticos como sendo os raios c3smicos com energias da ordem de 10^{20} eV.
- O fluxo para esta energia 3 de aproximadamente 1 part3cula por km^2 por s3culo.
- Considerando toda a superf3cie terrestre teremos $5 \cdot 10^6$ part./.(sr. ano)
- Considerando o maior experimento de raios c3smicos \Rightarrow 30 part/sr ano.
- Part3culas que constituem os raios c3smicos

{	N3cleos
	pr3tons
	el3trons
	X ??
- O que medimos s3o part3culas do Standard Model.
- Part3cula X \Rightarrow al3m do Standard Model.
- A constitui3o depende da origem.
- Origem dos UHECR \Rightarrow dois cen3rios

{	bottom-up \Rightarrow	acelera3o
	top-down \Rightarrow	decaimento
- Existe ainda os modelos h3bridos.

Cenário "Bottom-up"

- Partículas carregadas aceleradas em meios astrofísicos:
 - Aceleração direta de partículas carregadas em campos elétricos.
 - Aceleração estatística (aceleração de Fermi) em plasmas magnetizados.
- Aceleração direta:
 - Estrêlas de nêutrons rotativas (pulsar) com campos magnéticos superficiais.
 - Discos de acreção (com rotação) permeados por campos magnéticos.
- Aceleração Estatística:
 - Remanescentes de super novas;
 - Núcleos de galáxias ativas (AGNs);
 - Galáxias com forte emissão na frequência de rádio;
 - Explosão de raios gammas (GRBs);
 - Buracos negros não ativos na frequência de rádio;
 - Galáxias colisoras;
 - Conjunto de galáxias.

Trataremos apenas dos processos de aceleração estatística

Mecanismos de aceleração

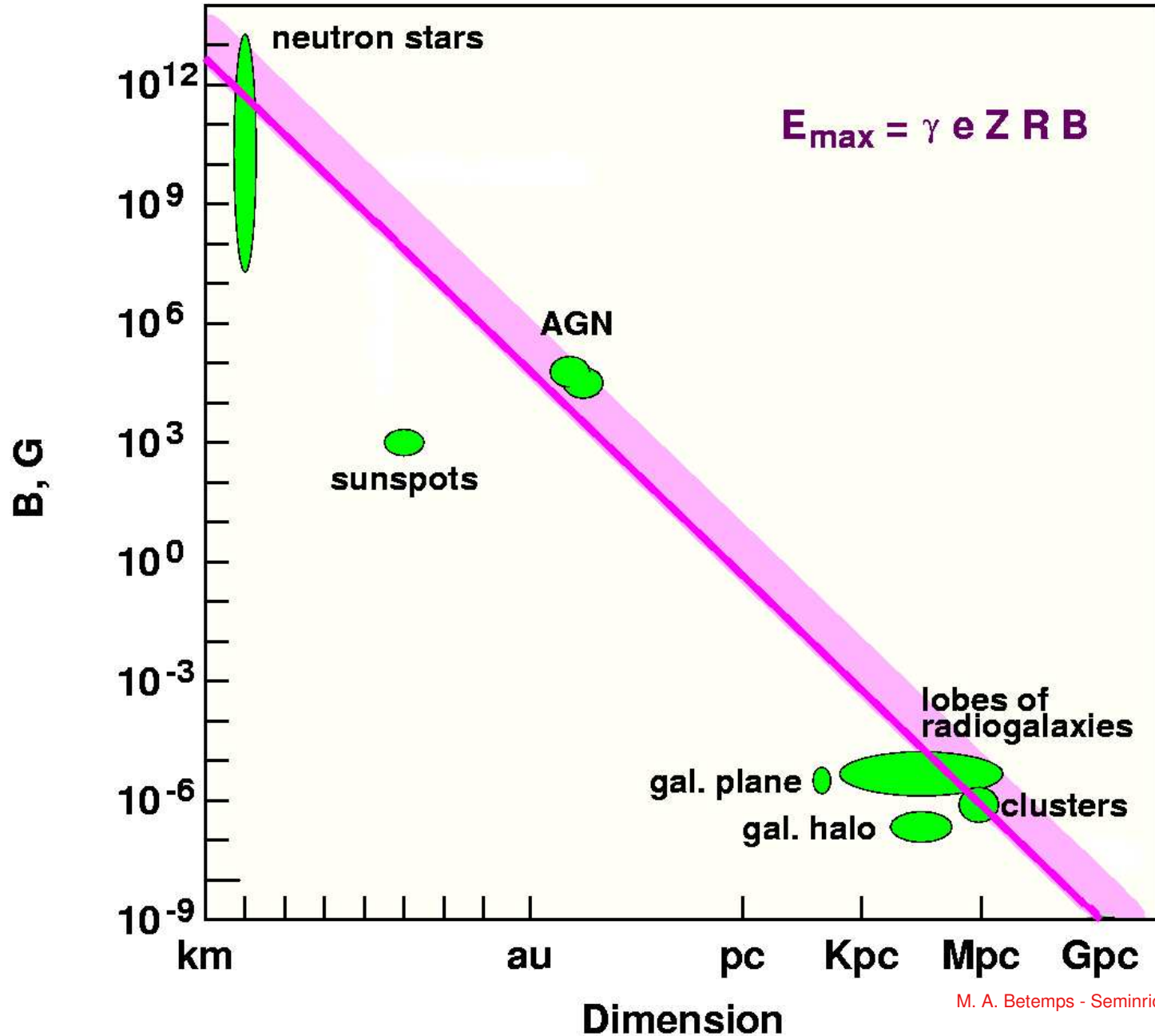
- Proposto por Fermi (Phys. Rev. 75, 1169 (1949)).
- Idéia básica
 - Campo elétrico médio nulo.
 - Pode existir uma transferência de energia cinética → plasma magnetizado para partículas carregadas.
 - Ocorre devido a repetidos espalhamentos das partículas com inhomogeneidade dos campos magnéticos ou com frente de choque.
 - O formalismo original de Fermi é chamado de "Mecanismo de segunda ordem de Fermi"
- Mecanismo de aceleração por choque difusivo ("DSAM").
 - Mecanismo de Fermi ⇒ espalhamento por frente de choque planas.
 - Partículas emergem com espectro que obedece lei de potência.
- Energia máxima de aceleração:

$$E_{max} \propto ZeBR$$

- $B \Rightarrow$ valor do campo magnético. $R \Rightarrow$ dimensão linear do objeto

Hillas Plot

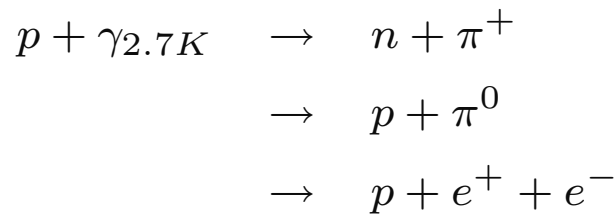
After A.M. Hillas



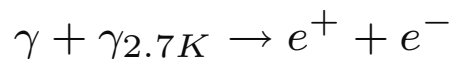
Propagação dos UHECR

- Partículas energéticas através \Rightarrow
 - Radiação cósmica de fundo (CMB)
 - Campos magnéticos
- Raios cósmicos (partículas do modelo padrão) \Rightarrow **Perda de energia**

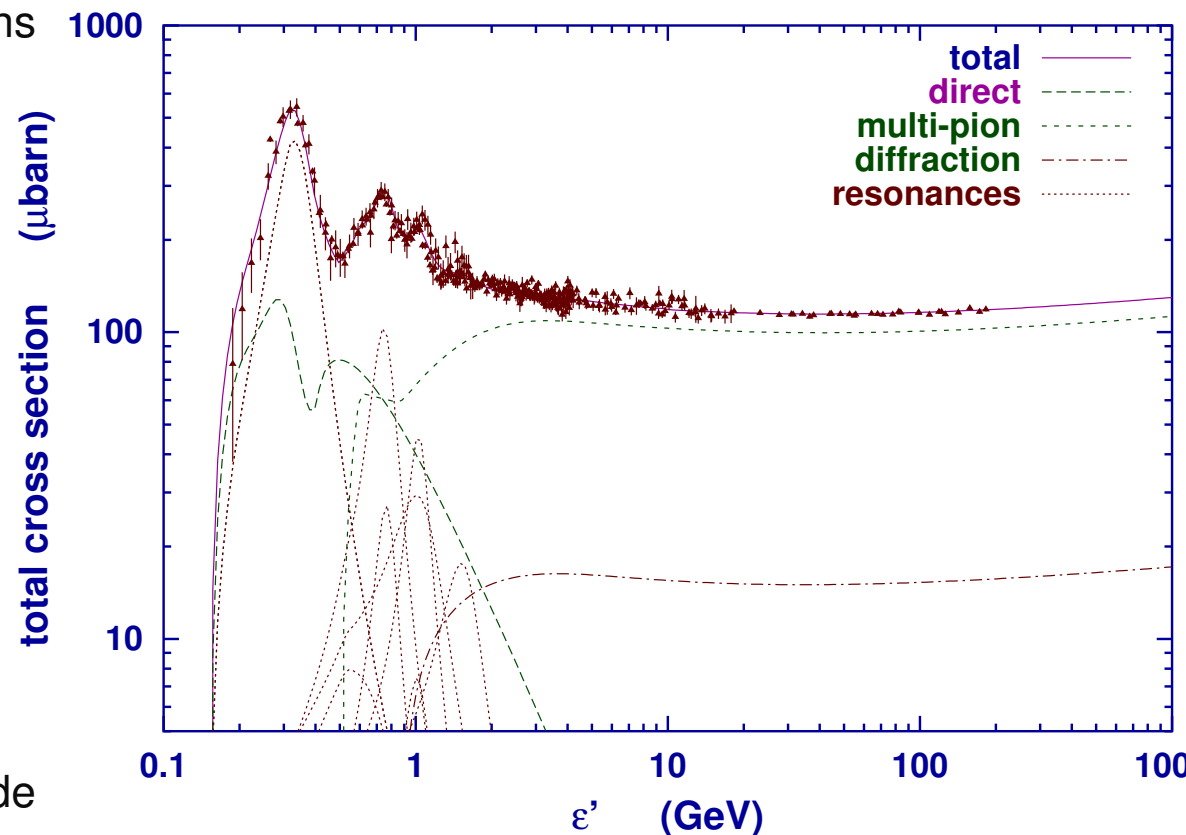
- Principais reações de prótons com fótons ($\gamma_{2.7K}$)



- Raios Gamma com fótons



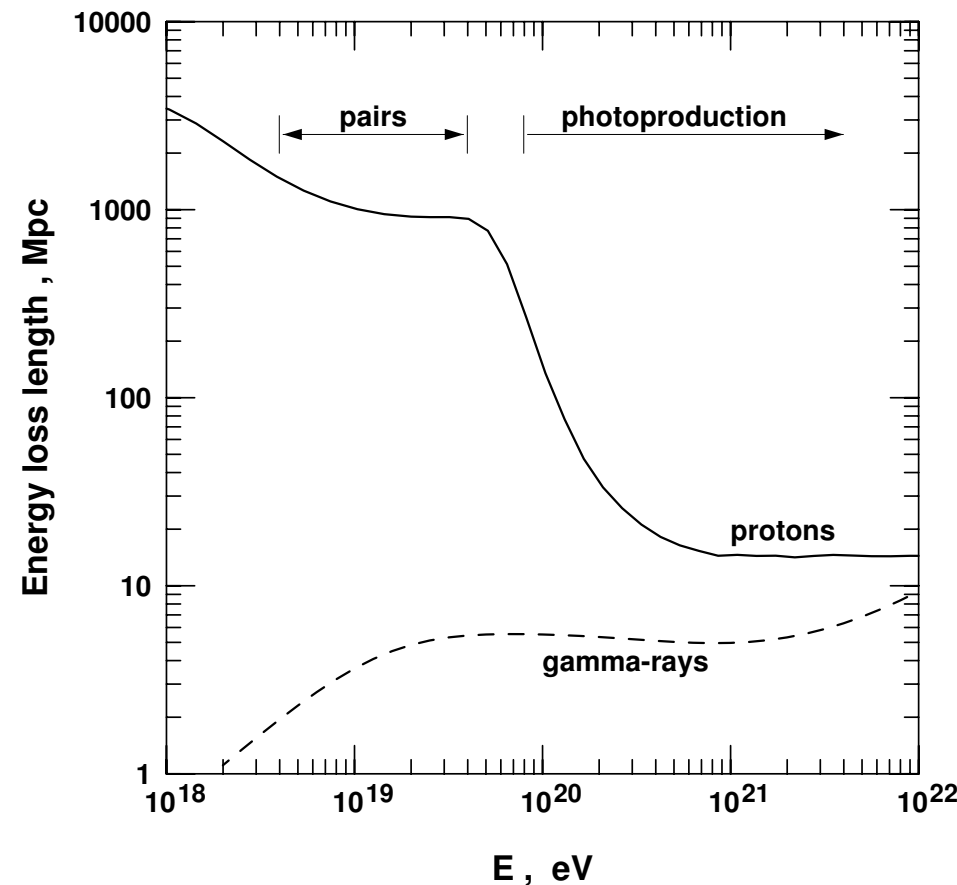
- Considerando fotoprodução de pión



Perda de energia para $p + \gamma \rightarrow p + \pi^0$

- Energia média da radiação de fundo média $\Rightarrow \varepsilon \approx 6.3 \times 10^{-4}$ eV.
- Para ter produção de pión $\Rightarrow \sqrt{s_{min}} = m_p + m_\pi^0 \sim 1.08$ GeV

$$s = m_p^2 + 2(1 - \cos \theta) E_p \varepsilon.$$
- para $\cos \theta = 0$, a energia mínima do próton deve ser $E_{min} \sim 2.3 \times 10^{20}$ eV
- Considerando interações com $\cos \theta < 0$ podemos ter energias mínimas menores.
- Perda de energia com $E_p \geq 5.10^{19}$ eV
- Inelasticidade $k_{inel} \Rightarrow$ fração de energia perdida na interação.
- Definindo $L_{loss} = \lambda/k_{inel}$ ($\lambda \Rightarrow$ comprimento de interação)

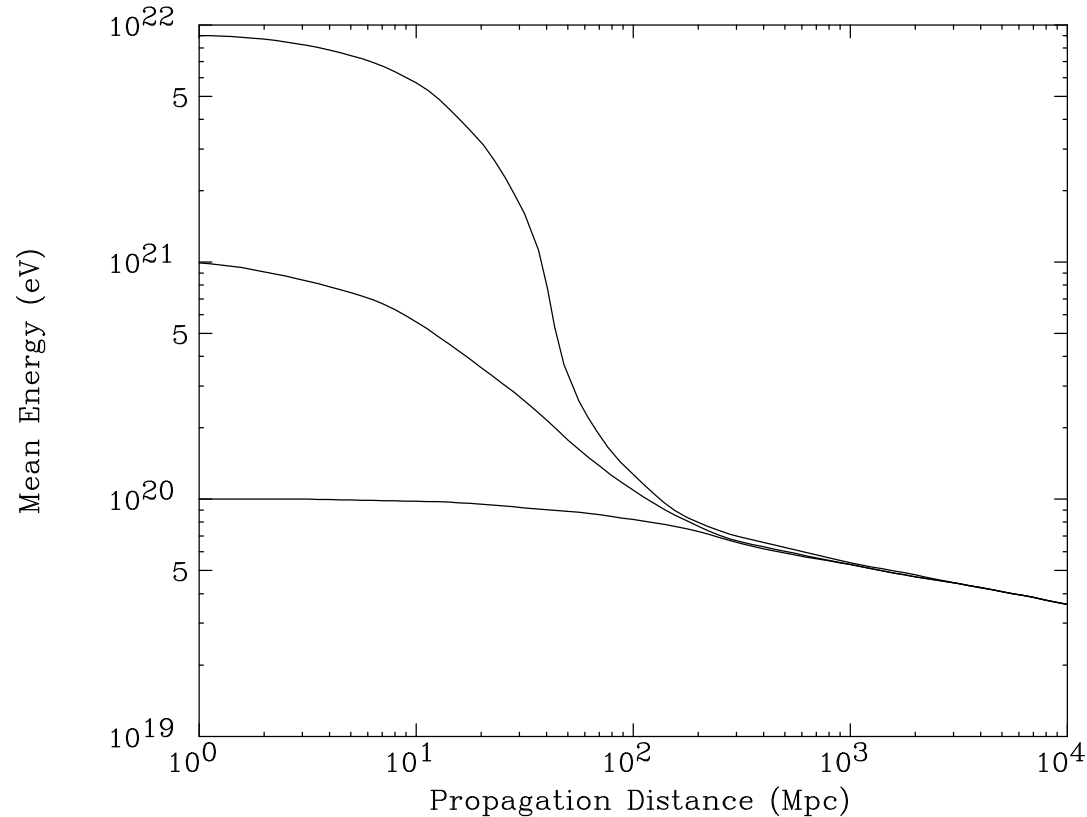


Cutoff GZK

- Perda de energia devido a interações com o CMB
- Cutoff no espectro de próton e núcleos $\approx 6 \times 10^{19}$ eV

Greisen-Zatsepin-Kuz'min (GZK) Cutoff

- Energia média dos prótons como função da distância de propagação no CMB.



- Inexistência cutoff GZK \Rightarrow origem UHECR \Rightarrow vizinhança cosmológica ~ 50 Mpc.
- Existência do GZK \Rightarrow UHECR \Rightarrow origem extragaláctica.

Cenário "Top-down" e Outras propostas

- Principais problemas com o cenário "Bottom-up">
 - Pouco objetos astrofísicos possuem campos eletromagnéticos estendidos sobre grandes regiões para acelerar prótons a extremas energias.
 - Inexistência do "cutoff" GZK implica que as fontes dos UHECR devem estar situadas dentro de uma região de ~ 50 Mpc. **Não se verifica nenhuma fonte de UHECR relacionando com as direções de chegada, nem galáctica ou extragaláctica.**
- Idéia básica cenário "Top-down":
 - Postula a existência de partículas X , com $m_X \geq 10^{12}$ eV e tempo de vida $\tau_X \geq 10^{10}$ anos.
- Outras propostas:
 - Partículas supersimétricas [P. Bhattacharjee, G. Sigl, Phys. Repts. 327, 109 (2000)].
 - Violação da Invariância de Lorentz, Modificação da relação de dispersão ("top-down" e "bottom-up") [J.R. Chisholm, E.W. Kolb, Phys. Rev. D 69, 085001 (2004).]

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$



Neutrinos de Altas Energias e Raios γ

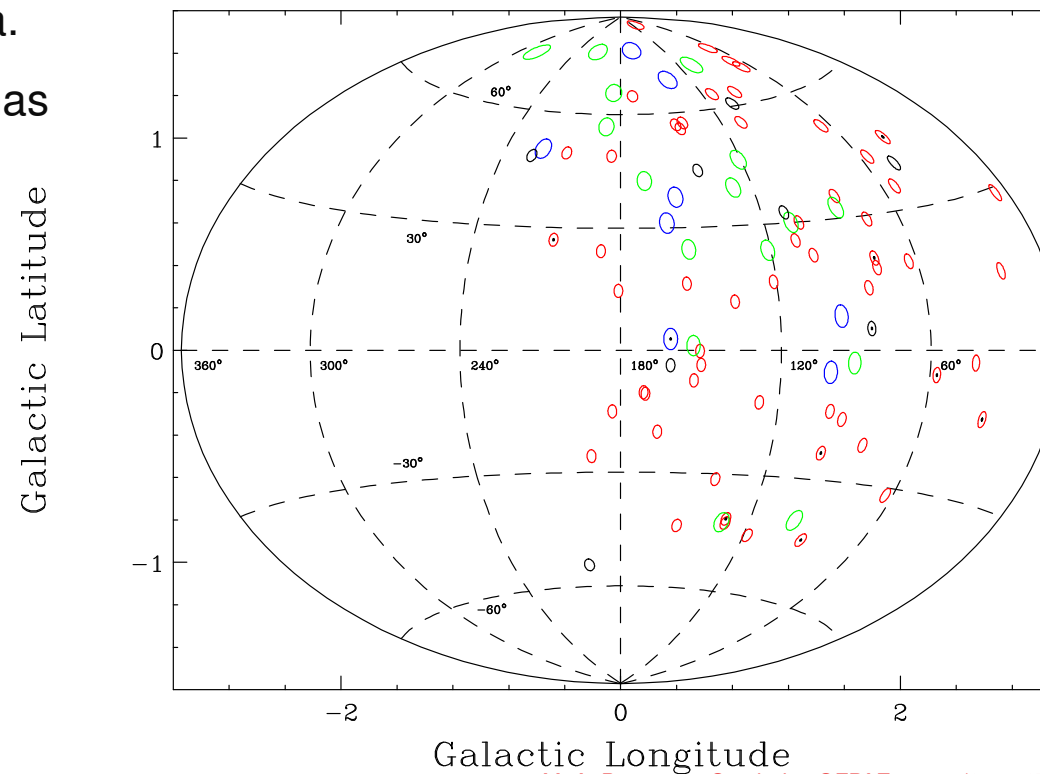
- ν 's de altíssimas energias e raios γ podem surgir do decaimento de algum processo exótico ("top-down").
- ν 's e raios $\gamma \rightarrow$ decaimento dos píons \Rightarrow GZK processes.
- ν 's podem viajar por grandes distâncias...
- Pouco provável que sejam responsáveis pelos UHECR.
- medida do fluxo \Rightarrow informações adicionais.

Raios Cósmicos Ultra-energéticos \Rightarrow $\left\{ \begin{array}{l} \text{prótons} \\ \text{núcleos} \\ \text{fótons} \end{array} \right.$

Direção de chegada

- Não existe preferência de uma grande taxa de eventos oriundos do plano da galáxia ou qualquer outra concentração astrofísica de matéria.
- Próton de 10^{19} eV num campo magnético de $1 \mu\text{G} \Rightarrow$ Raio de Larmor 10 kpc.
- $\mu\text{G} \Rightarrow$ disco da galáxia
- Campo magnético extragaláctico $\ll \mu\text{G}$.
- Direção de chegada do UHECR (próton, núcleos) \Rightarrow direção da fonte (erro de alguns graus).
- Distribuição isotrópica em larga escala.
- Distribuição não isotrópica em pequenas escalas.
- dados UHECR "isotrópico"
 \Rightarrow distribuição não isotrópica de luz a 50 Mpc da Terra.???

89 events, $E > 4 \times 10^{19}$ eV AGASA(red), Haverah(green), Yakutsk(blue), Volcar



Tentando Organizar?

- "Bottom-up" \Rightarrow Modelo Padrão:
 - UHECR composto por núcleos, prótons ou fótons são acelerados por algum objeto astrofísico.
 - Se existe "cutoff" GZK nos resultados experimentais \Rightarrow origem extragaláctica.
 - Resultados além dos GZK \rightarrow origem galáctica (**Problemas com direção de chegada**).
- Dois problemas: energia e direção**
- **Solução:** Física além do modelo padrão??

Novas Propostas

- "Bottom-up" \Rightarrow além do Modelo Padrão:
 - UHECR composto por partículas supersimétricas. pouca perda de energia na interação com CMB. Produzidas como partículas secundárias na fonte ou na propagação de partículas conhecidas.
 - UHECR são nucleons e/ou raios γ produzidos dentro do limite GZK de distância através de interação de neutrinos de altas energias com neutrinos do background. Exige alguma espécie de neutrino com massa \sim eV.
 - UHECR são nucleons, porém alguma modificação nas leis fundamentais é permitida, por exemplo uma pequena violação invariância de Lorentz. Esta violação elimina (ou desloca) o "cutoff" GKZ e nucleons podem ser oriundos de fontes extragalácticas.

Tentando Organizar??

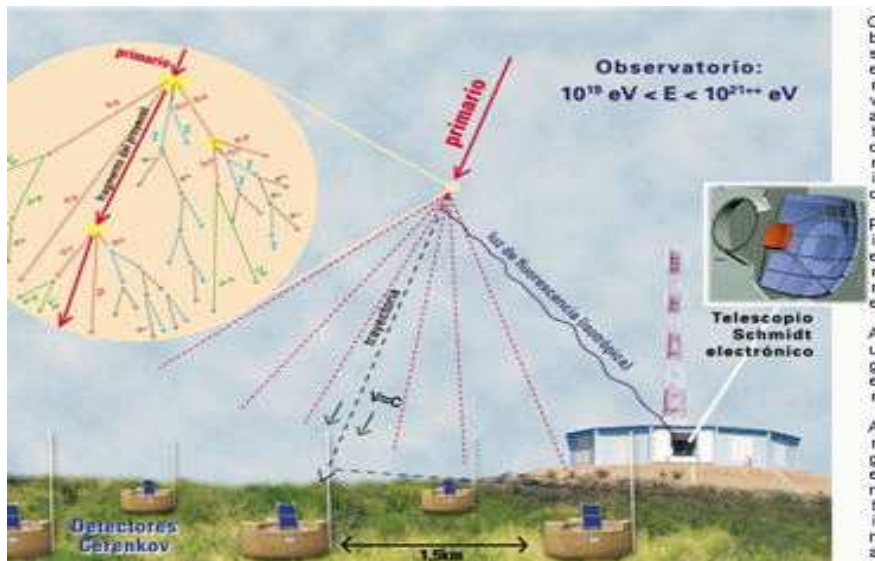
- "Top-down"
 - As partículas X foram produzidas por colapso, aniquilação, ou outro processo envolvendo sistemas cosmológicos com defeitos topológicos tal como,
 - cordas cósmicas,
 - monopólos magnéticos,
 - cordas cósmicas supercondutoras.
 - Produzidas na fase de quebra de simetria da evolução do Universo. Neste caso as partículas tem mass tão grande quanto a escala GUT $\sim 10^{16}$ GeV.
 - "Top-down"
- Partículas X são reliquias, supermassivas e metaestáveis,
 - massa $\geq 10^{12}$ GeV,
 - tempo de vida comparável a idade do Universo.
- Produzidas no estágio de expansão do Universo de redução de partículas por inflação, são candidatas a matéria escura fria do Universo. O decaimento destas partículas pode explicar a não existência do "cutoff" GZK nos dados recentes (que veremos posteriormente).

Métodos de Detecção

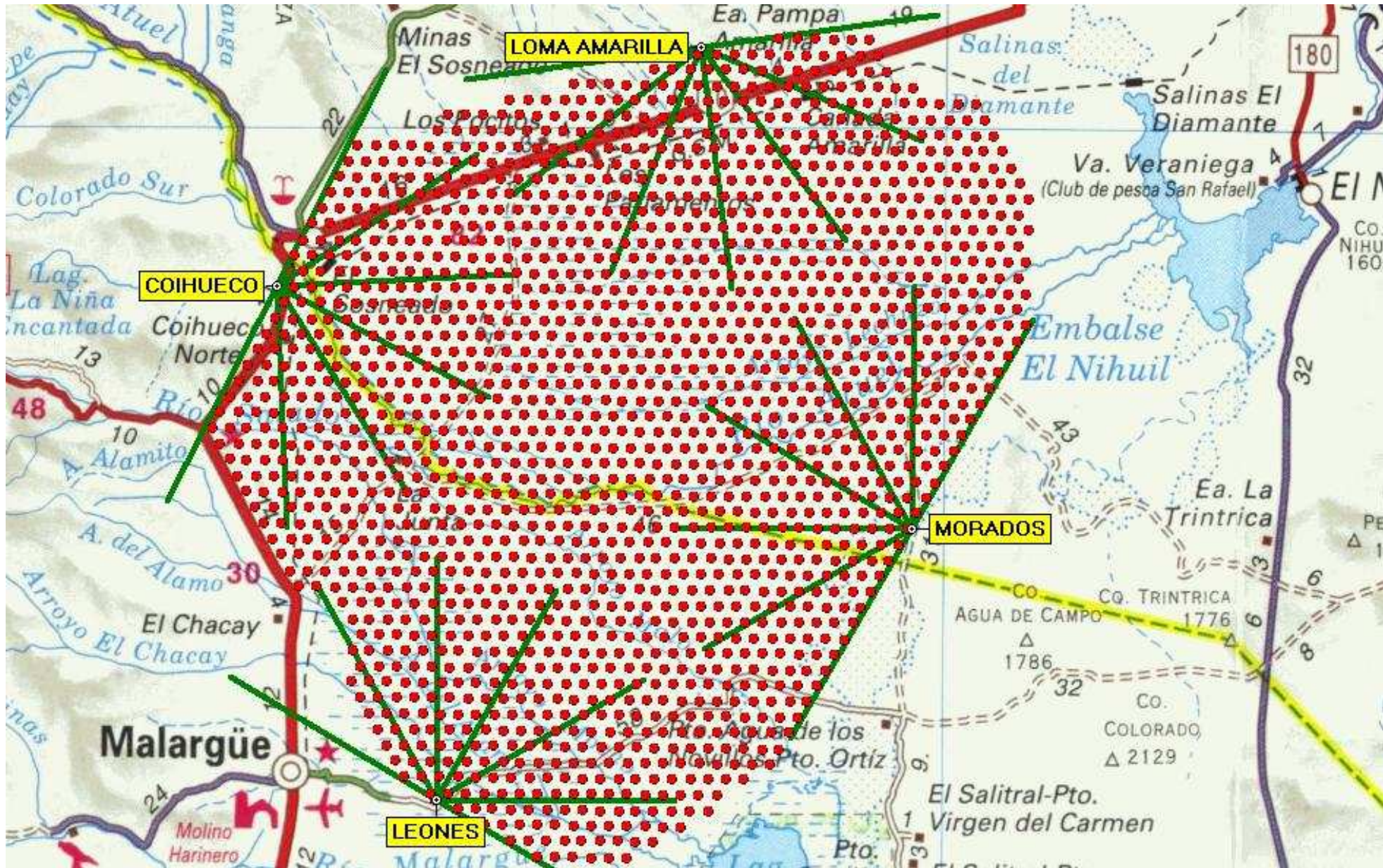
- $E < 10^{14}$ eV \Rightarrow detecção direta por balões ou satélites.
- $E > 10^{15}$ eV \Rightarrow baixo fluxo (não é possível detecção direta).
- Usa-se a atmosfera como calorímetro:
 - Chuveiro registrado por detectores na superfície da Terra;
 - Medida da luz Cherenkov produzida por partículas na atmosfera;
 - Traçado da luz fluorescente emitida quando o chuveiro excita moléculas de nitrogênio no ar.

Observatório Pierre Auger

- Projetado para medir raios cósmicos com energias acima de 10^{18} eV:
 - Fluxo;
 - Distribuição de direção de chegada;
 - Composição.
- Projeto prevê instrumentos em ambos hemisférios.
- 3000 km² por sítio.
- 1600 detectores Cherenkov no solo distanciados 1,5 km (900 coletando dados e 200 já montados).
- 4 estações de detectors de luz fluorescente com 6 telescópios cada (3 estações coletando dados).
- **Detector híbrido.**

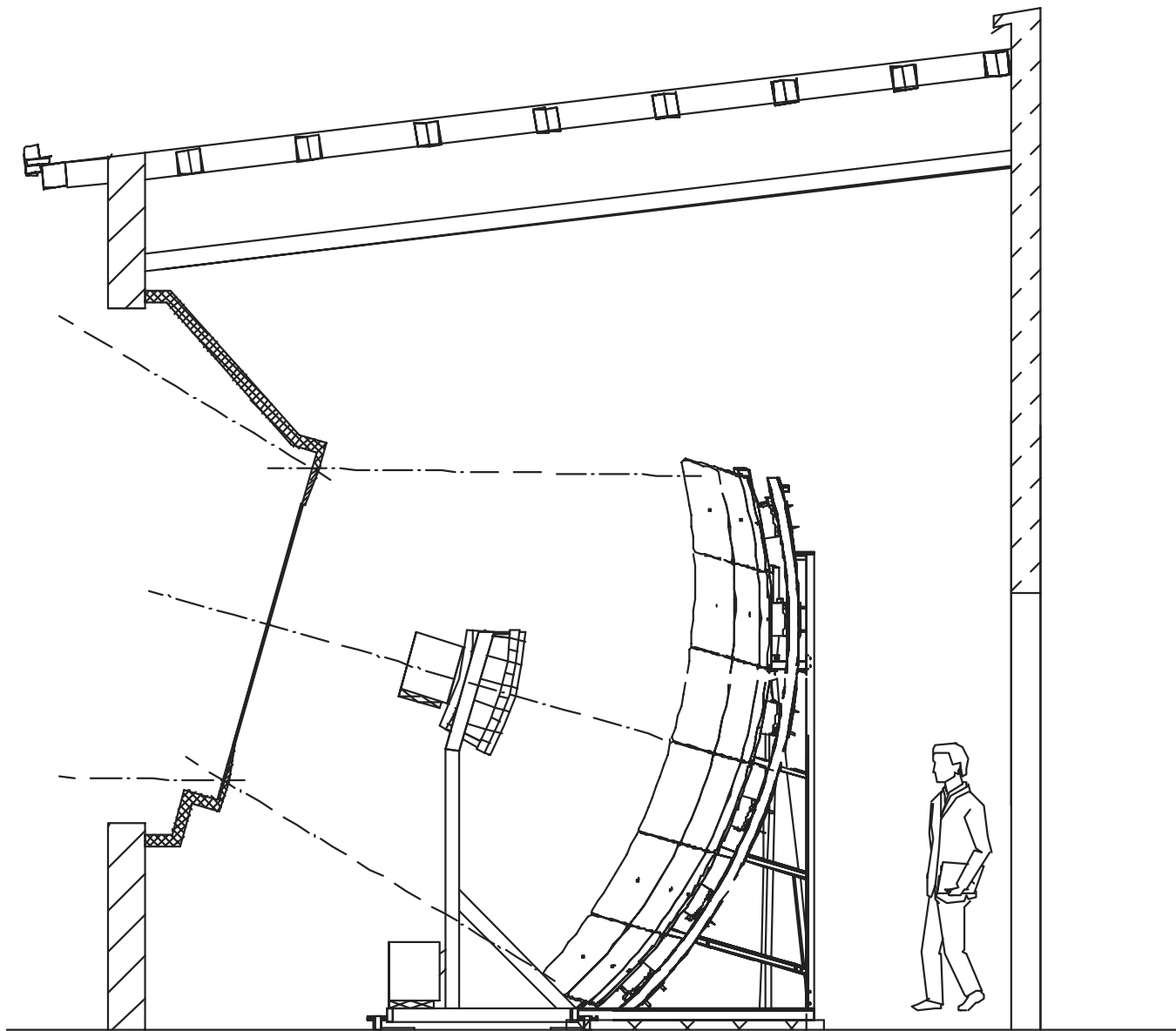


Estrutura do Observatório



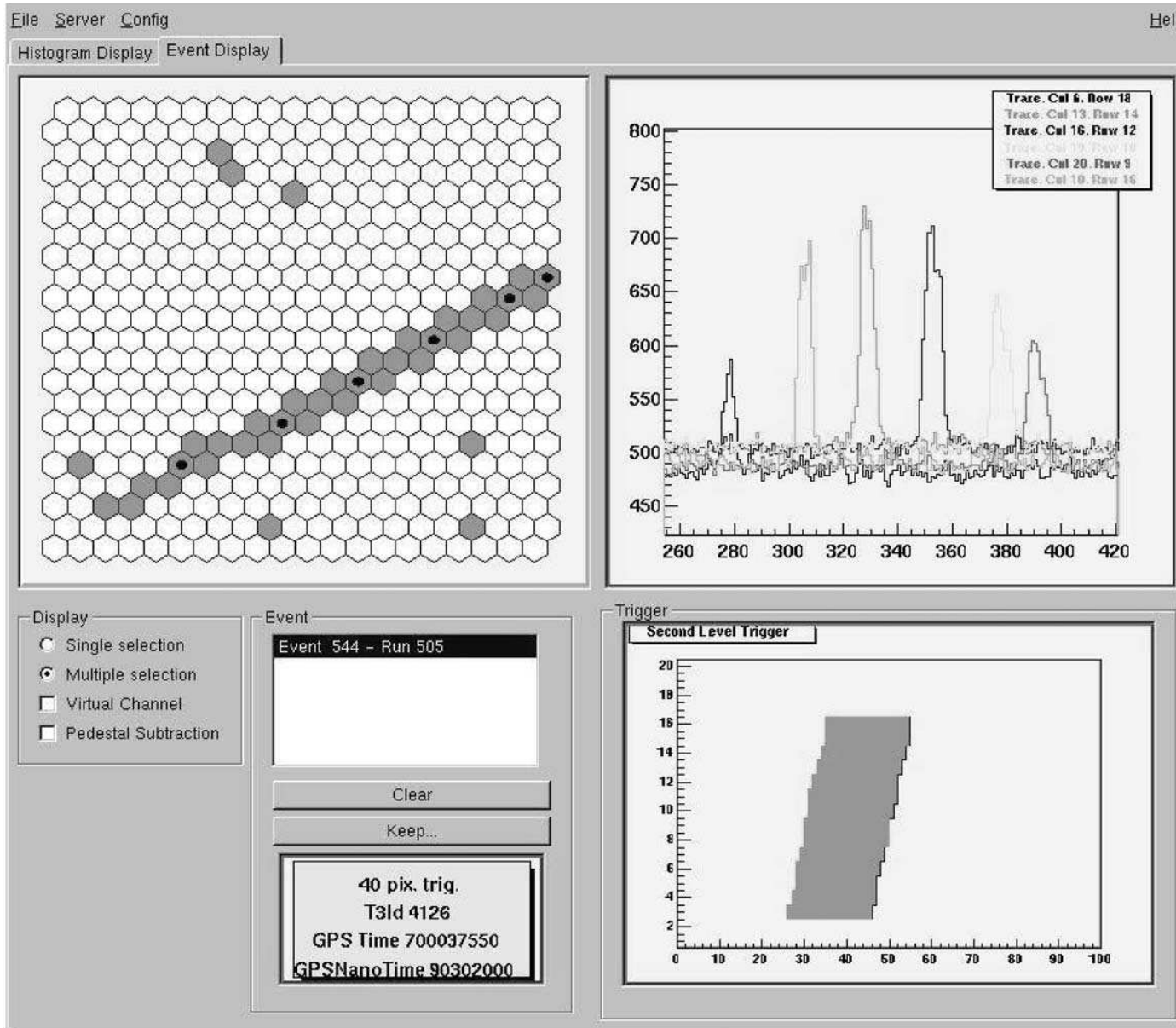
Detector de Fluorescência

- Detecção de fótons ultravioletas fluorescentes





Detector de Fluorescência



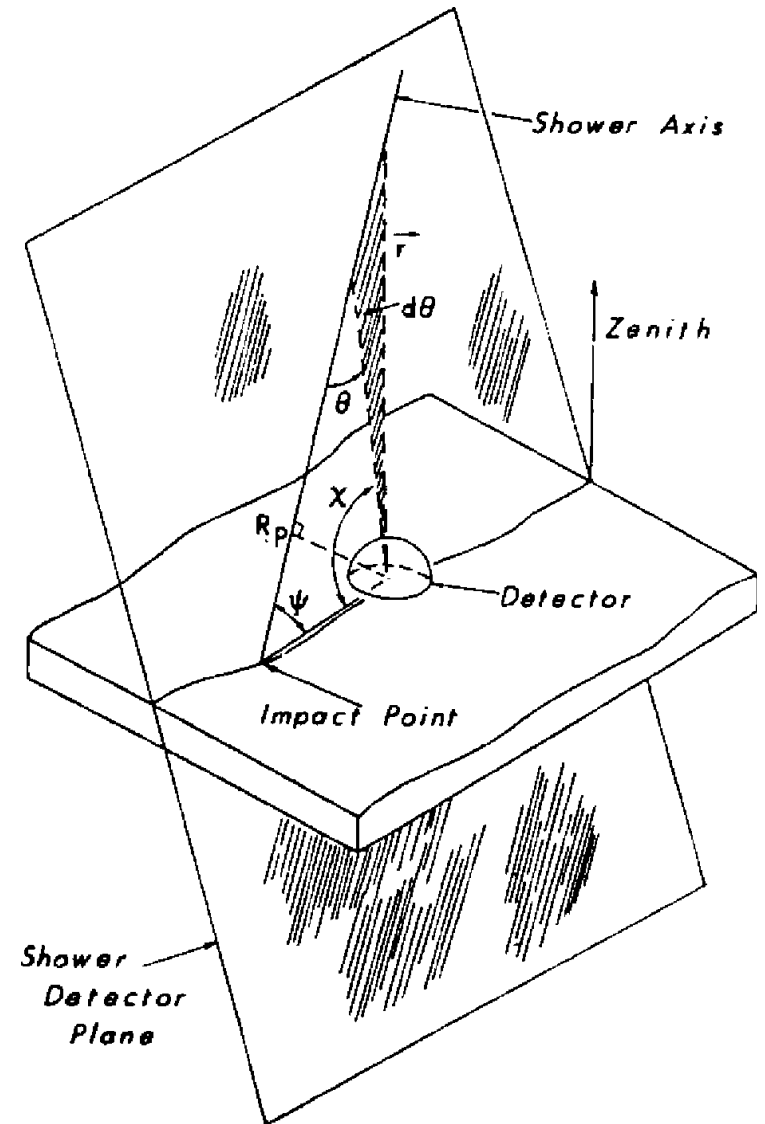
Geometria Detector de fluorescência

$$t_i - t_0 = \frac{R_p}{c} \tan \left(\frac{\theta_i}{2} \right)$$

$$\theta_i = \pi - \psi - \chi_i$$

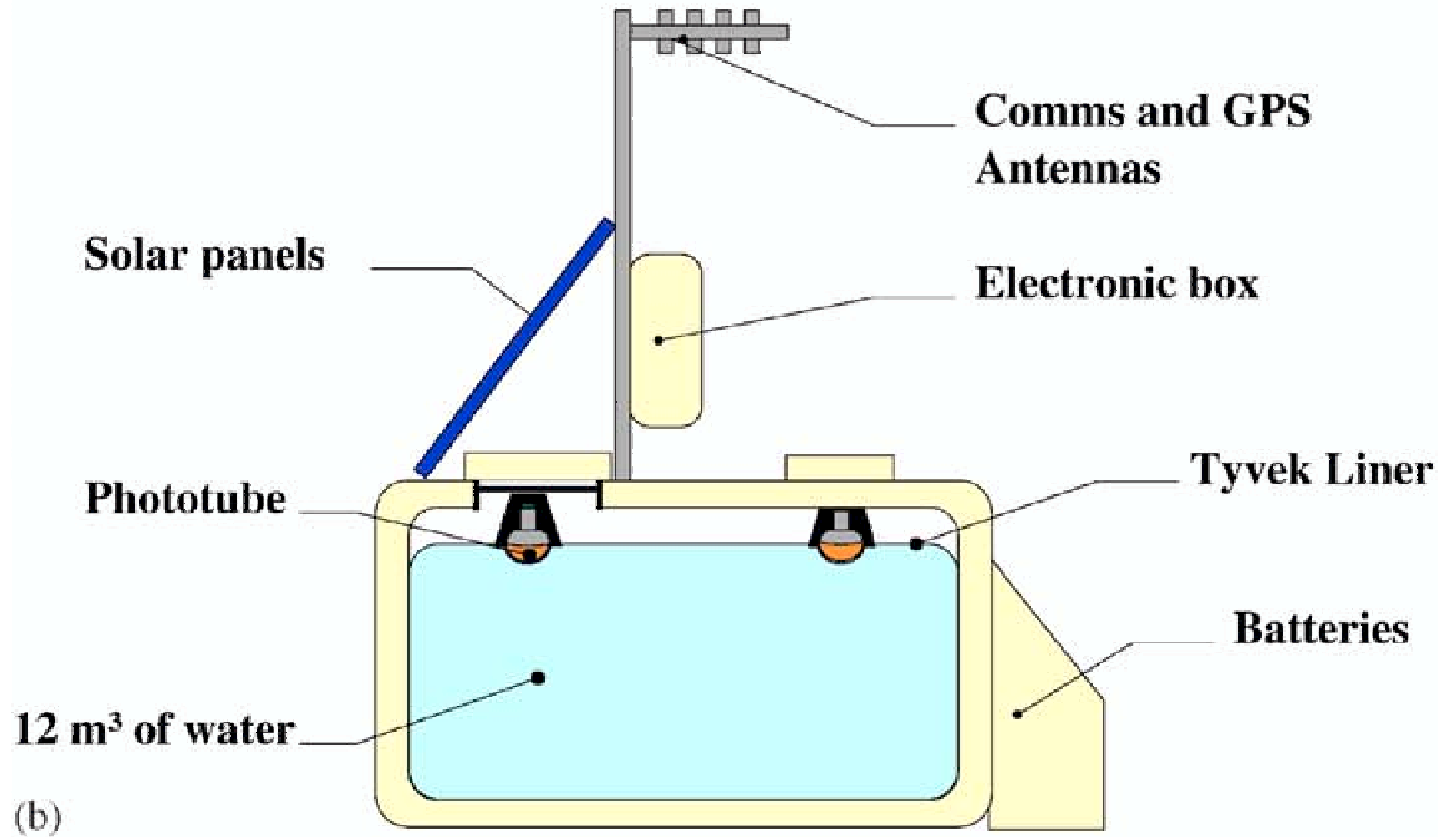
$$N_\gamma = N_e Y_\gamma \frac{\Delta L}{4\pi r^2} \exp \left(\frac{-r}{r_e} \right) A,$$

- Y_γ eficiência de fluorescência do ar
- r distância ao fotomultiplicador
- r_e comprimento de extinção do fóton
- A área óptica do espelho



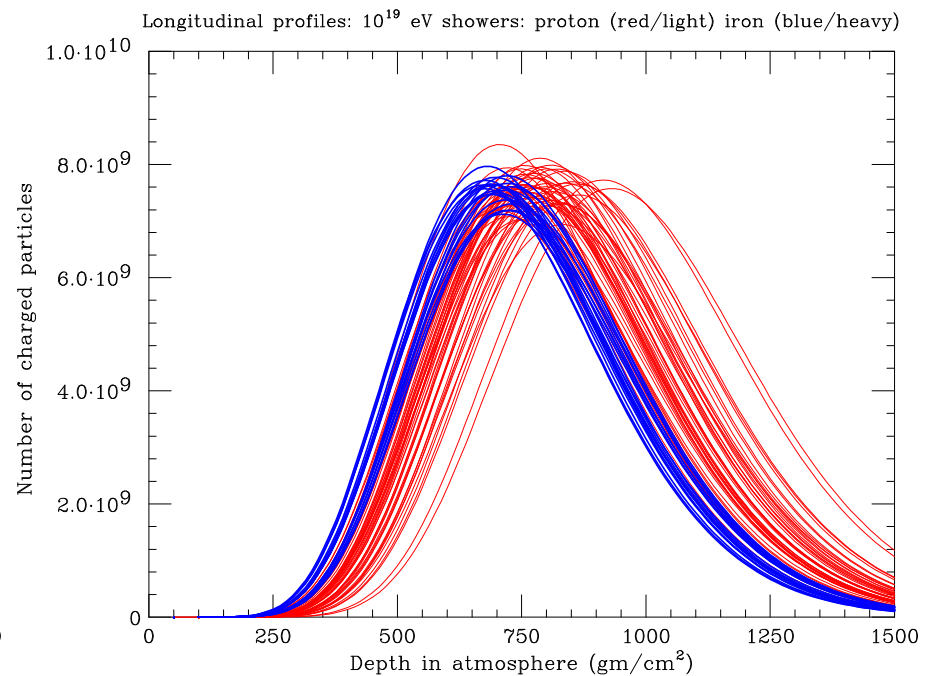
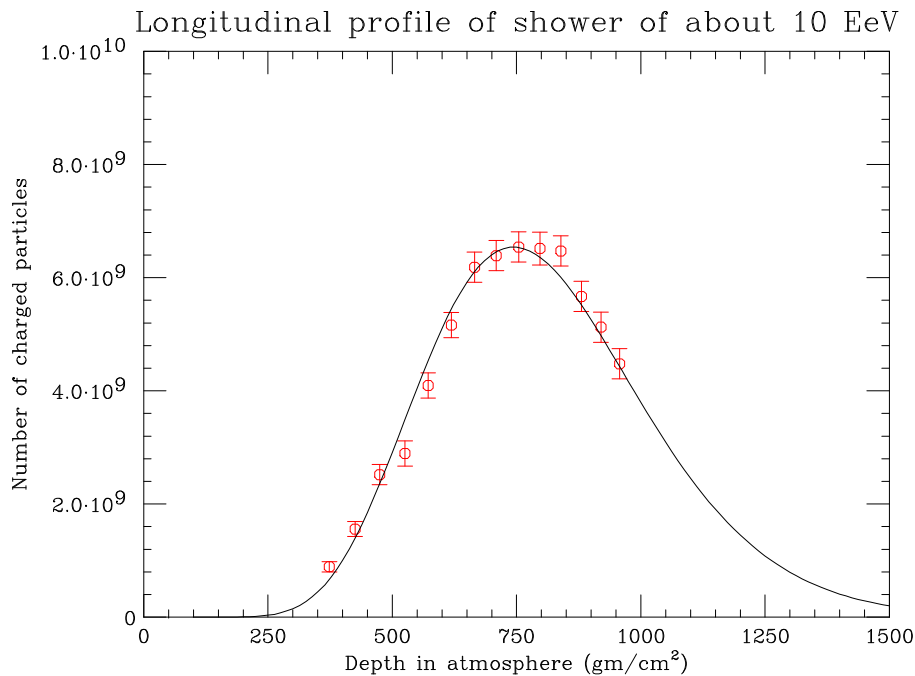
Detector de Partículas Carregadas

● Detector Cherenkov

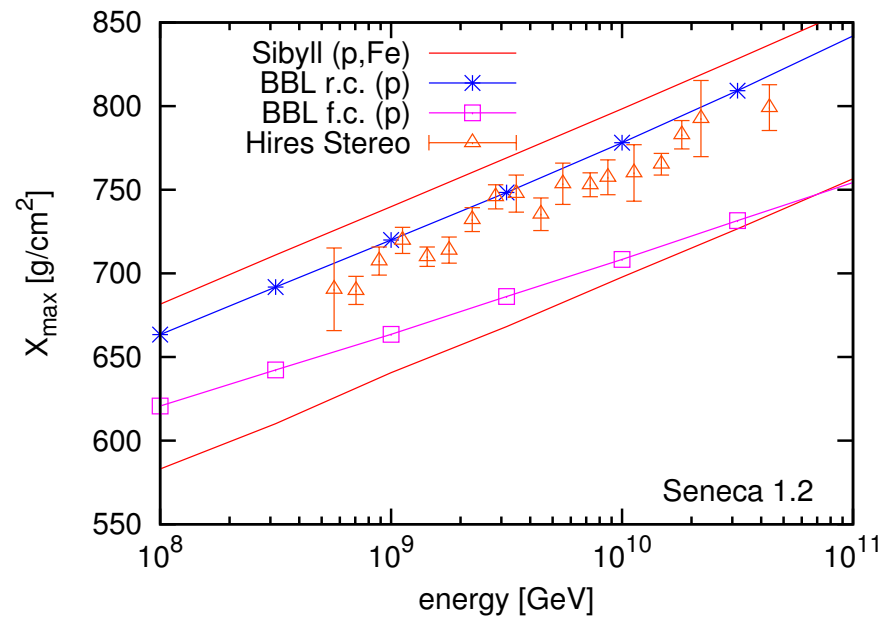
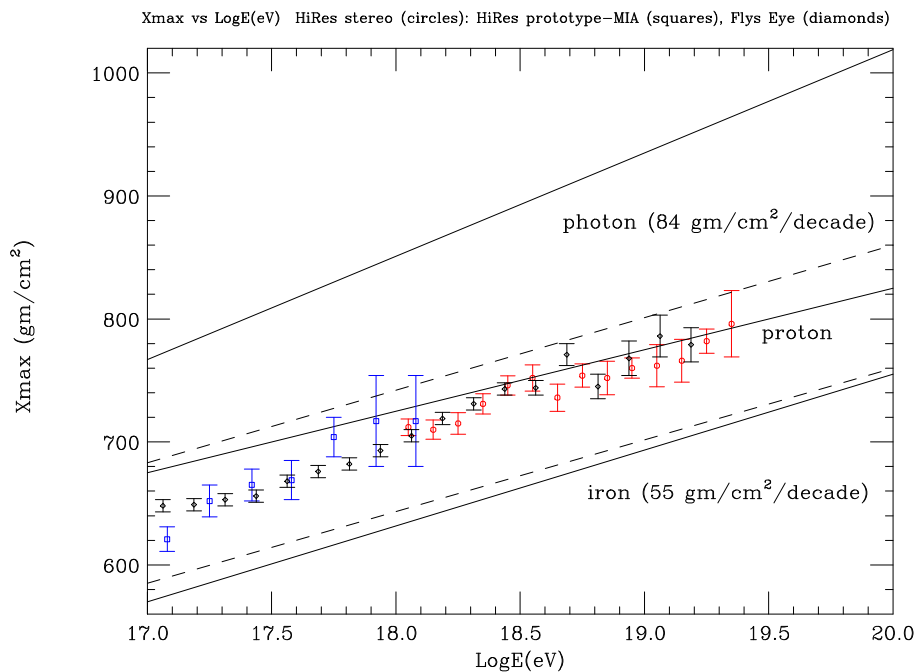


Constituição dos Chuveiros

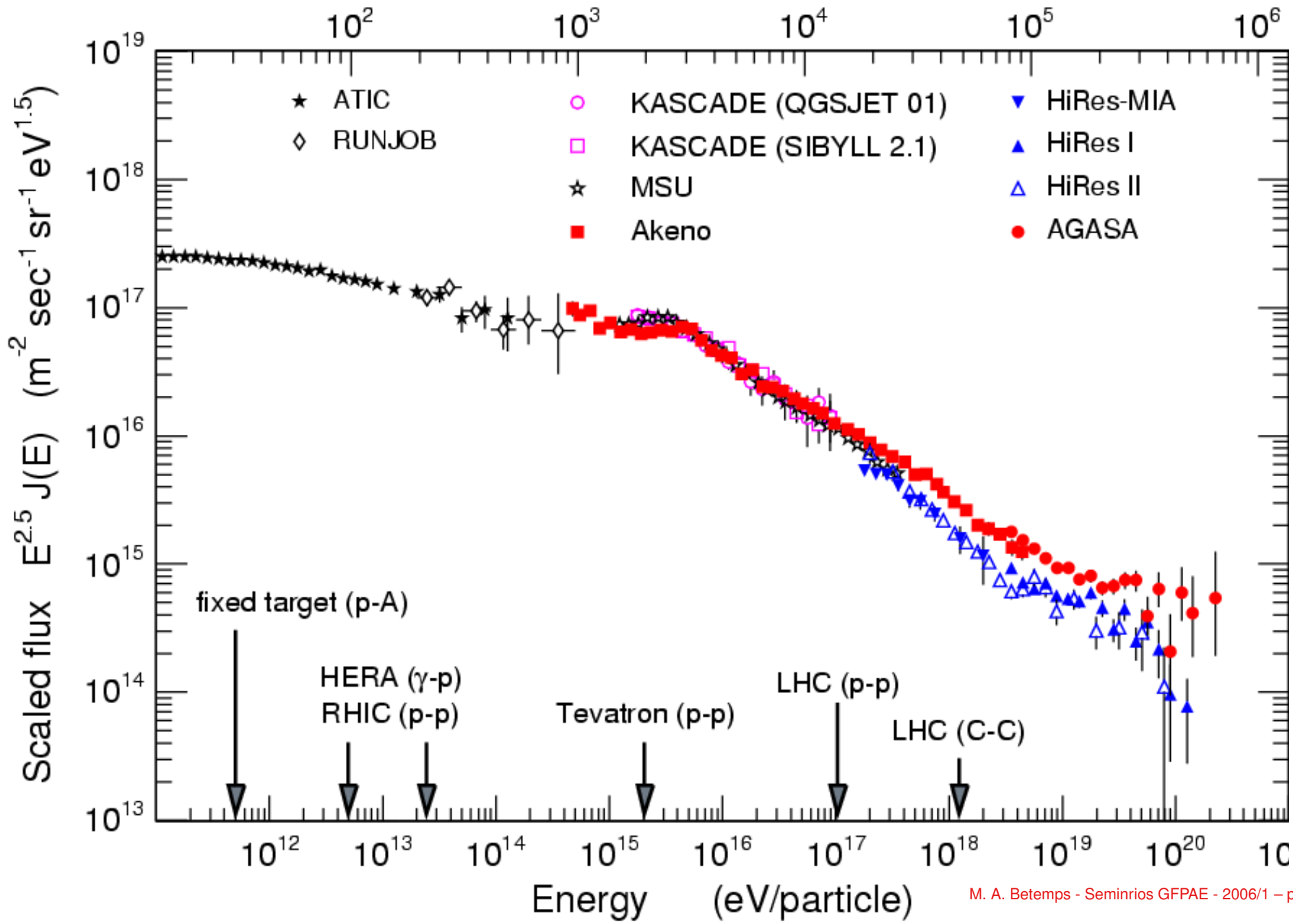
- Como diferenciar chuveiros iniciados por núcleos, prótons ou elétrons??
- X_{max} é a profundidade na atmosfera onde o perfil do chuveiro partônico atinge seu máximo.
- Utilizar conhecimentos de laboratório para simular evolução do chuveiro.



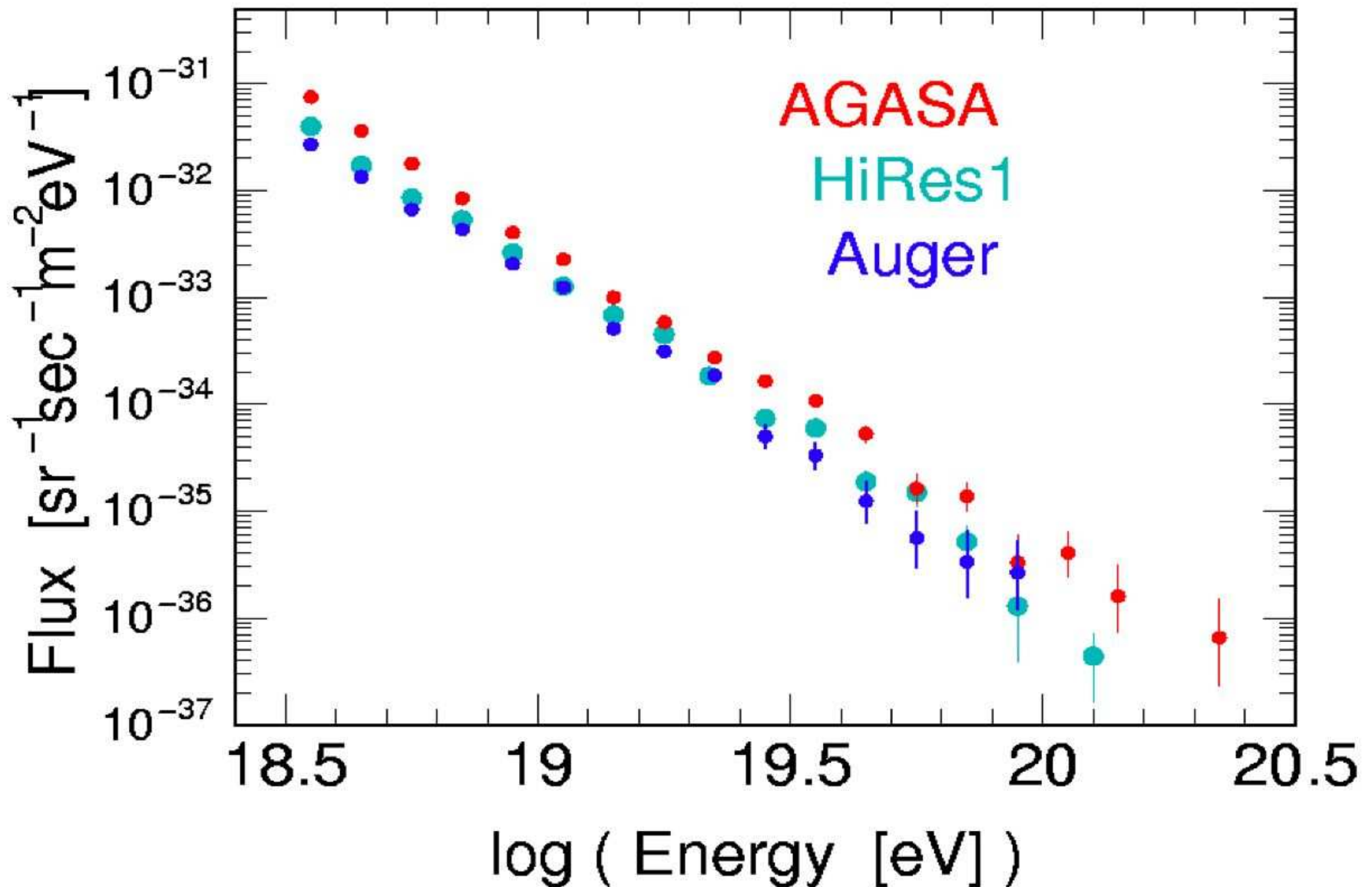
Máximo do chuveiro X_{max}



Resultados Experimentais



Resultados Experimentais Auger





Conclusões

- Não podemos identificar fontes.
- Simulações sugerem UHECR compostos de prótons.
- Resultados de Auger ainda não esclarecem a questão

GZK "Cutoff"?



Bibliografía

- T. Stanev, SLAC Summer Institute on Particle Physics (SSI04), 2004.
- P. Bhattacharjee, G. Sigl, Pjys. Repts. 327, 109 (2000).
- A.V. Olinto, Phys. Repts, 333-334, 329 (2000).
- J.W. Cronin, Nucl. Phys. B (Nucl. Suppl.) 138, 465 (2005).