

Física de Partículas sem Aceleradores (artificiais)

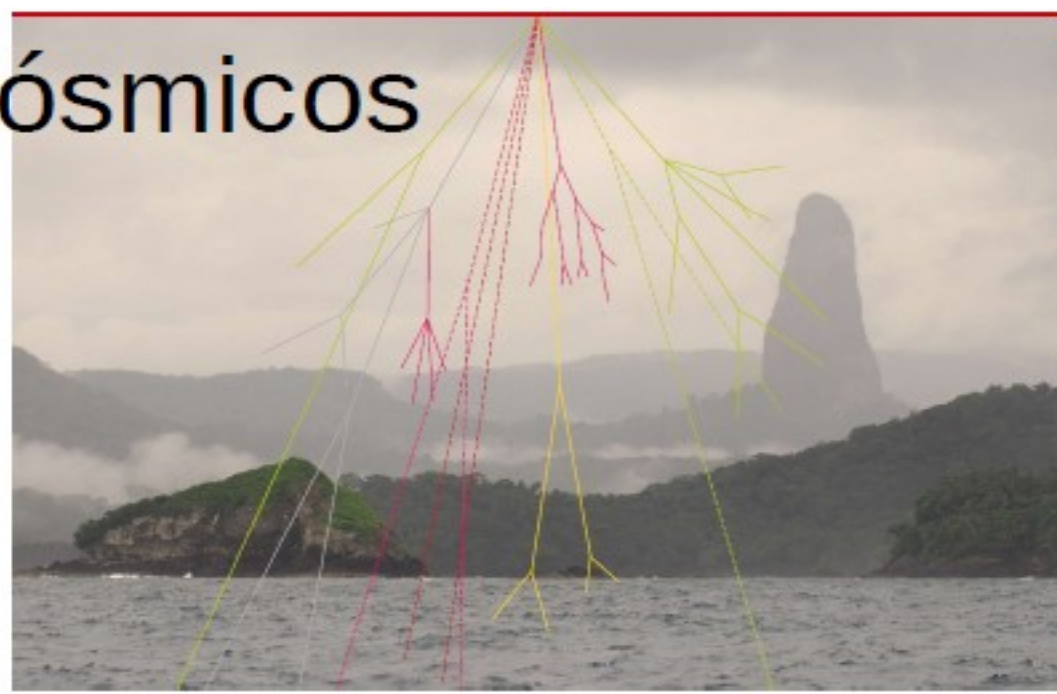
Física de Partículas com fontes naturais

Centenário dos Raios Cósmicos

100 anos de raios cósmicos

1910, D. Pacini – diminuição da radiação com a profundidade

1912, V. Hess – aumento da radiação com a altitude



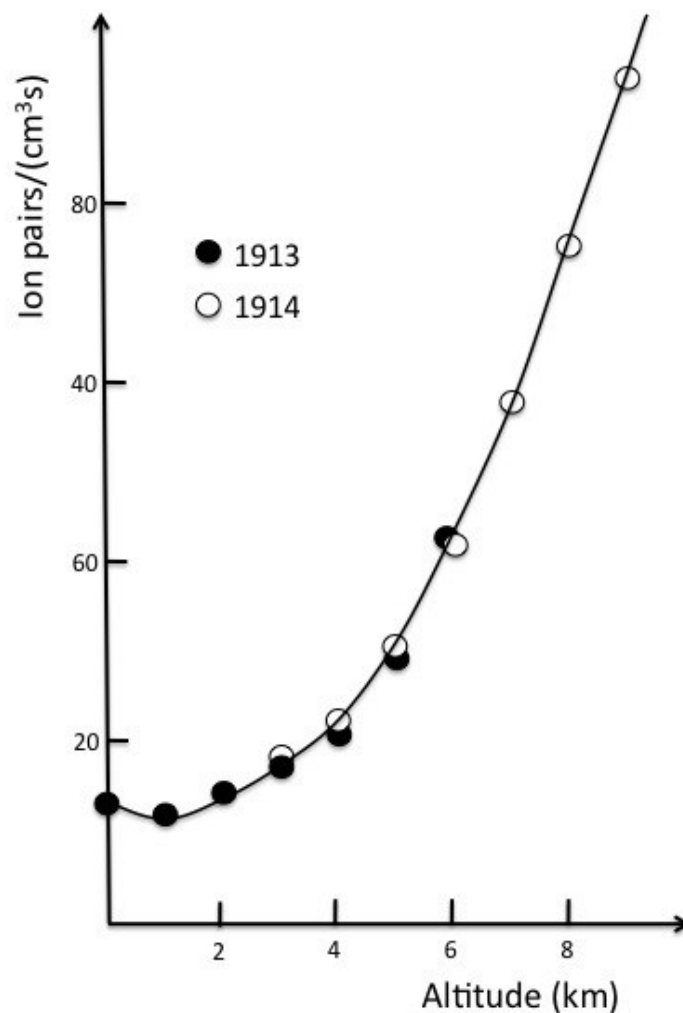
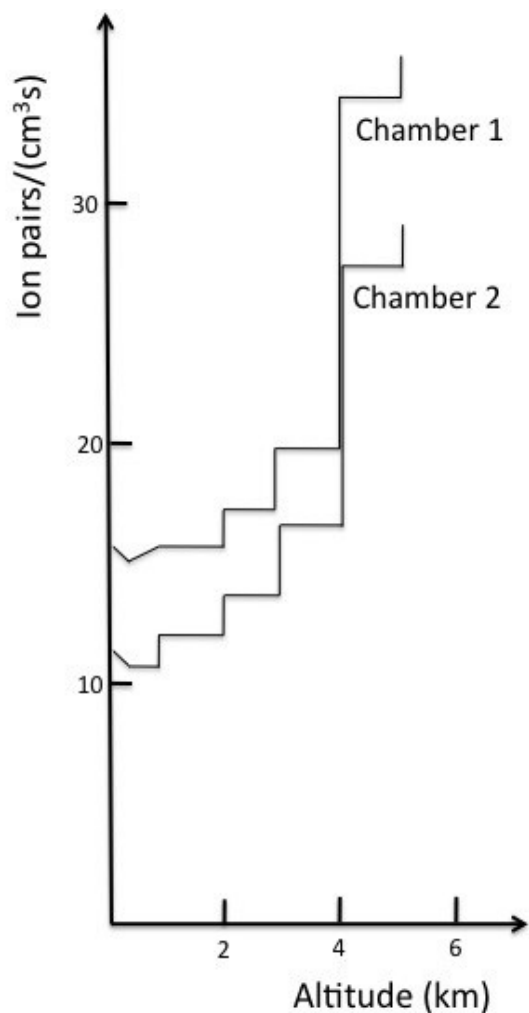
A atmosfera (e a água) absorvem estas partículas carregadas...

De onde vêm? O que são?

Origem da Física de Partículas
(positrão, muão, pião, quark-c)

100 anos de raios cósmicos

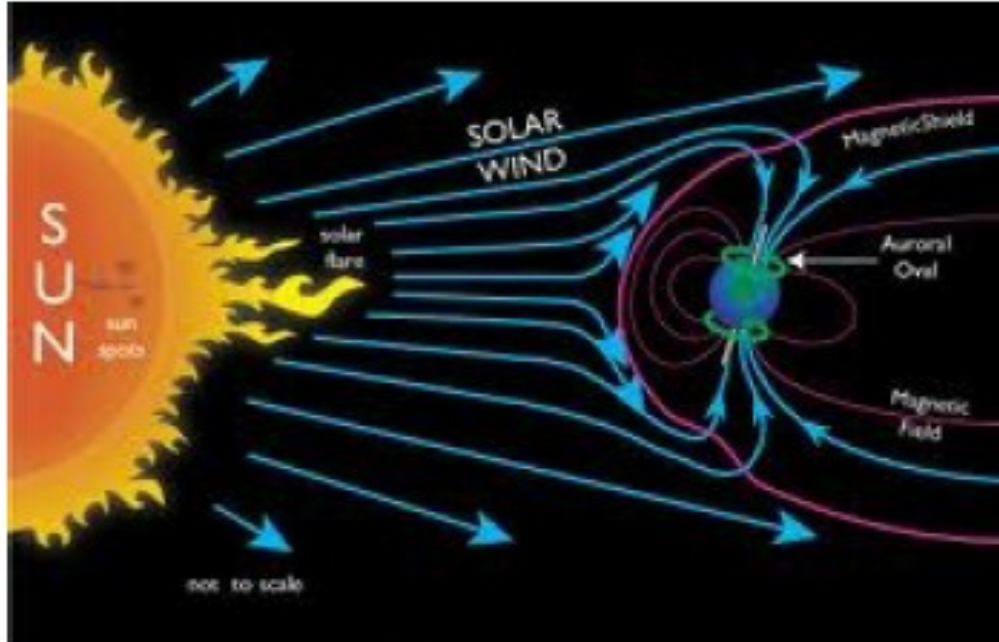
1912, V. Hess – aumento da radiação com a altitude, medida desde nível do mar à latitude do centro da Europa, igual de dia, de noite e durante um eclipse solar...



Radioatividade natural terrestre só domina no primeiro 1 km

**aviões ~10 km
balões ~50 km
satélites ~100 km**

Partículas do Sol e outras estrelas



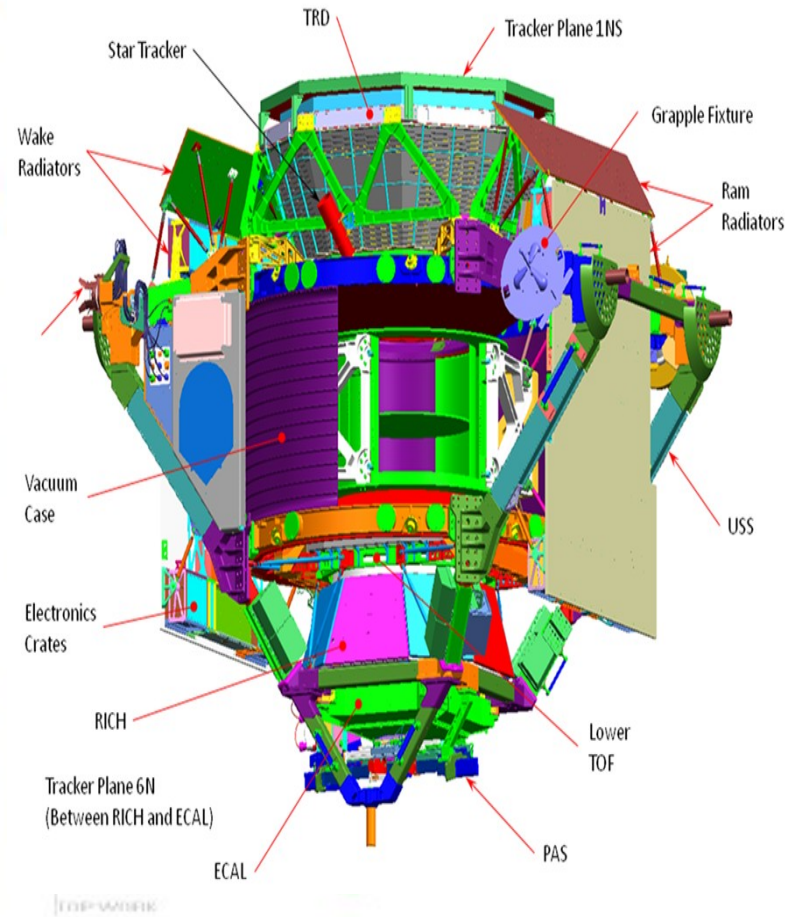
Partículas carregadas são desviadas pelo campo geo-magnético e "detetadas" nas auroras boreal e austral (neutrões chegam antes a toda a Terra)

Raios cósmicos de maiores energias chegam a toda a Terra, mas só podem ser precisamente identificados no espaço



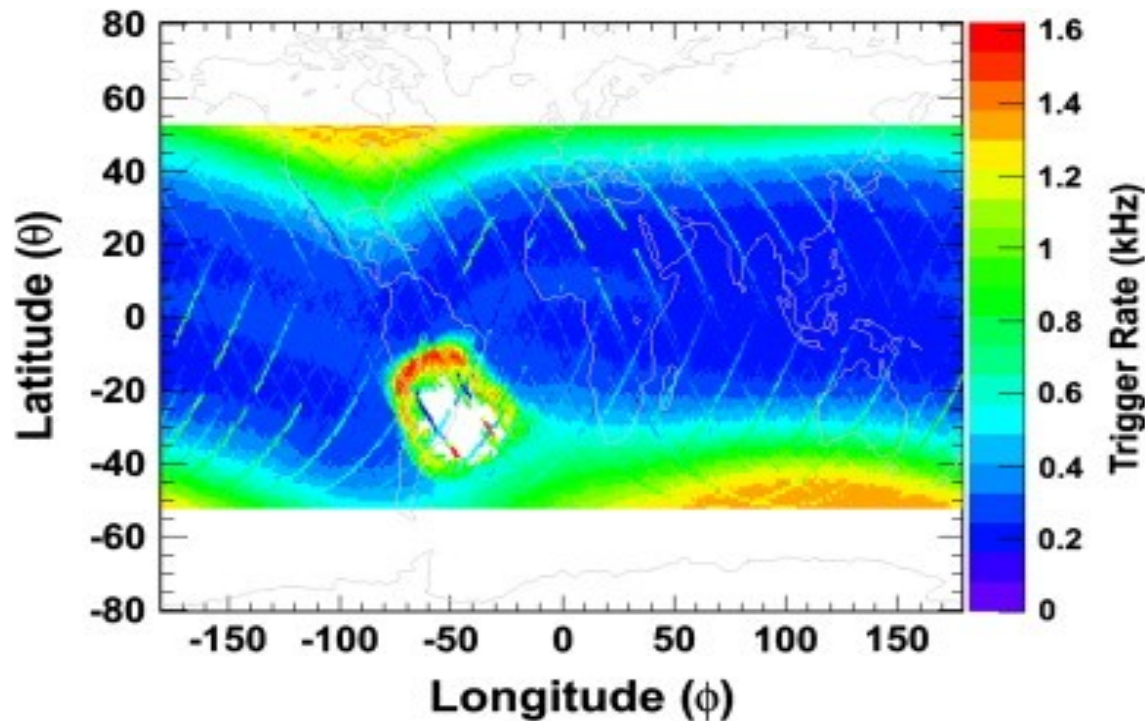
Detecção de raios cósmicos no Espaço

dos balões à estação espacial internacional



Instalado na ISS em Maio 2011, o AMS – Alpha Magnetic Spectrometer é um detector complexo em camadas para identificar todo o tipo de partículas: electrões e positrões, prótons e anti-prótons, núcleos e anti-núcleos para procura de anti-matéria, vinda de anti-estrelas ou sinal de matéria escura

Um detetor de partículas no espaço: AMS02



Instalado há um ano na ISS,
recolheu já $> 10^{10}$ partículas
(mais que todas as anteriores)

A funcionar desde o 1o dia,
ficará até ~2020 na ISS,
e já não voltará à Terra

- Além dos testes em feixe no CERN, o detetor foi testado para resistência à turbulência, choque e amplitude térmica pela NASA e ESA
- O fluxo de cada tipo de partícula depende da latitude magnética e dos ventos solares, de acordo com a sua rigidez (momento/carga elétrica)
- É um detetor de típico da Física de Partículas, para questões na fronteira com a Astrofísica e Cosmologia: "detetor de Astropartículas"

Busca de Matéria Escura

Matéria "luminosa" normal não explica rotação das estrelas nas galáxias:
~75% da sua massa total é "escura"

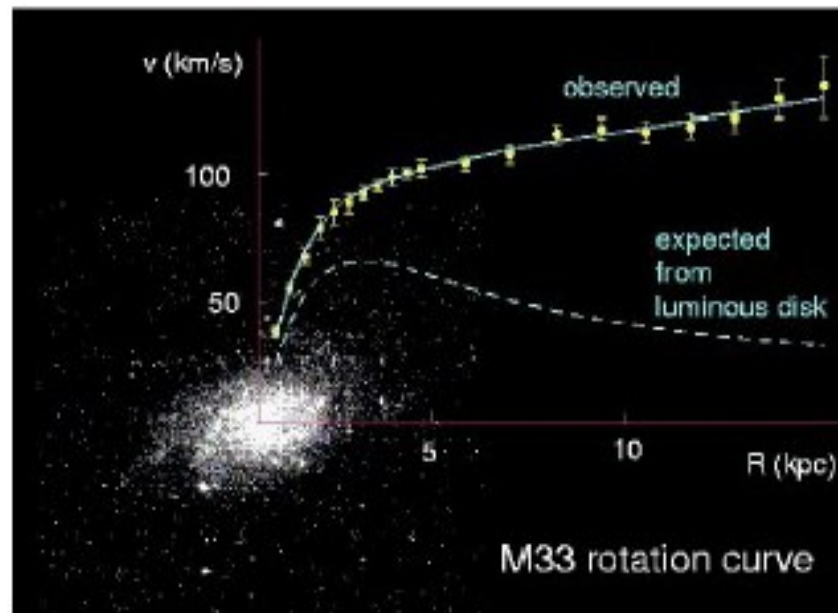
Novas partículas?

Apenas com interação gravítica?

Com interação fraca? Ou outras?

Difíceis de detetar diretamente,
mas $X \rightarrow e^+ e^-$?

Excesso de positrões
poderia ser um sinal...



Poderiam ser
produzidas no LHC?

Busca de Anti-Matéria

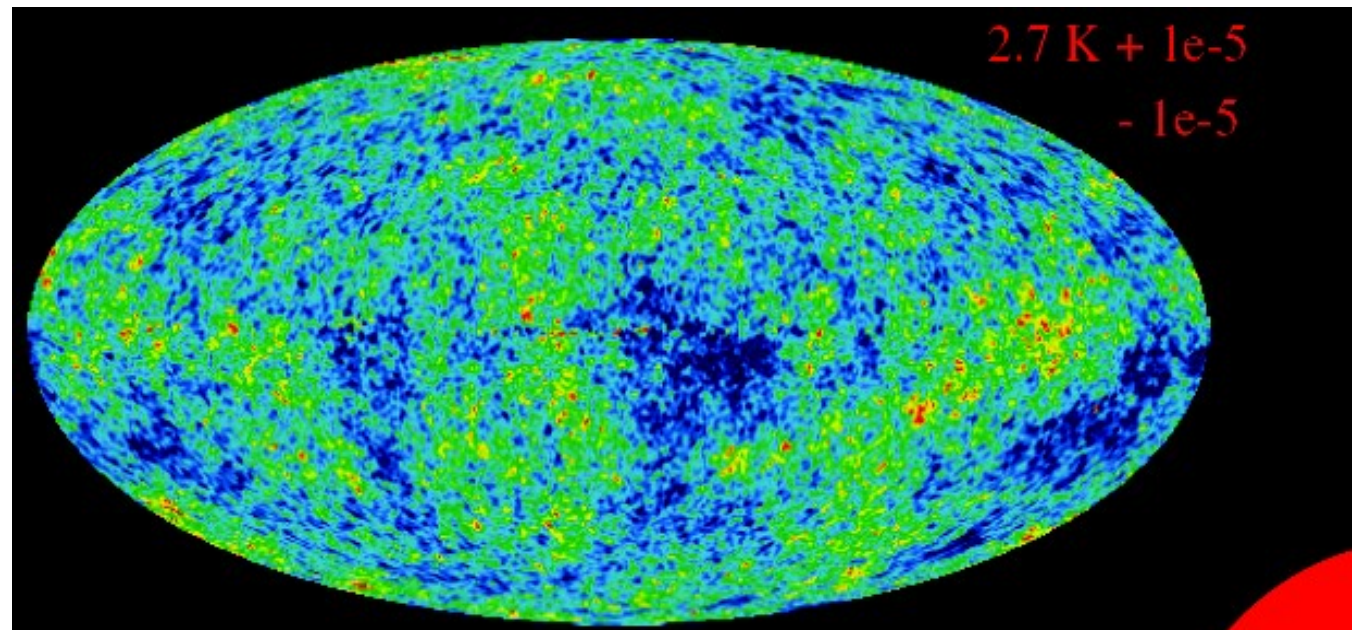
Em toda a Natureza vemos matéria
(e anti-matéria produzida por pouco tempo)

Mas em laboratório a anti-matéria
é (quase) igual: procuramos desvios
em LHC-b ou nos átomos de anti-H, anti-He



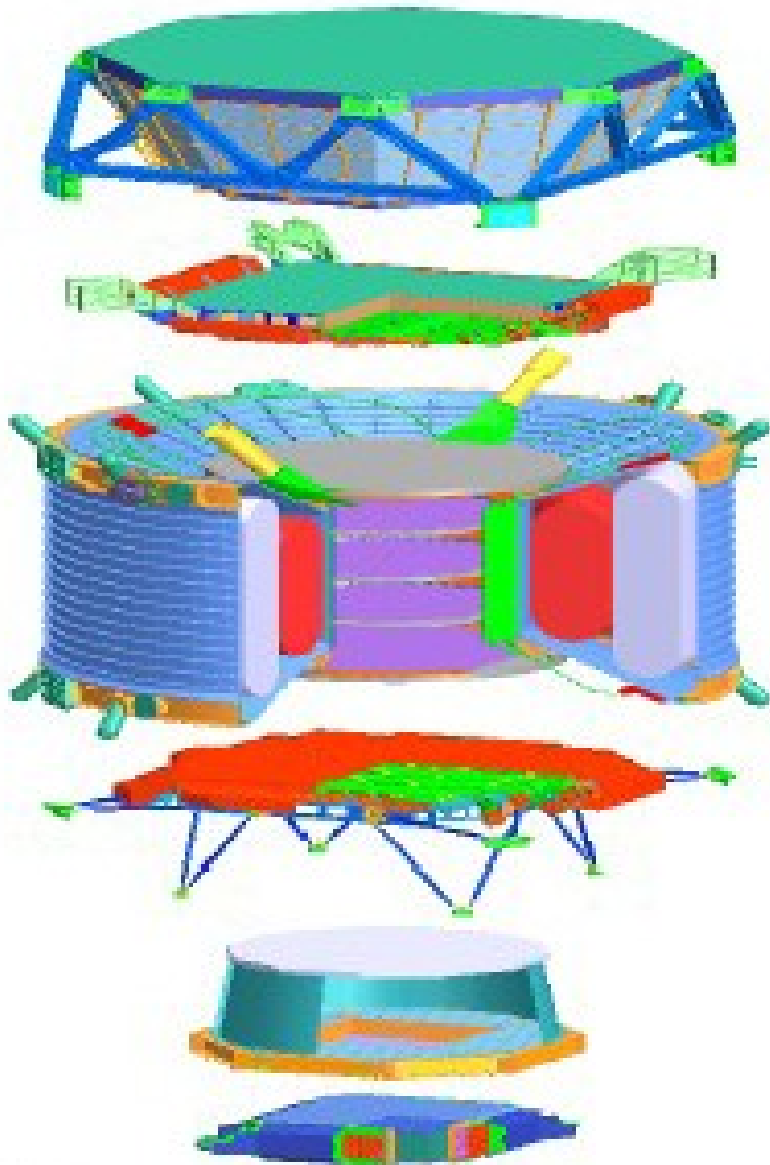
A anti-matéria produzida no BigBang
Foi toda aniquilada?

Ou concentrou-se
em regiões de
anti-estrelas e
anti-galáxias?



Um detetor de partículas no espaço: AMS02

**3 m diâmetro x 1 m altura:
~10 GeV a ~10 TeV**

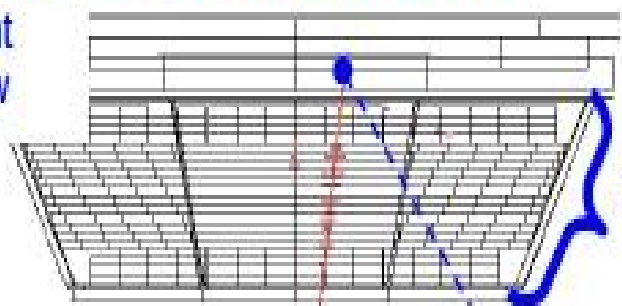


- GPS e "Star Tracker"
- Campo Magnético (0.125 T)
- TRD (leptões/hadrões)
- 2xTOF ("time of flight: trigger")
- 8 planos de Detetor de Traços
- RICH – "Ring Image Cherenkov"
- Calorímetro electromagnético

Electrons and Positrons of high energy in AMS

1.03 TeV electron

front view



TRD: identifies electron

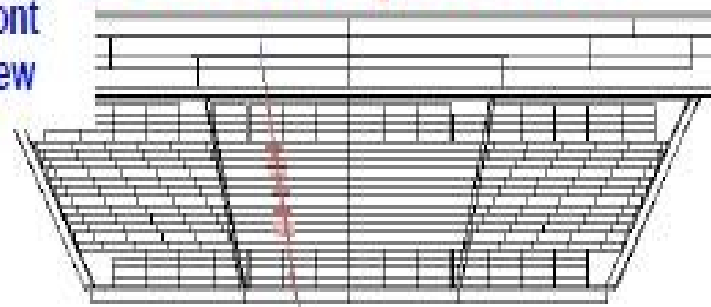
Tracker and Magnet: measure momentum

RICH charge of electron

ECAL: identifies electron and measures its momentum

205 GeV positron

front view



TRD: identifies electron

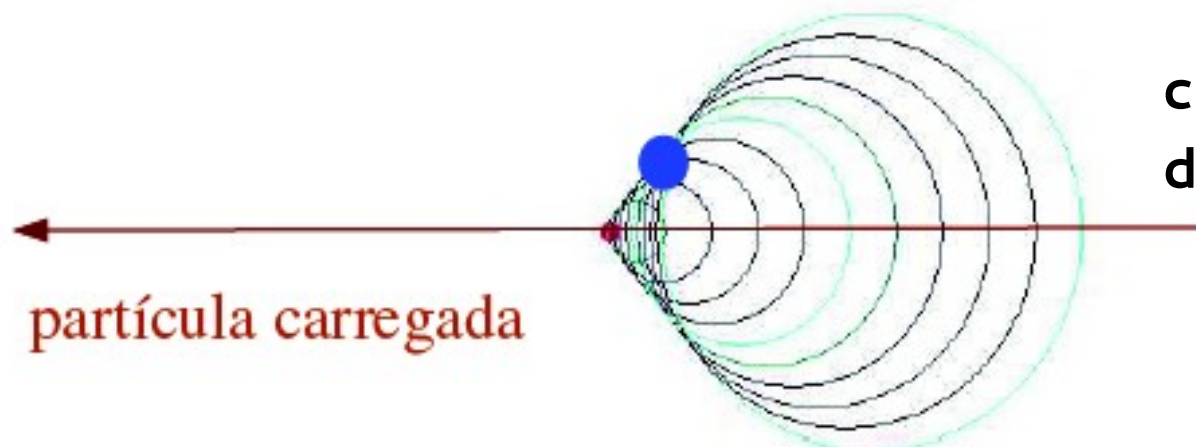
Tracker and Magnet: measure momentum

RICH charge of electron

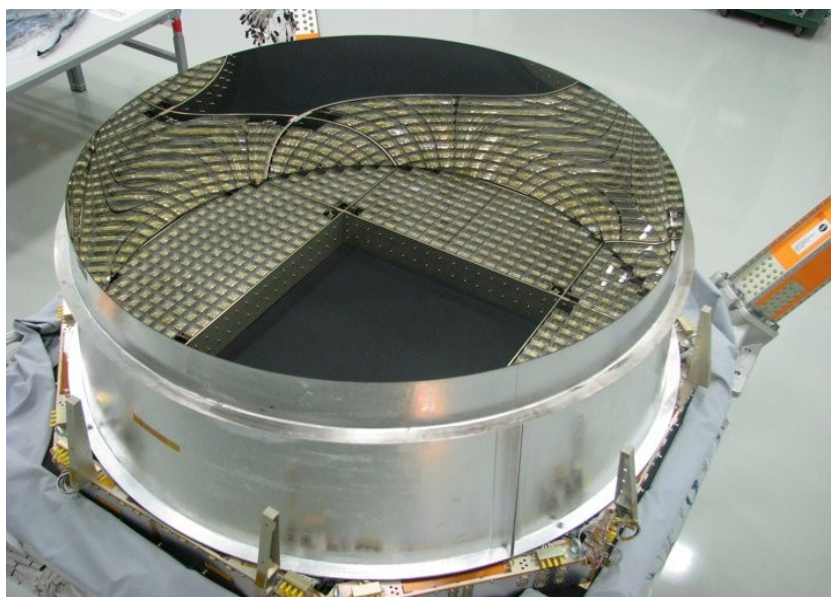
ECAL: identifies electron and measures its momentum

Ring Image Cherenkov

A velocidade da luz só é máxima no vácuo, nos materiais $c'=c/n$; a luz emitida por partículas carregadas mais rápidas acumula-se e torna-se visível num cone em torno da direção inicial



$$\cos\theta = 1/(\beta n);$$
$$dN/dE = Z^2 L \sin^2\theta$$

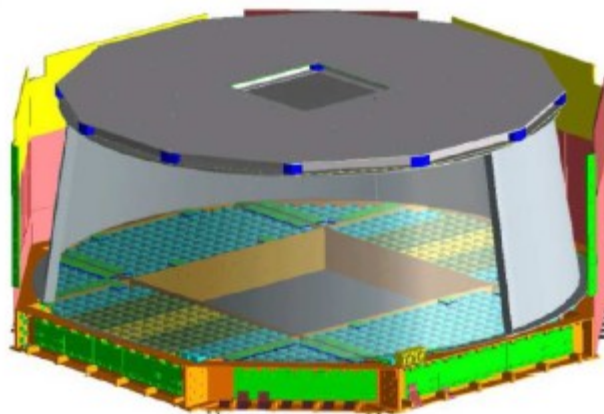


AMS RICH

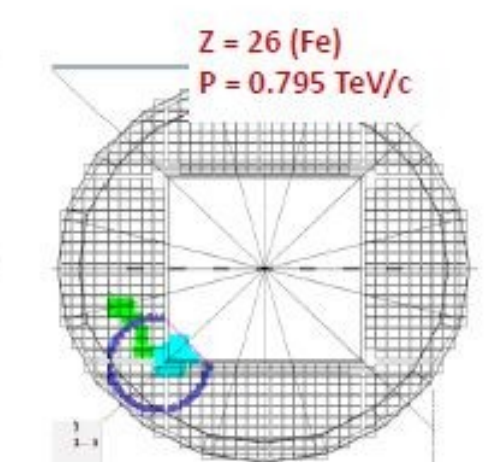
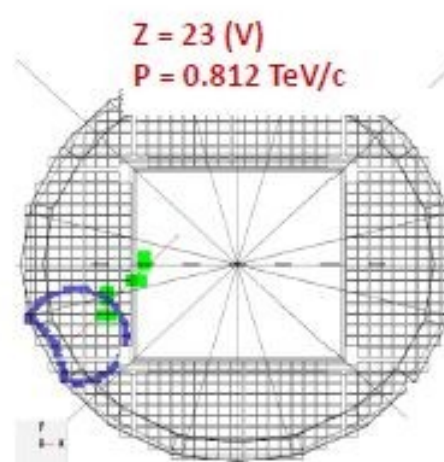
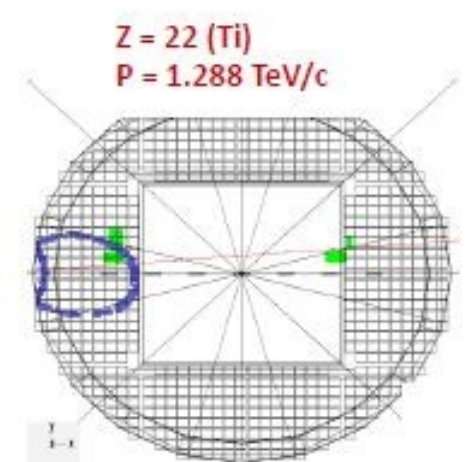
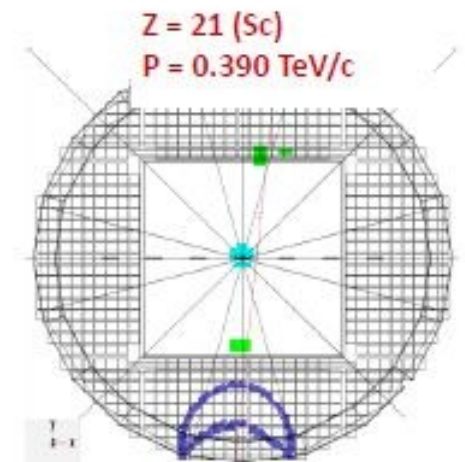
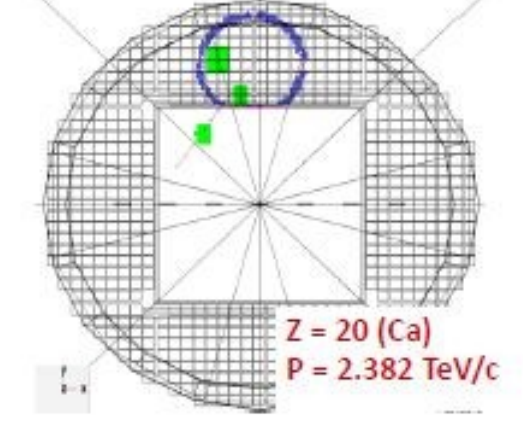
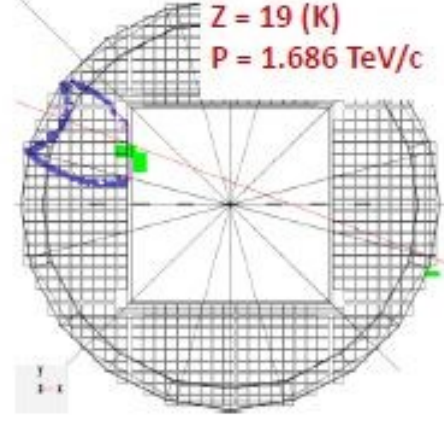
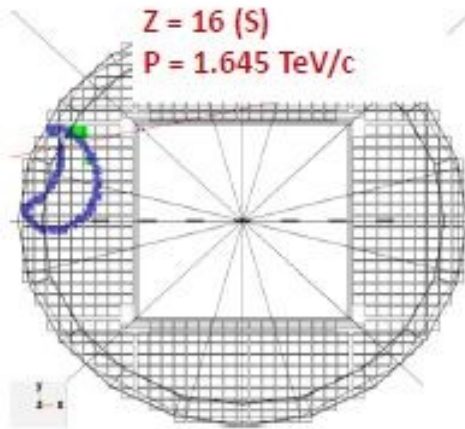
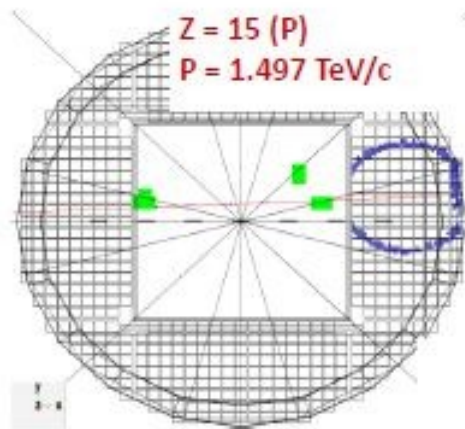
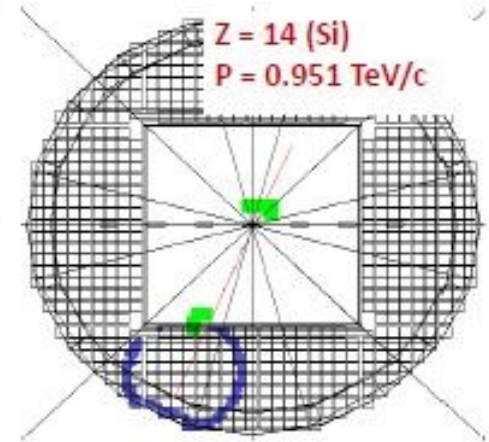
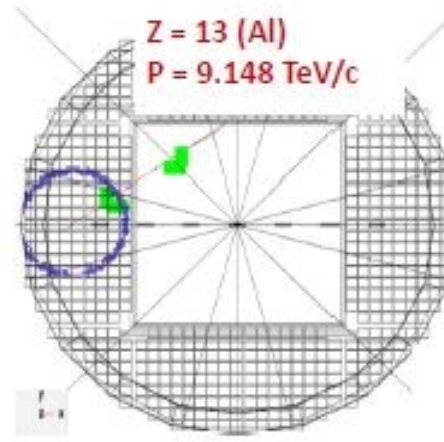
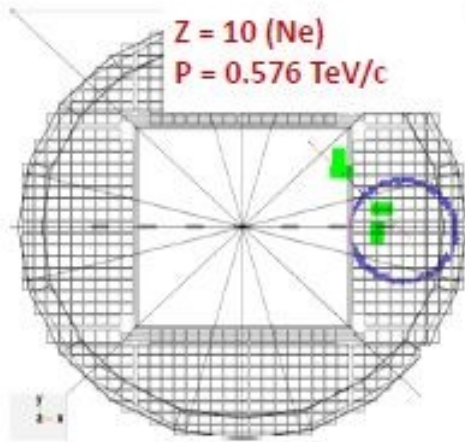
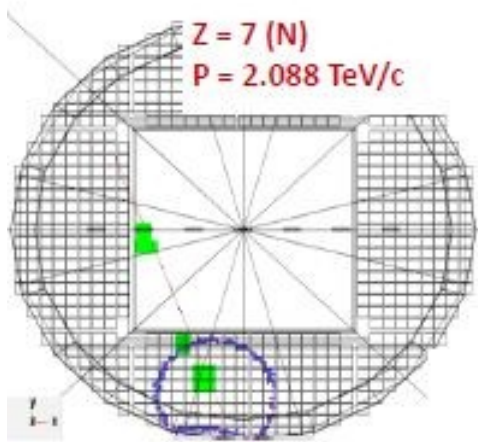
$n=1.335$ (cone largo)

$n=1.030$ (cone estreito para maior precisão)

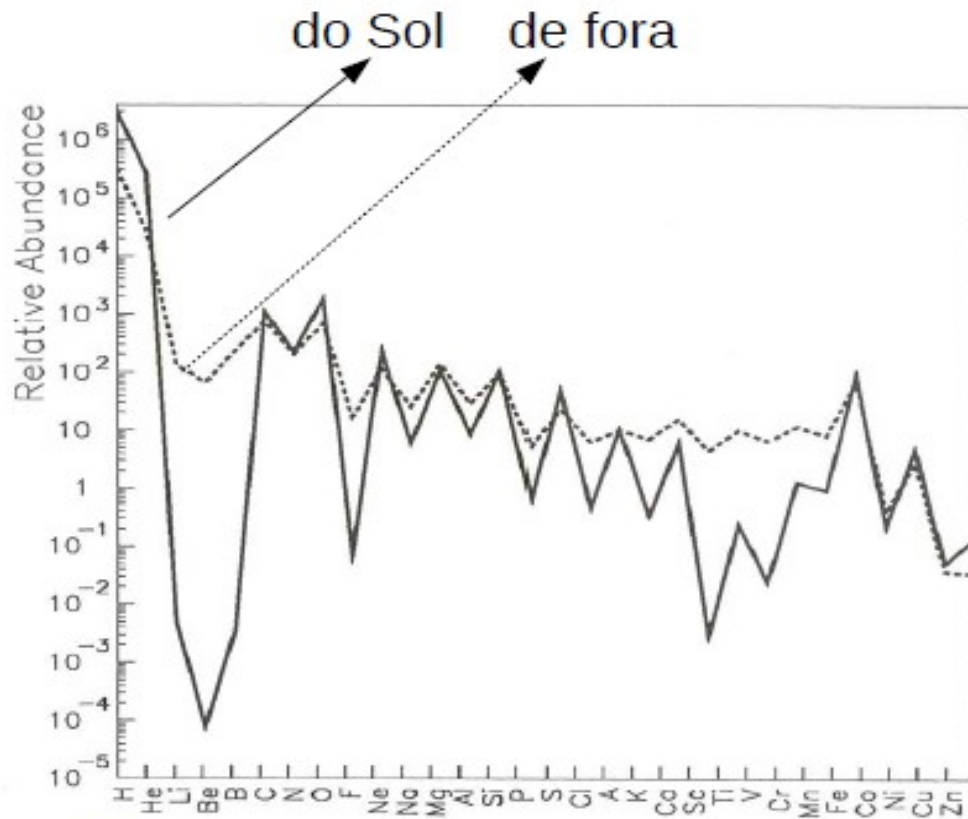
$\delta\beta/\beta \sim 0.1\%$ para $Z=1$; menor para $Z>1$



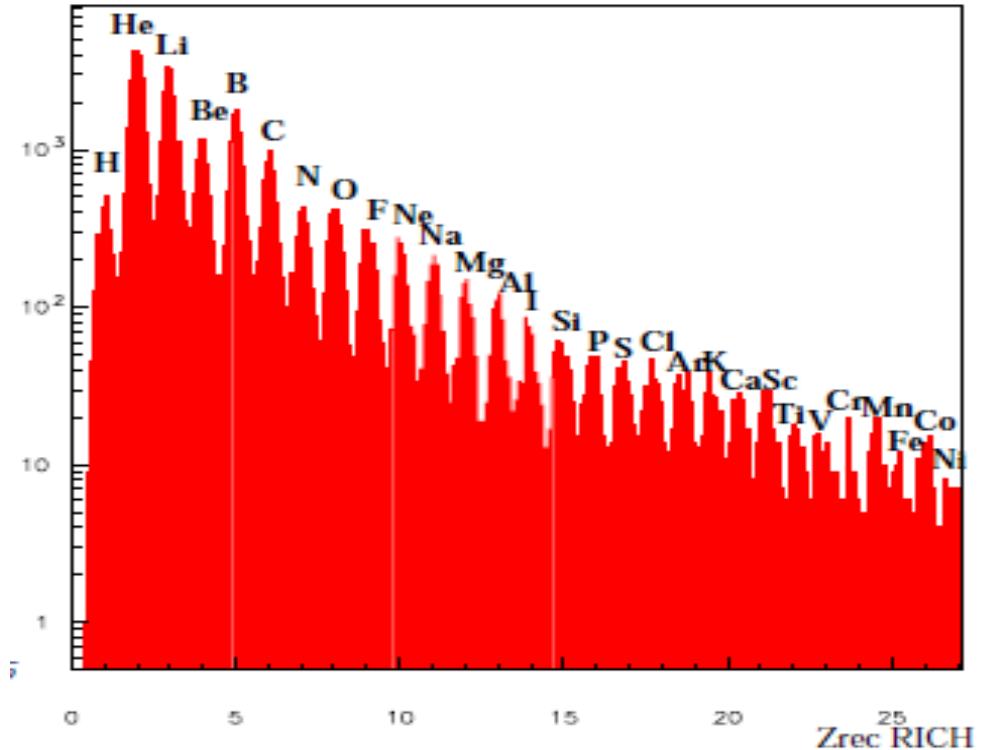
Núcleos atômicos de alta energia em AMS



Núcleos e anti-núcleos?



test-beam CERN 2003: $\delta Z/Z \sim 10\%$

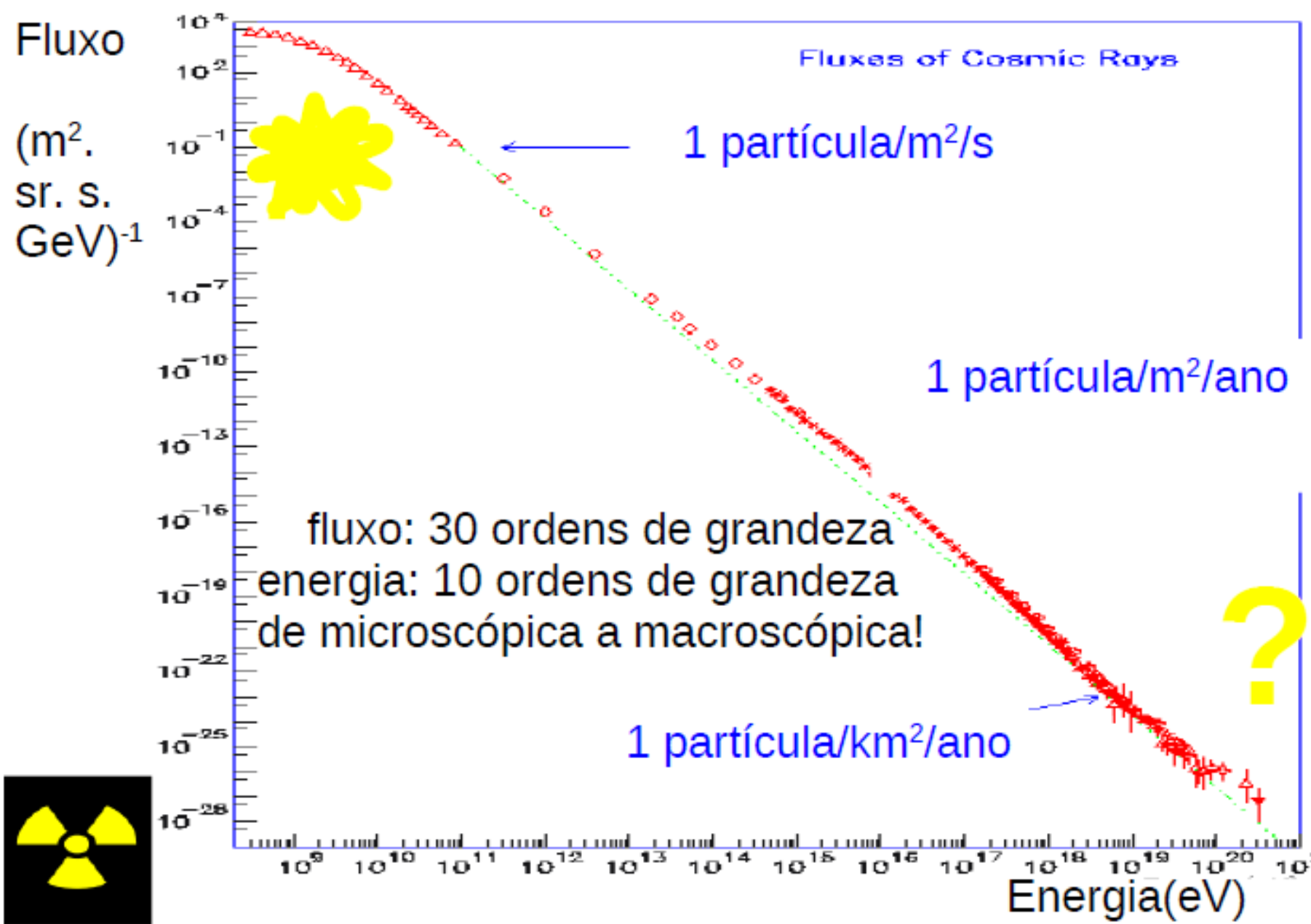


Anti-H: 10^{-4} (medido em satélites)
 Anti-He $< 10^{-6}$ (limite de AMS1)
 Anti-Li ??? ainda do BigBang??
 Anti-C ?????? anti-estrelas????

AMS02 vai identificar núcleos até ao Ferro e também isótopos para estudar a produção nas fontes e durante a sua propagação

A procura de anti-núcleos é um dos objetivos principais de AMS02 tornado possível pelo campo magnético e a grande resolução do RICH

Espectro de raios cósmicos carregados

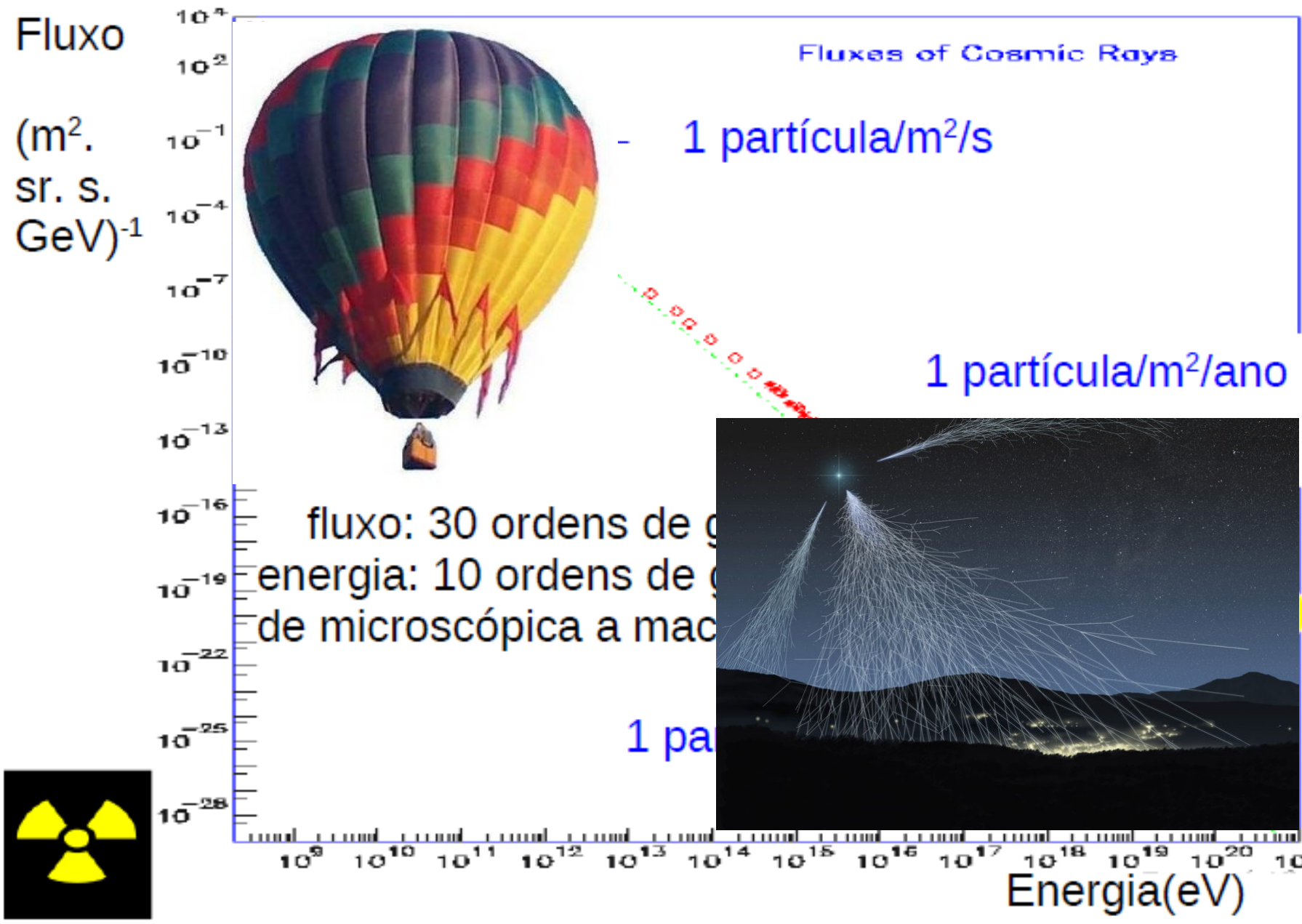


10⁹ eV = massa do próton

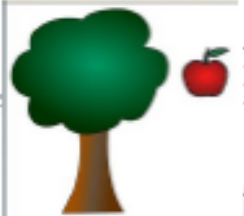


0.5 x 10¹⁹ eV = 1 Joule

Espectro de raios cósmicos carregados



10⁹ eV = massa do próton



0.5 x 10¹⁹ eV = 1 Joule

Neutrinos, muões e piões e $E=mc^2$

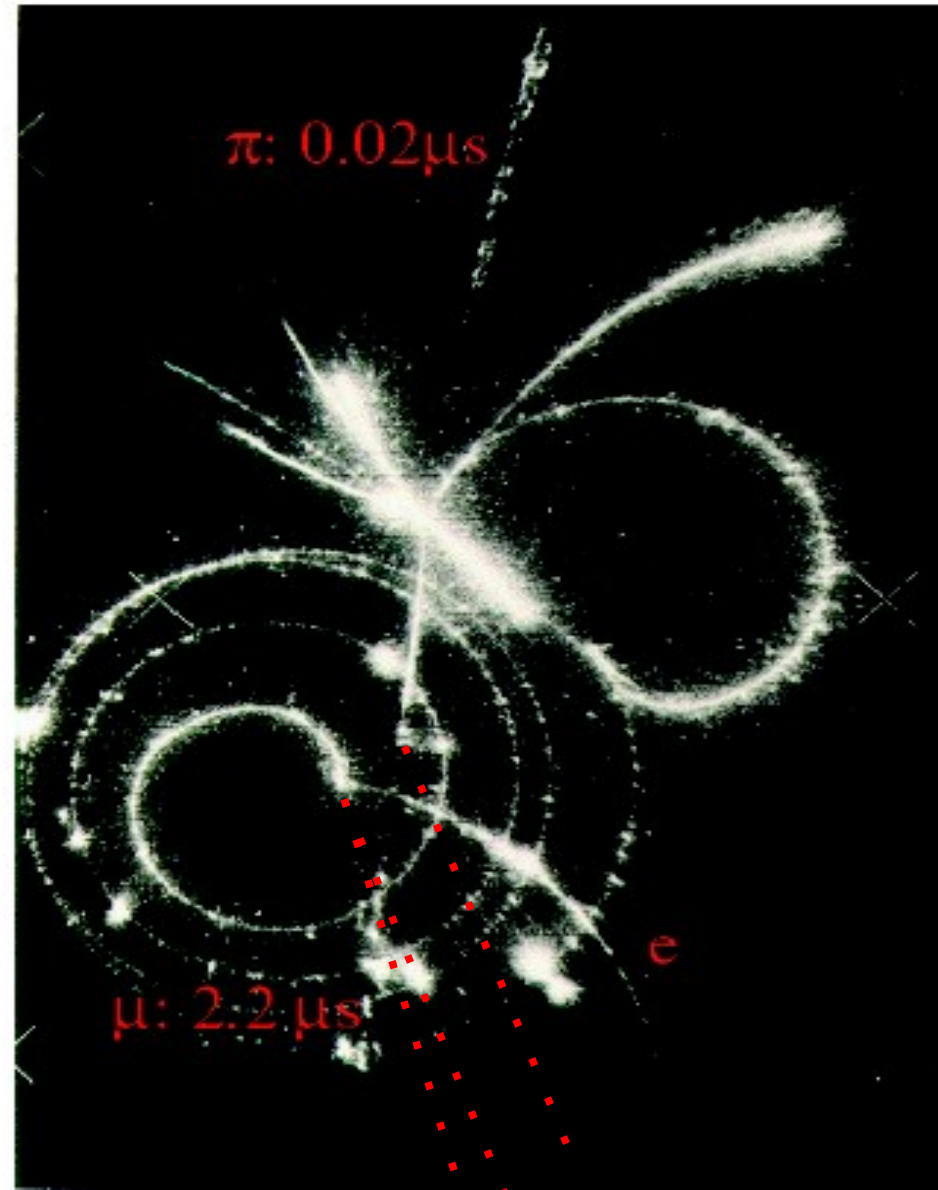
Piões e muões são partículas instáveis,
criadas por interação na atmosfera (ou no laboratório)

$$E = mc^2 \text{ -----> } E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

$$c = 300\,000 \text{ km/s} = 300 \text{ m} / \mu\text{s}$$

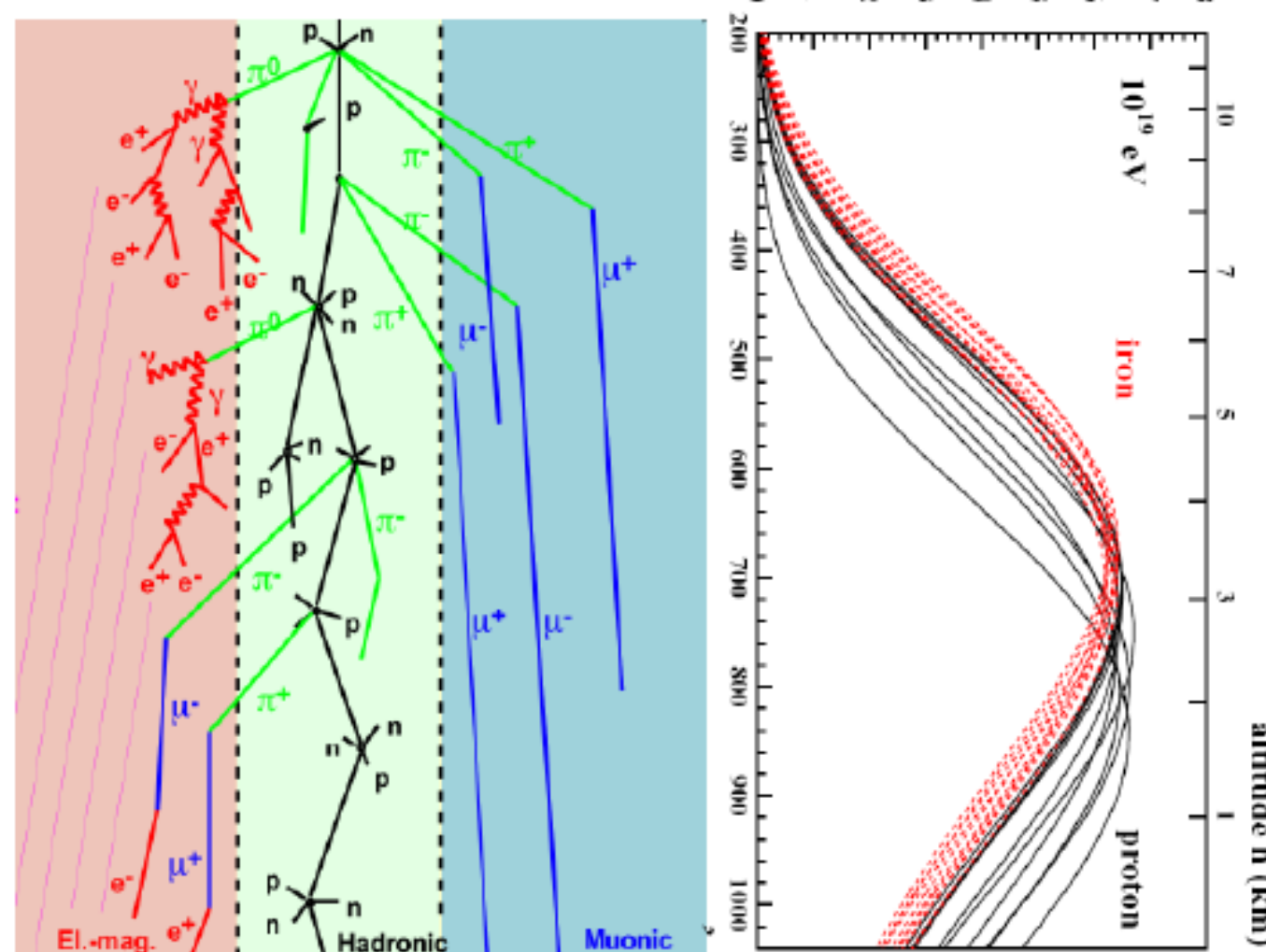
Mas o muão vive $2.2 \mu\text{s}$ e
atravessa 10 km de atmosfera!?

Contração do Espaço /
Dilatação do Tempo



Neutrinos atravessam tudo.
Muito raramente os vemos.

Detecção de raios cósmicos na Terra



Atmosfera=calorímetro

interacção hadrónica
de muito alta energia

+

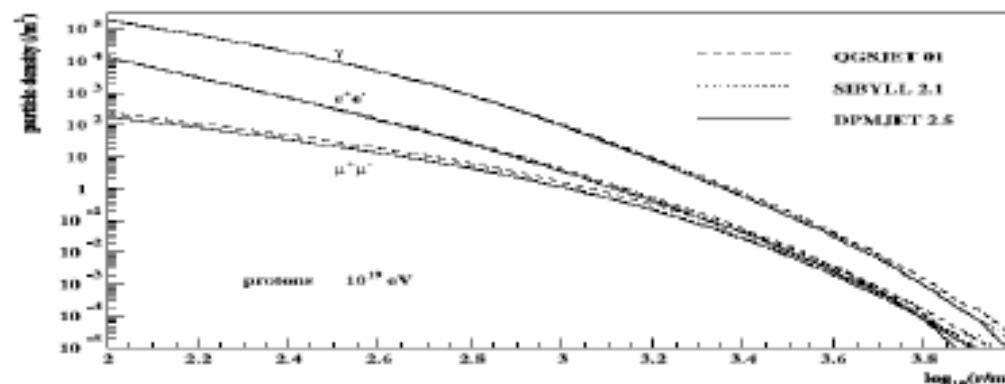
cascatas hadrónica e
electromagnética

1 hadrão:

100 muões:

10000 $e^-/e^+/\gamma$

milhões de partículas
por km^2 no solo e luz
da cintilação do azoto
da atmosfera, além da
luz dirigida do Cerenkov



Observatório Pierre Auger

1 partícula/km²/século == 30 por ano



Malargüe, Mendoza, Argentina

Observatório Pierre Auger

1 partícula/km²/século == 30 por ano



-----> Lisboa, Portugal

3000 km² de detector de superfície

Pampa Argentina: 1600 tanques de água separados de 1.5 km

Deteção por amostragem: precisa de 3 tanques para reconstruir a direção de chegada e estimar a energia da partícula primária



estações autónomas:
baterias solares, rádio, GPS

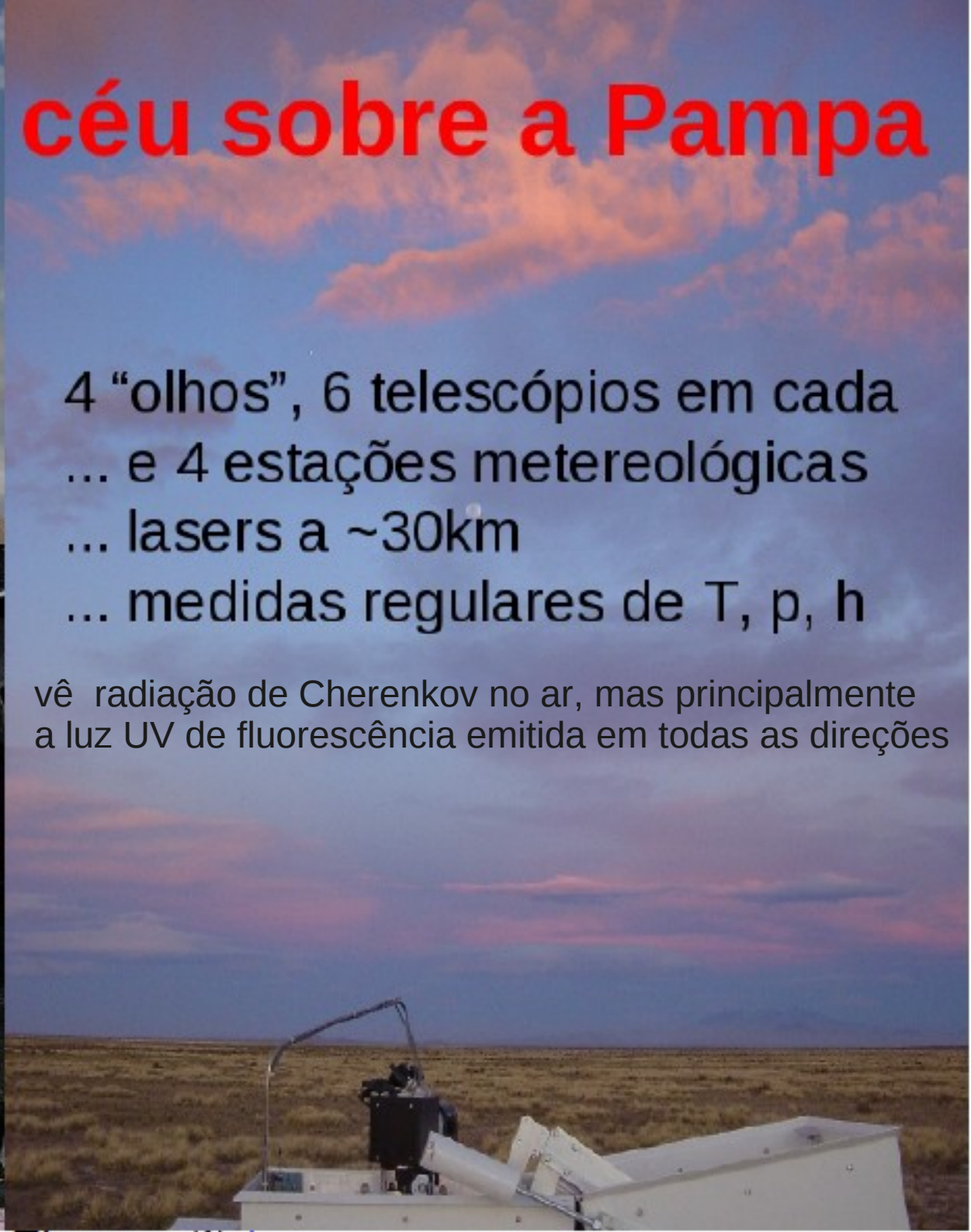


... e 10 km de céu sobre a Pampa

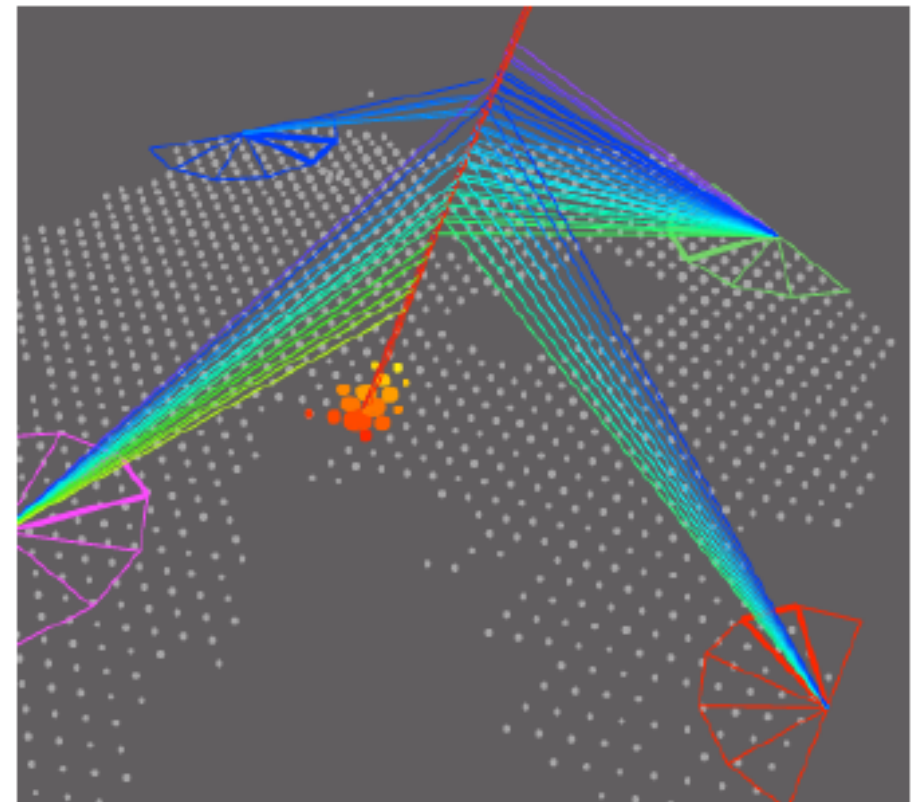
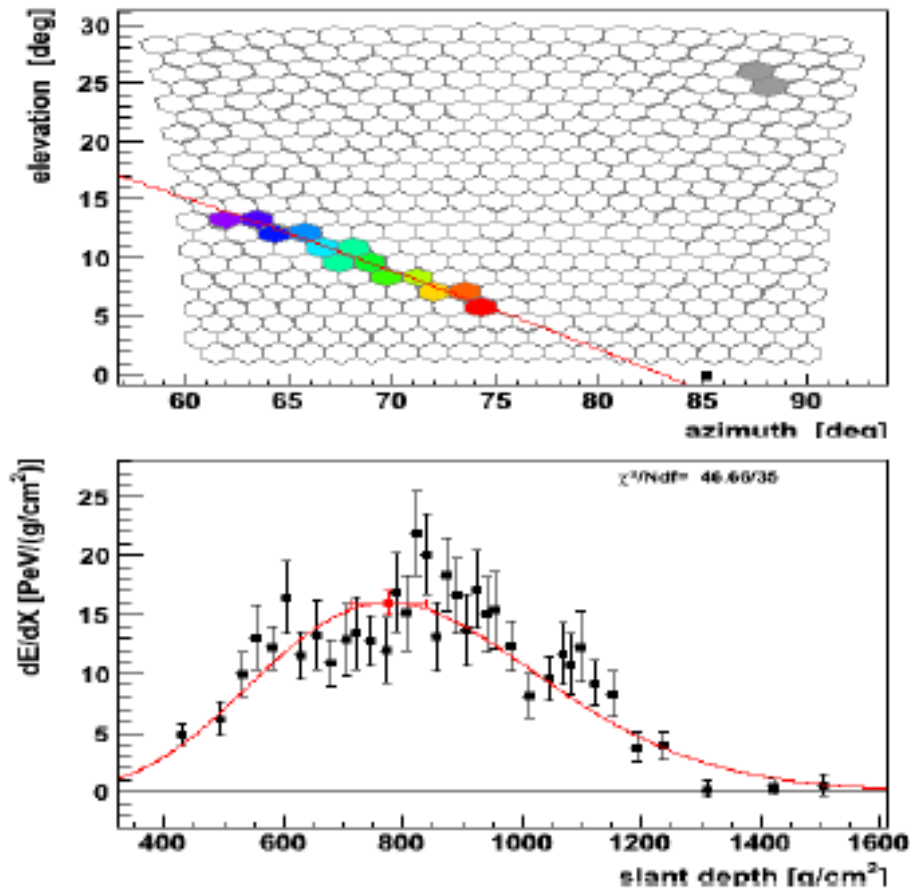


4 “olhos”, 6 telescópios em cada
... e 4 estações meteorológicas
... lasers a ~30km
... medidas regulares de T, p, h

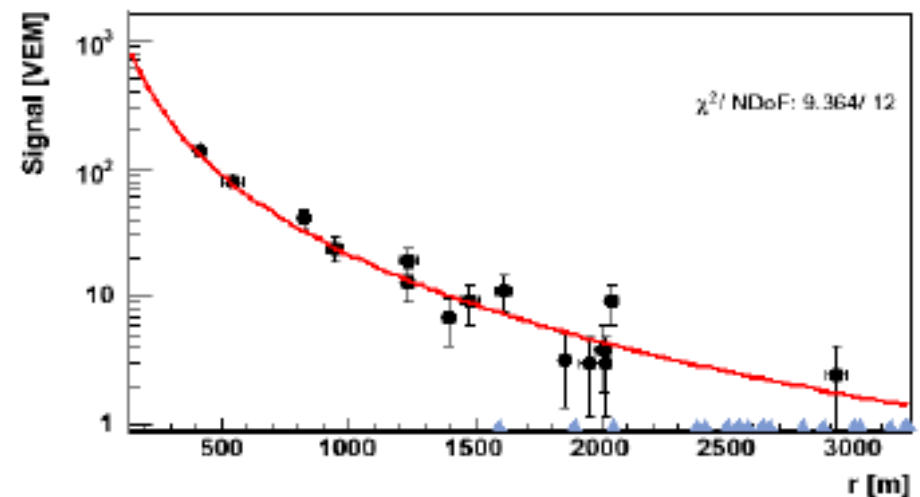
vê radiação de Cherenkov no ar, mas principalmente
a luz UV de fluorescência emitida em todas as direções



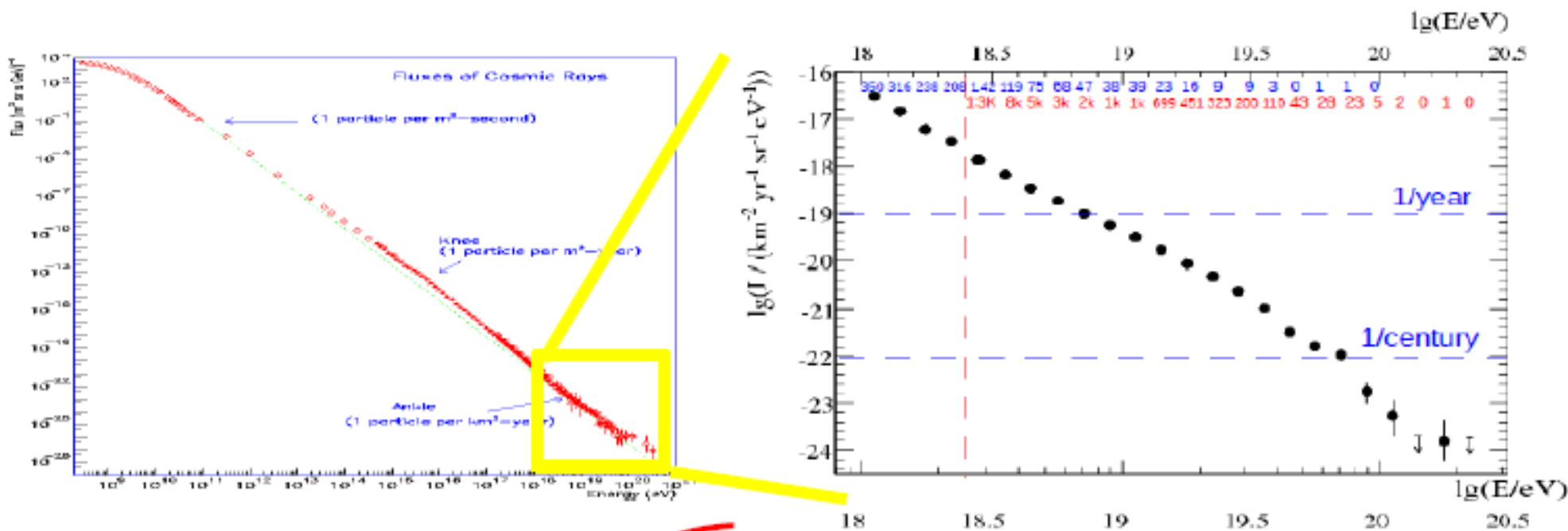
Detecção dos raios cósmicos



À noite, duas (ou até cinco) medidas do mesmo raio cósmico!
Duas formas independentes de medir a energia e a direcção para confirmar resultados

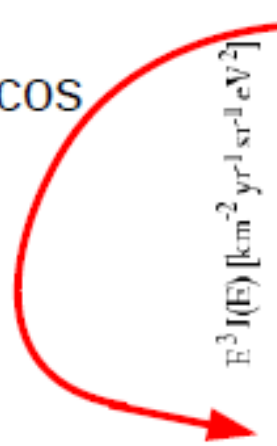


O fim do espectro de energia?

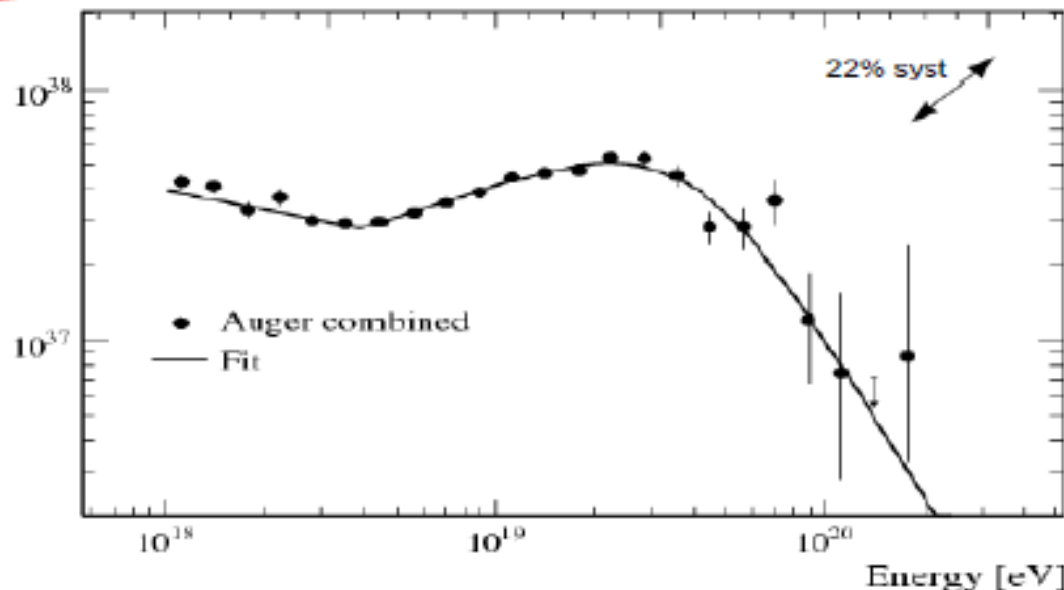


O fluxo de raios cósmicos diminui rapidamente com E^{-3}

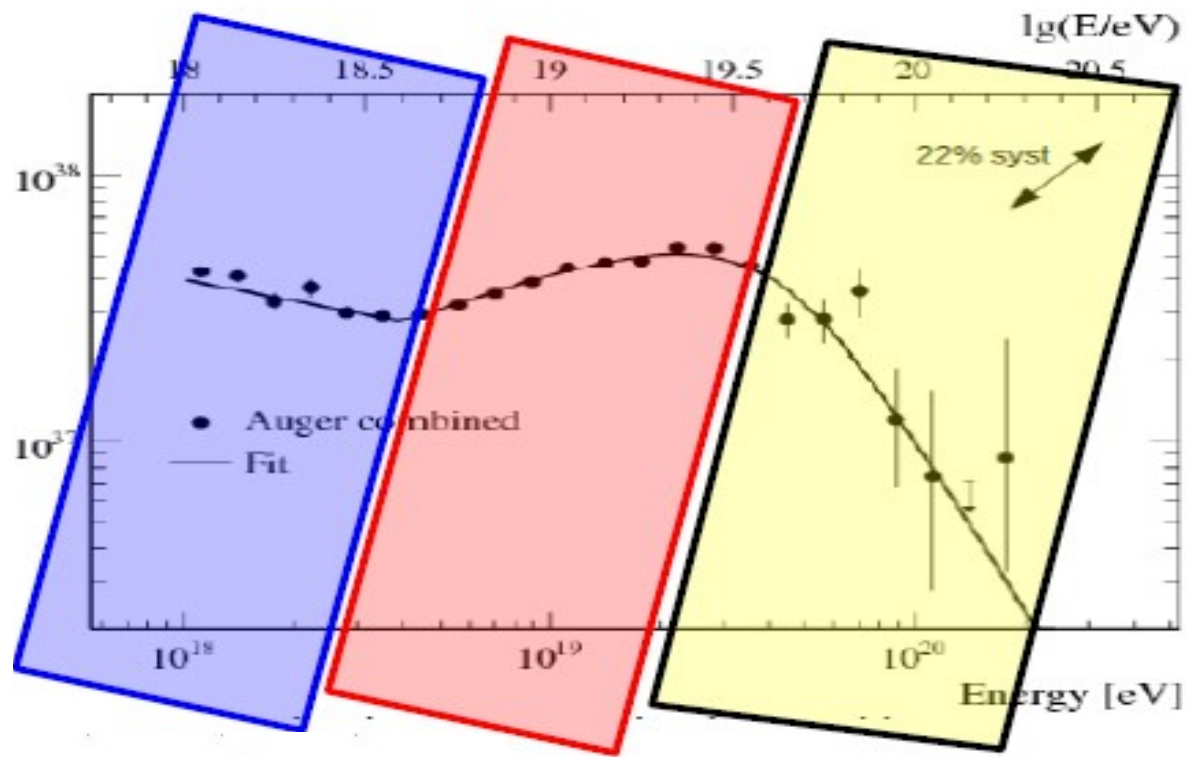
Corrigindo por E^3 ficam claras 3 regiões



$$E^3 I(E) [\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{eV}^2]$$



O fim do espectro de energia?

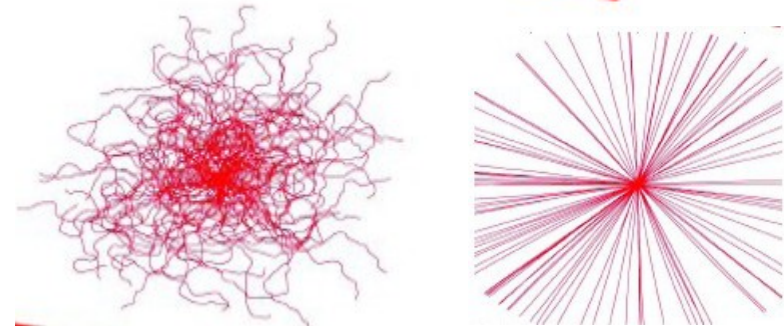


Partículas presas na galáxia

Partículas de outras galáxias

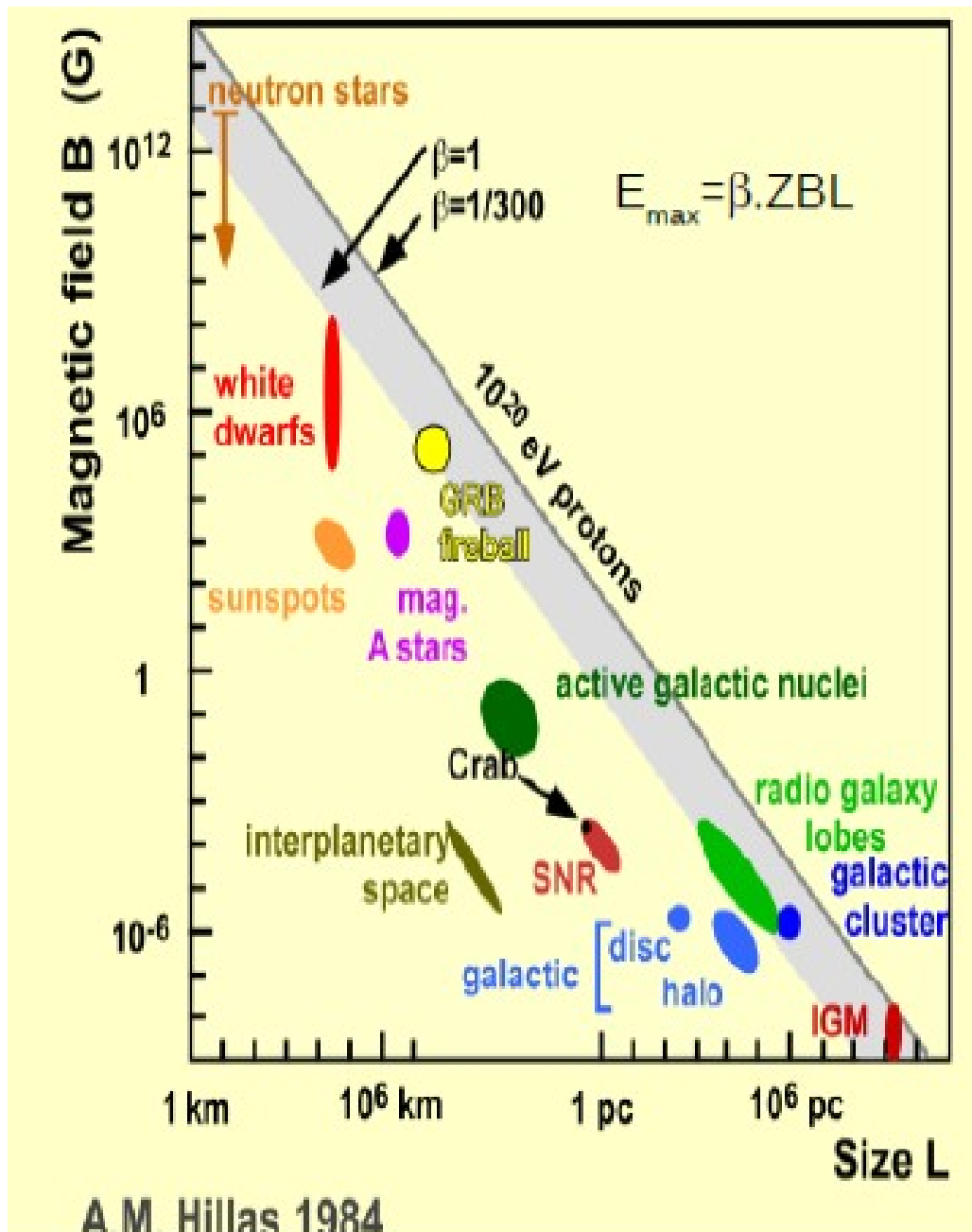
Há um limite aos aceleradores
ou universo não é transparente?

$p + \gamma(\text{CMB}) \rightarrow \Delta \rightarrow p + \pi$
(transfere energia para o pião:
devemos ver então outras
partículas de alta energia)



O efeito dos campos magnéticos depende da energia
não conhecemos bem as intensidades e orientações
dos campos galácticos e inter-galácticos...

Grandes aceleradores cósmicos



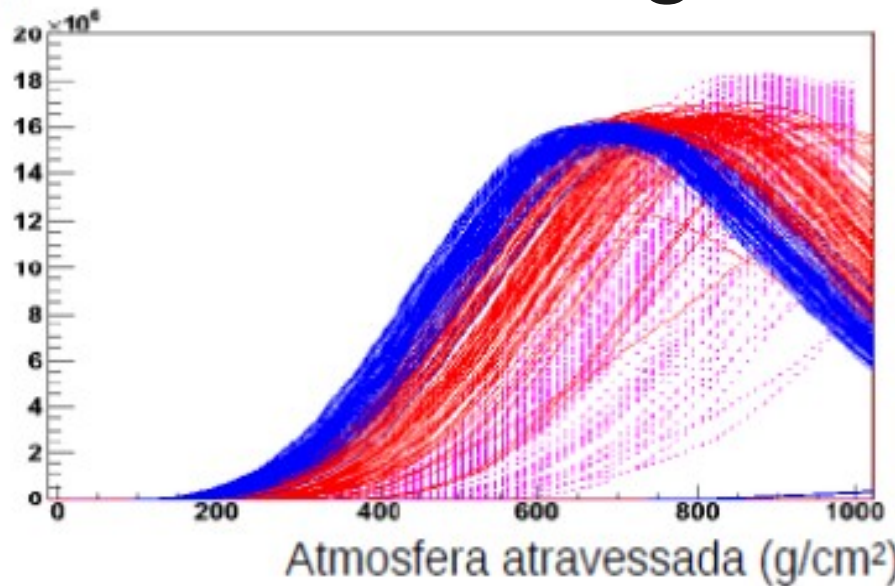
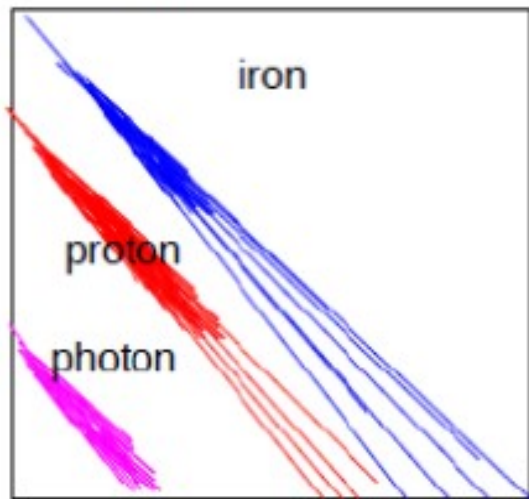
Os aceleradores cósmicos devem conter partículas carregadas num grande círculo com um forte campo magnético e campo eléctrico variável.

Pensa-se que muitas vêm de antigas Super Novas, criadas a cada ~ 50 anos na Via Láctea.

Para as mais altas energias, há poucas fontes possíveis e nenhuma conhecida na Galáxia.

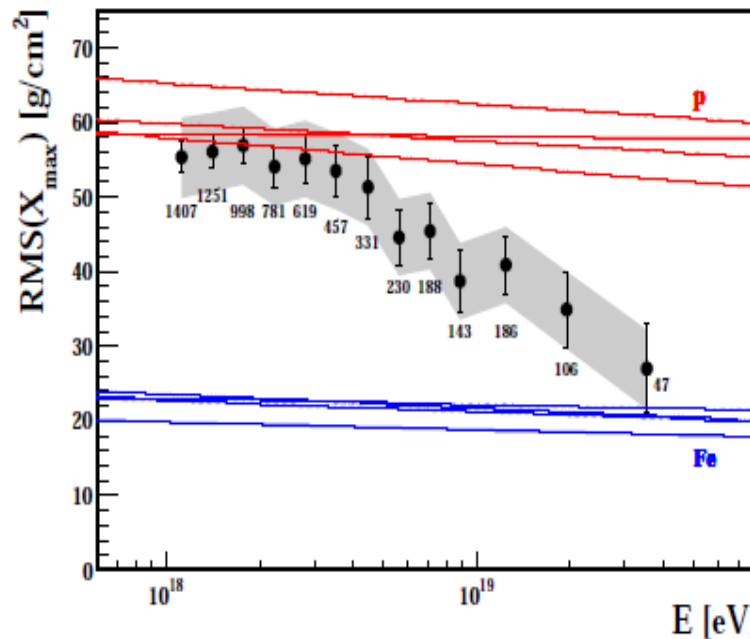
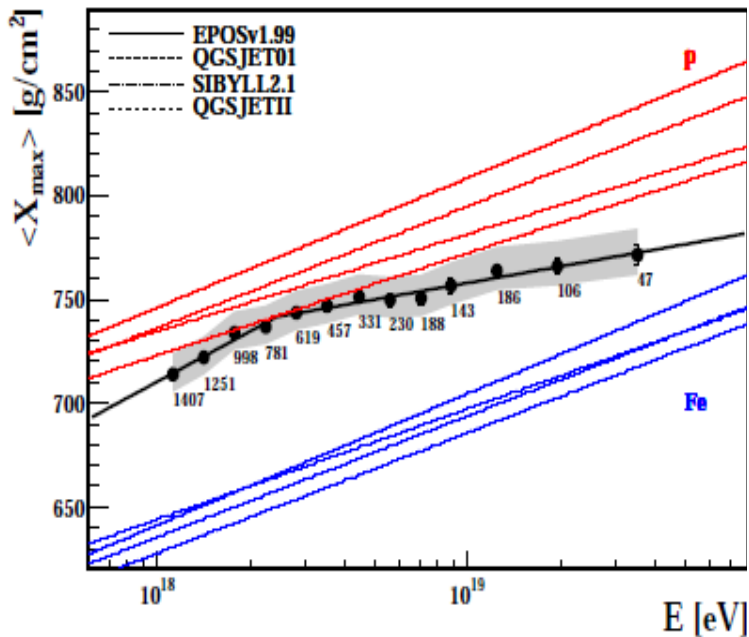
Pode haver um limite para a aceleração no Universo, ou não?

O que são? E como interagem?



Núcleos de Ferro
 ~ 56 nucleões
 (com E/56):

mais interação,
 menos flutuações

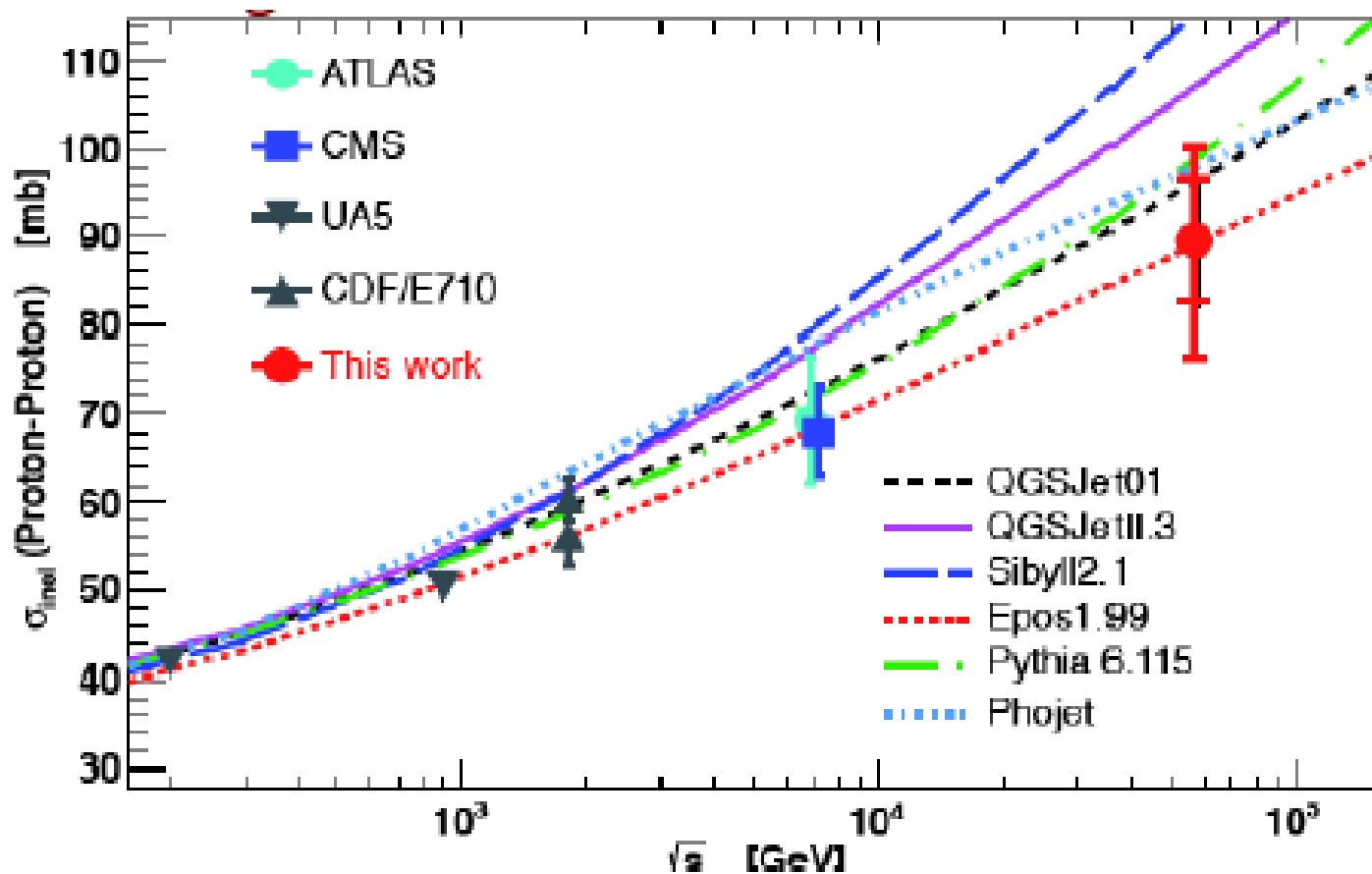


<0.1% são fotões

p → Fe ????? ou...
 novas interações?

Energia >>>> LHC !

O que são? E como interagem?



Primeiras medidas de secção-eficaz a tão alta energia!

**Simulações muito diferentes dos dados reais medidos!
Nova física??**

**Os raios cósmicos de maior energia podem ser Fe?
Ou prótons com novas interações?
Sub-estrutura?**

Energia na colisão

$$m^2 = (E1+E2)^2 - (P1+P2)^2$$

Colisionador ---> $2.E$

Alvo fixo -----> $\sqrt{2.E.M_p}$

Nos raios cósmicos:

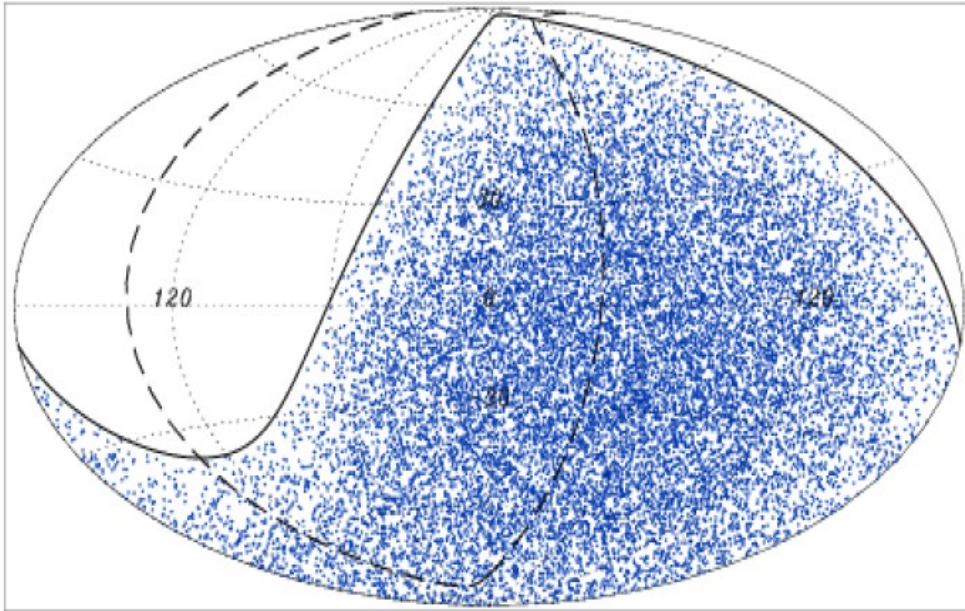
$$\log(E/eV)=18 \rightarrow 45 \text{ TeV}$$

$$\log(E/eV)=19 \rightarrow 150 \text{ TeV}$$

$$\log(E/eV)=20 \rightarrow 450 \text{ TeV}$$

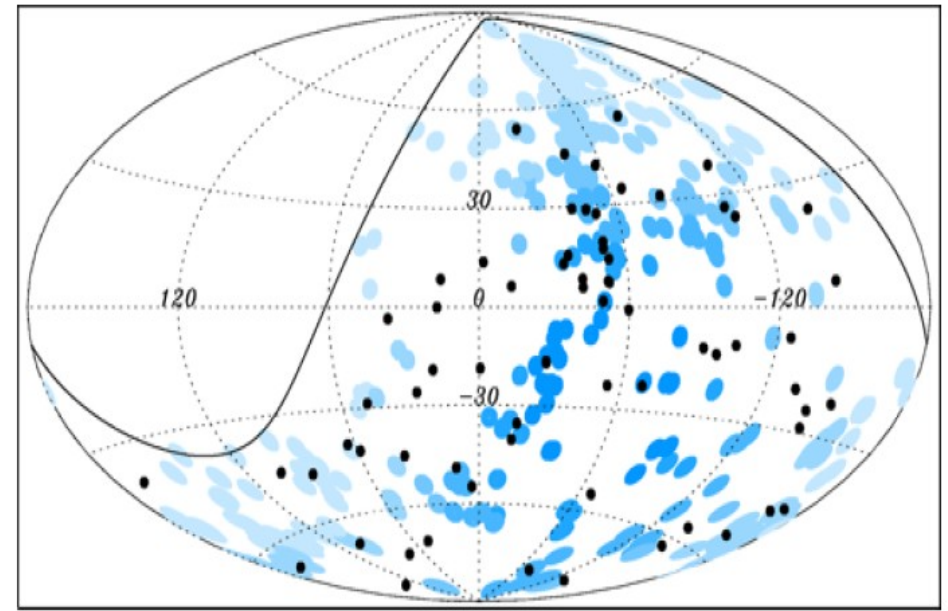
Astronomia do séc. XXI com novas partículas??

O céu de Raios Cósmicos a 0.5 J



Os raios cósmicos chegam-nos de todas as direcções possíveis, Auger tem maior exposição na intersecção dos planos galacticos e super-galáctico
Parte do céu do Hemisfério Norte não é visível desde a Argentina.

O céu de Raios Cósmicos a 0.5 J e a 10 J



Os raios cósmicos parecem vir preferencialmente de zonas com maior concentração de matéria, como o plano super-galáctico.
Vindos de perto de Centaurus A, vemos 18 quando esperavamos 9.

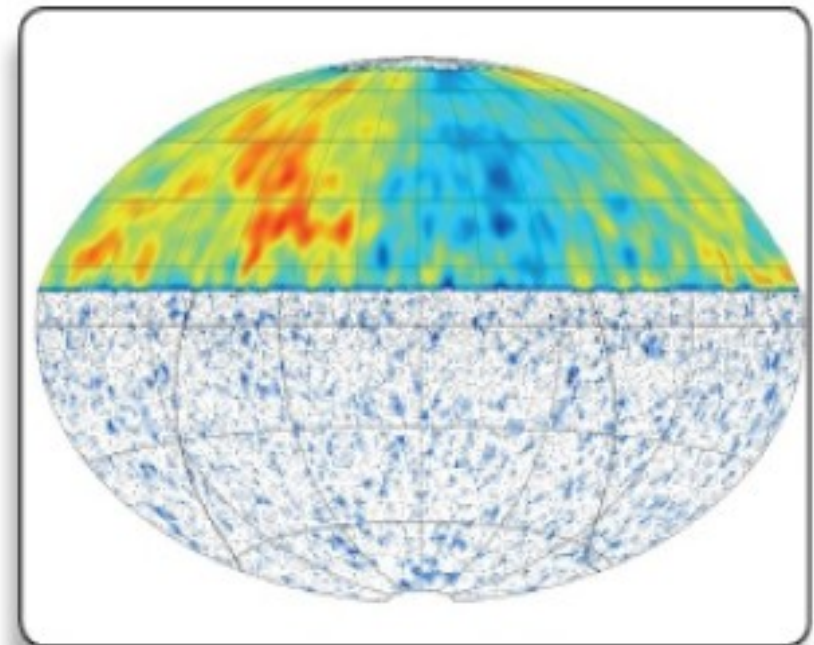
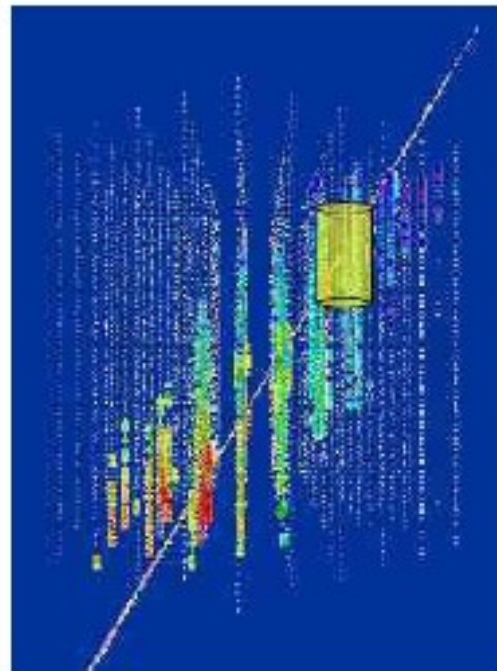
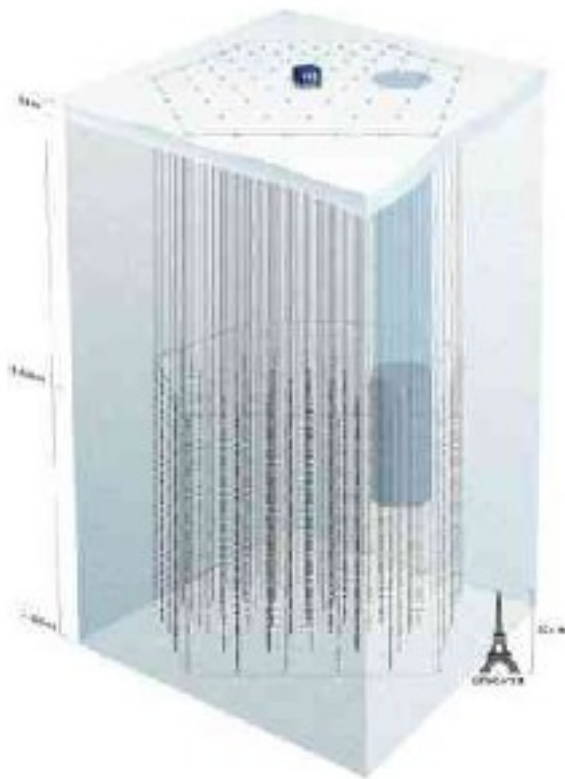
Não conhecemos bem os campos magnéticos e poucas partículas carregadas não chegam para apontar as fontes. E as neutras?

- neutrões só vivem 15 mins (como prótons mas a direito)
- fótons de alta energia são absorvidos (γ vistos em IACTs)
- neutrinos (e matéria escura!) difíceis de descrever e detetar

Neutrinos cósmicos de muito alta energia



No Pólo Sul e no Mar Mediterrâneo, dois projectos de 1 km^3 , medem neutrinos usando gelo ou água como alvo e detector.



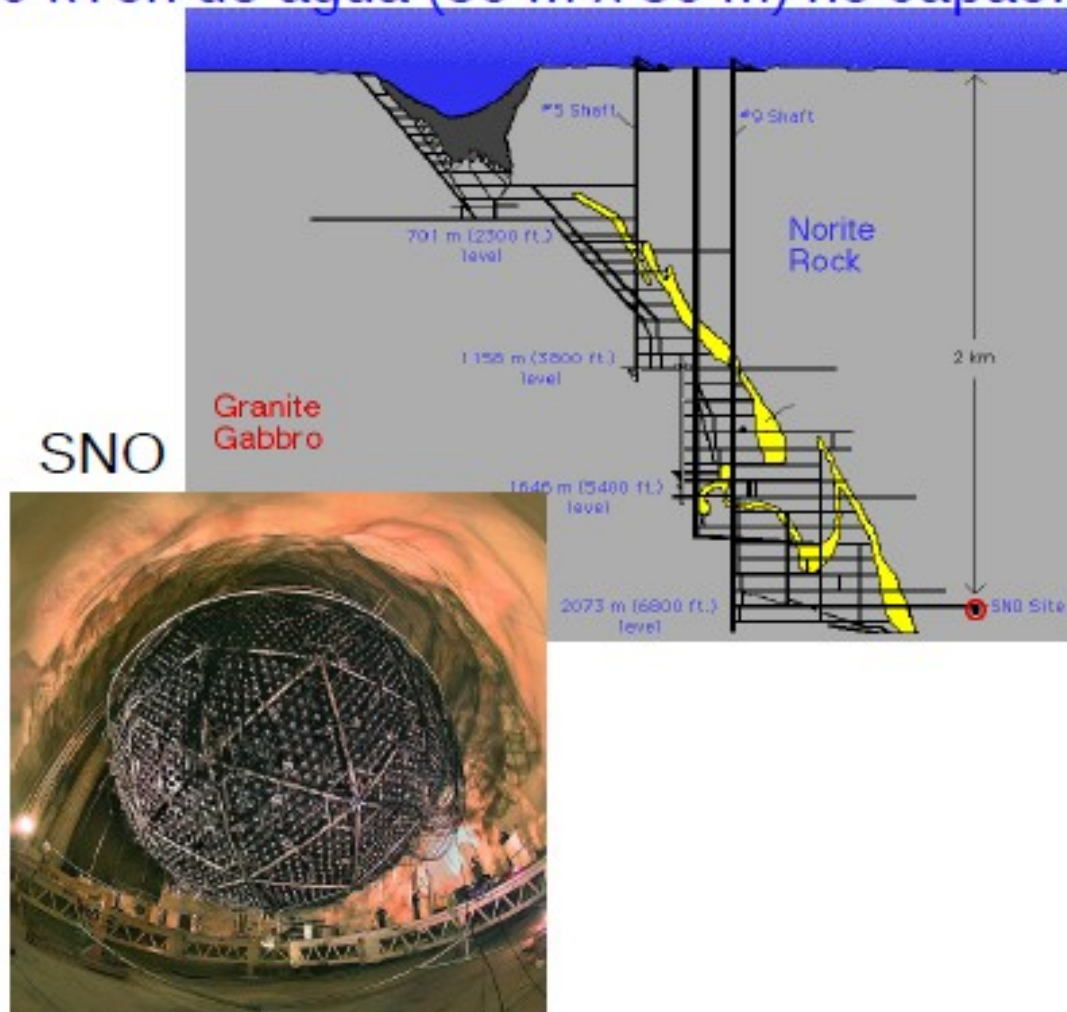
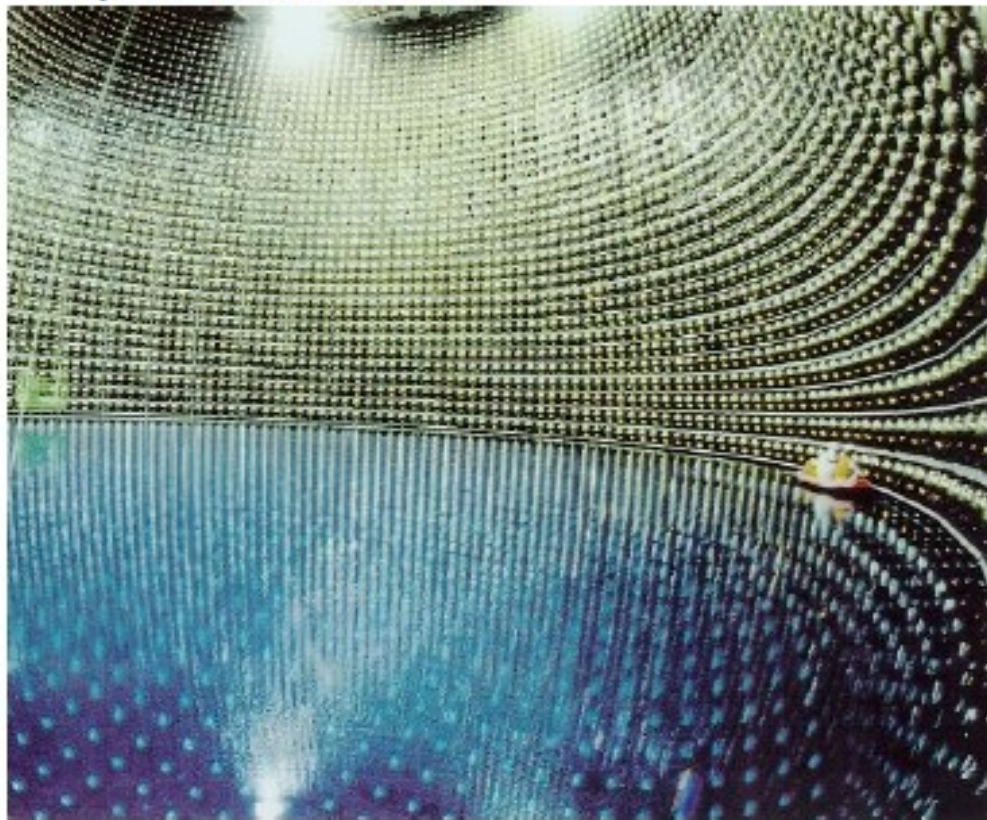
1000 milhões muões vindos de cima;
e 20 mil neutrinos vindos de baixo -
Uns criados nos raios cósmicos
outros directamente das fontes

Detectores de neutrinos

Para ver apenas neutrinos, o detector tem de ser isolado contra outros sinais: O mais profundo é SNO a 2000 m (6000 m equivalente em água) no Canadá.

Para ver todas as interações, o detector deve ser grande, simples e simétrico: O maior é o SuperKamiokande com 50 kTon de água (50 m x 50 m) no Japão.

SuperKamiokande



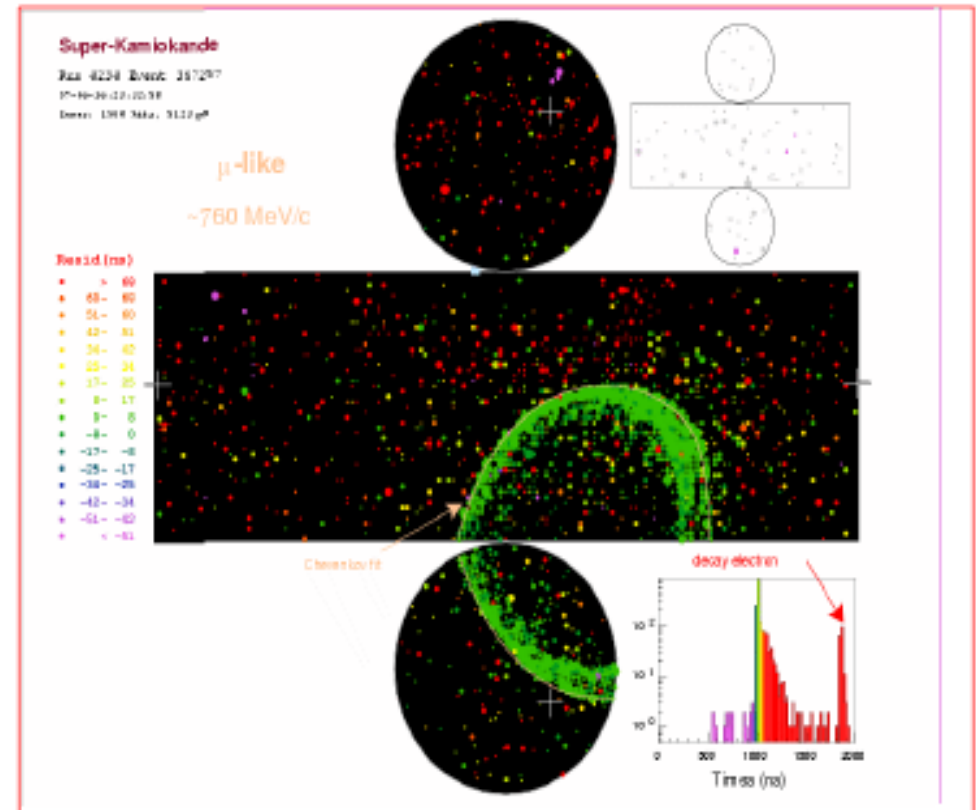
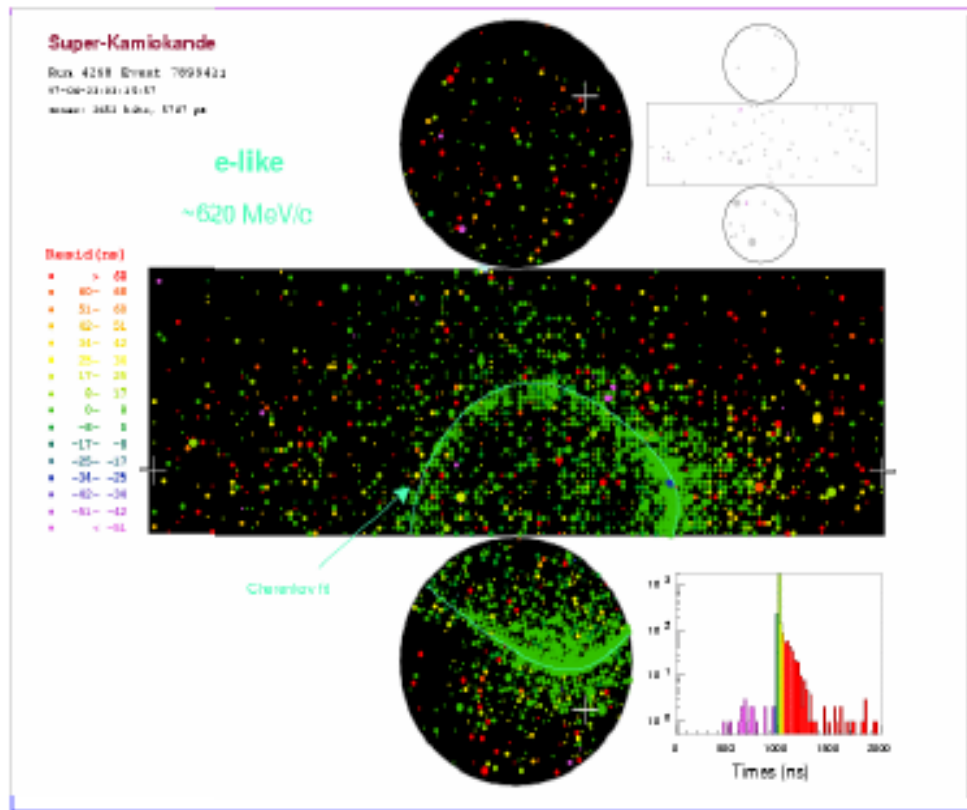
Detectores de neutrinos

Para ver apenas neutrinos, o detector tem de ser isolado contra outros sinais: O mais profundo é SNO a 2000 m (6000 m equivalente em água) no Canadá.



**Laboratórios muito limpos,
de acesso difícil, para
experiências de neutrinos
e busca de matéria escura**

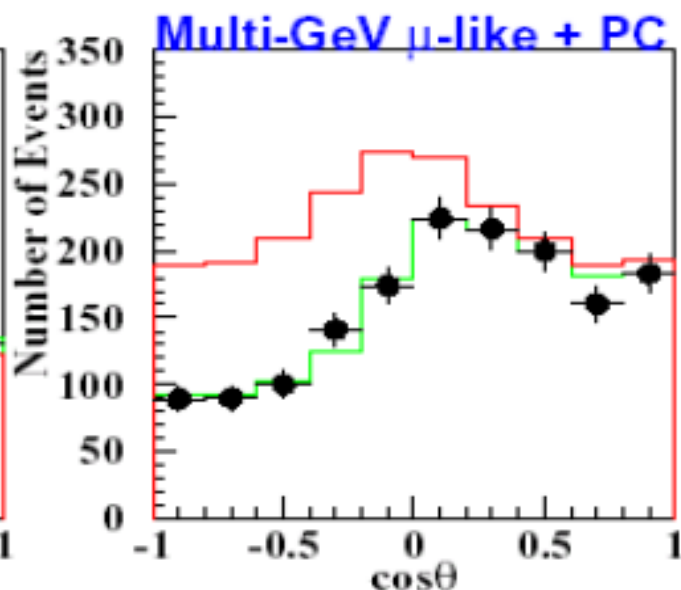
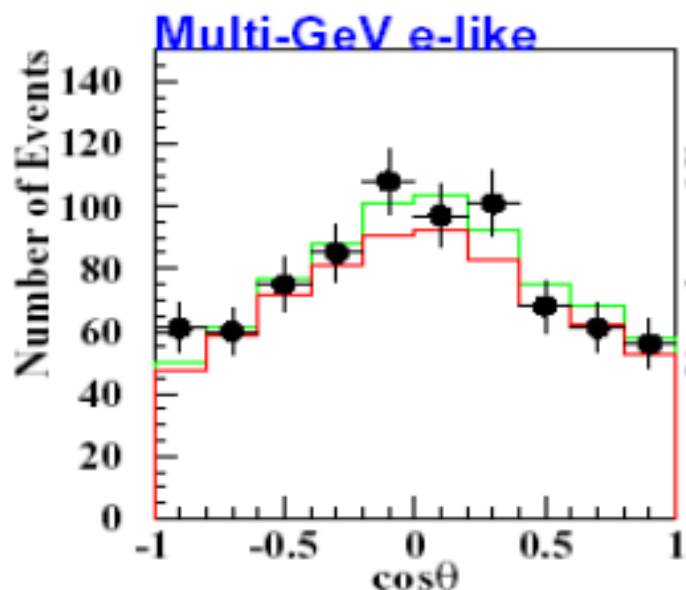
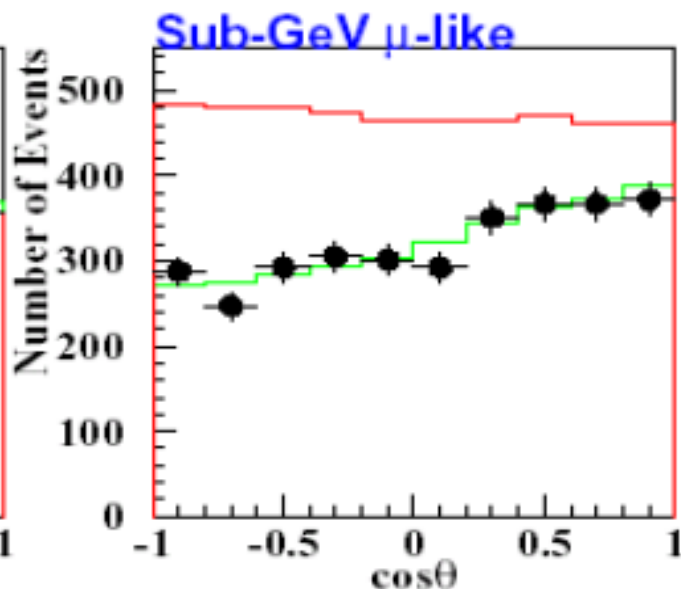
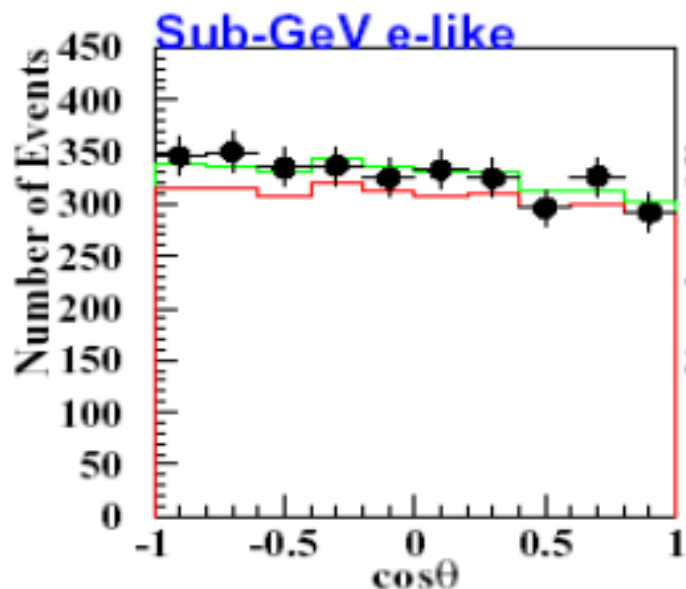
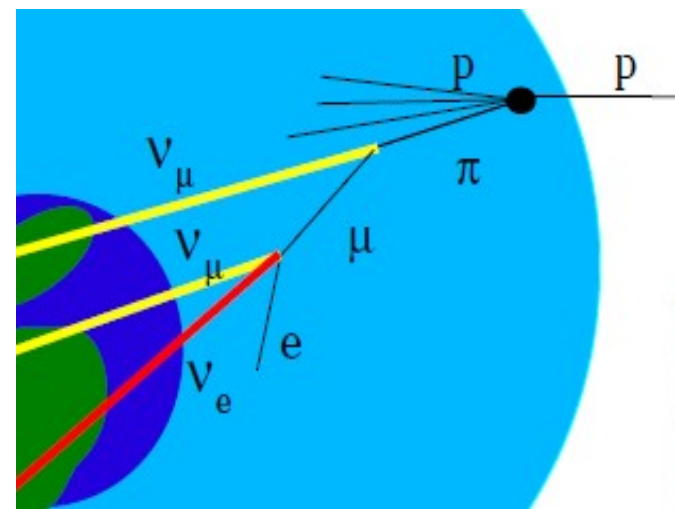
Neutrinos dos raios cósmicos em SK



Electrão: cria uma pequena cascata electromagnética na água, com vários cones de Cherenkov e, por isso, um anel difuso na parede

Muão: segue a direito na água, com um círculo quase perfeito, até decair criando um electrão (e mais dois neutrinos invisíveis)

Faltam neutrinos do muão?



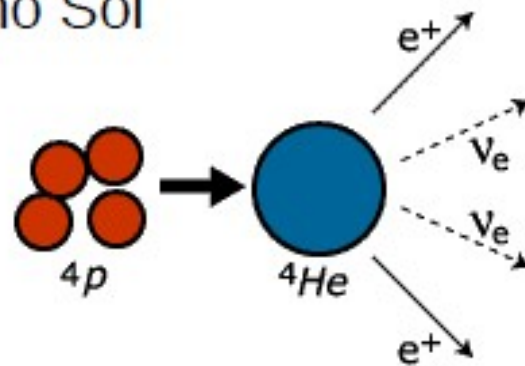
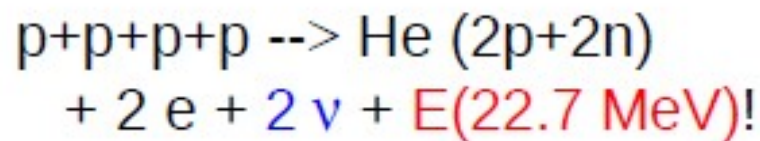
Dividindo os dados em electrão / muão e baixa / alta energia e ângulo = distância de 10 km a 10000 km

verifica-se que os neutrinos do electrão se comportam como esperado mas faltam neutrinos do muão com baixa energia ou vindos de longe

Porquê?

O problema dos neutrinos solares

O principal processo que ocorre no Sol é a fusão de prótons em ${}^4\text{He}$:
é a fusão de prótons em ${}^4\text{He}$:



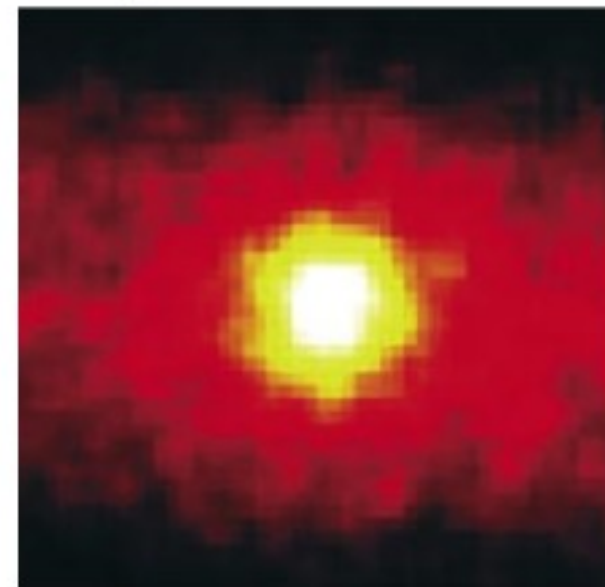
Em equilíbrio, a energia é emitida em luz.

Luminosidade do Sol = $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$
--> $\sim 10^6$ neutrinos/s/cm²! ($E_\nu \sim \text{MeV}$)

Esta energia leva milhões de anos a chegar à superfície e ser emitida em luz; os neutrinos saem imediatamente e chegam à Terra em 8 minutos

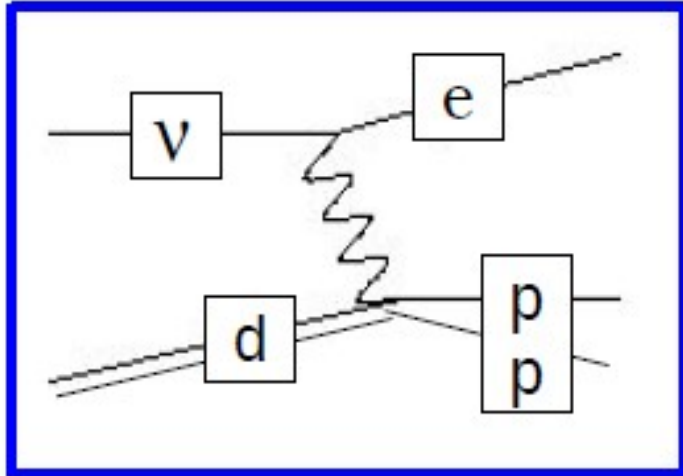
Detectando neutrinos do electrão, vemos o Sol mas com apenas 30% da intensidade esperada...

“Foto” do Sol com electrões vistos por SuperKamiokande

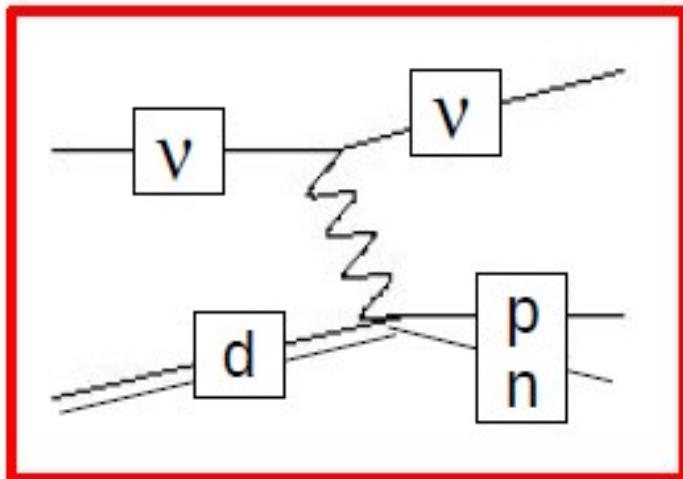


Em busca dos neutrinos solares

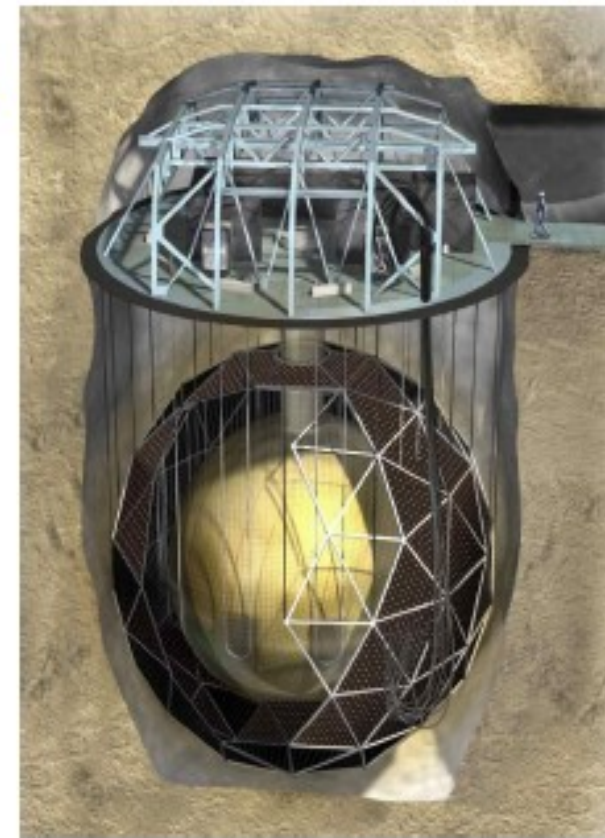
a passagem à água pesada e salgada em SNO



Só é possível para neutrinos do electrão!
Não há energia suficiente para criar muões ou taus (massa de 0.1 ou 1.8 MeV).

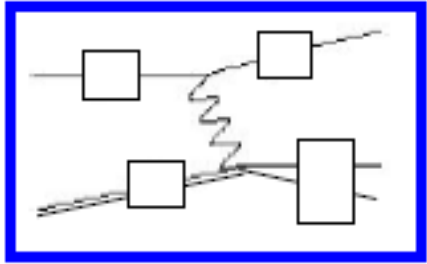


É igual para qualquer dos três tipos de neutrino.
É apenas necessário detectar o neutrão no Sal:
 $n + {}^{35}\text{Cl} \rightarrow {}^{36}\text{Cl} + \gamma$



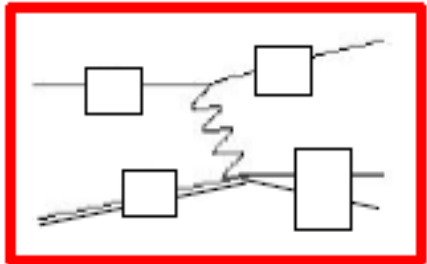
Nenhuma destas interacções é possível na água, onde se detectam preferencialmente neutrinos do electrão.

A oscilação dos neutrinos



Neutrino do electrão / Sol

0.3



Todos os neutrinos / Sol

1.0



O Sol, e os raios cósmicos, funcionam bem!

A transformação de neutrinos dum tipo em outro (não detetável) foi confirmada com aceleradores e reatores nucleares:

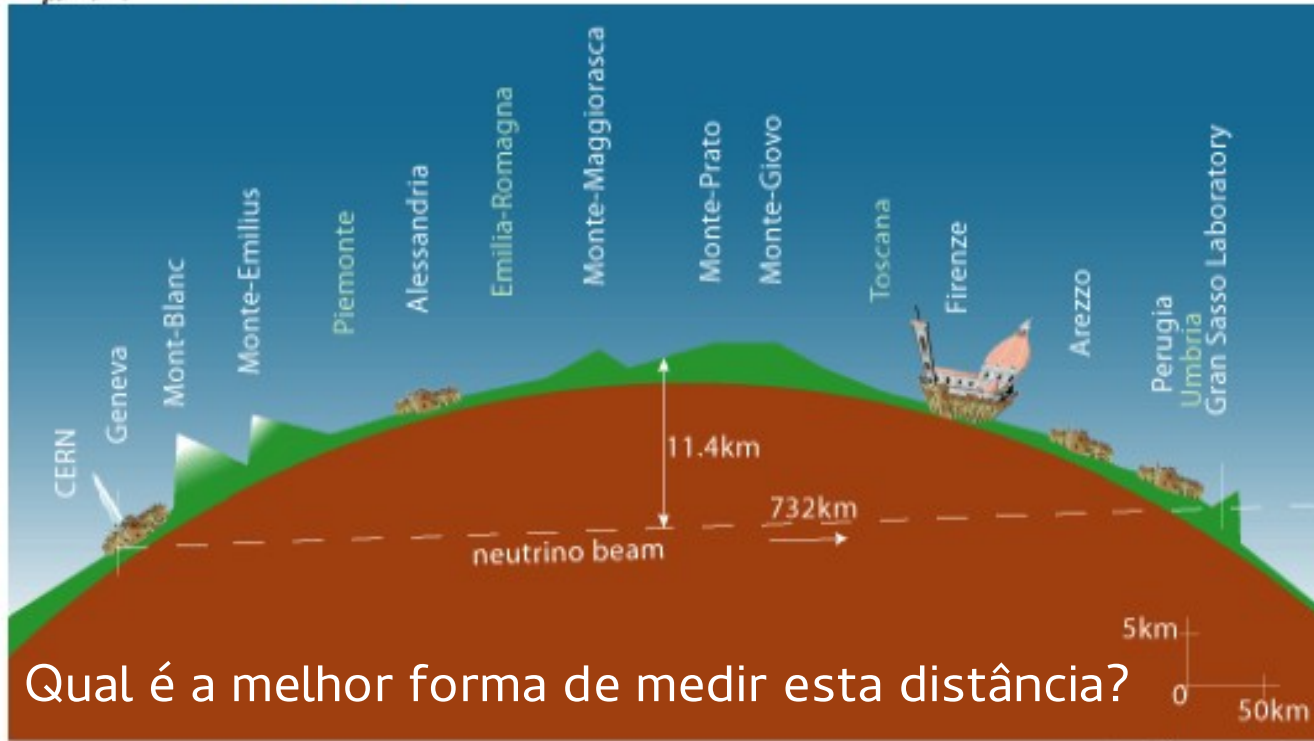
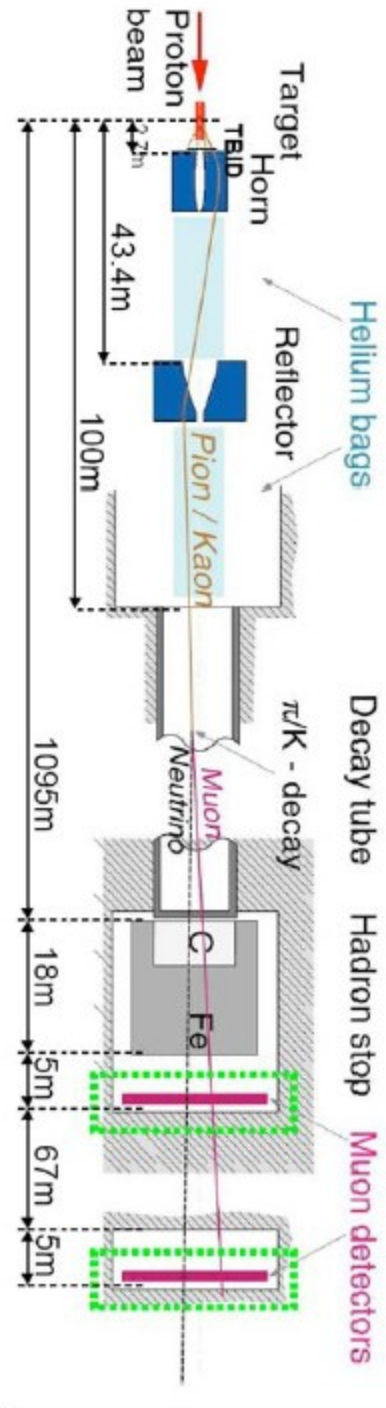
Depende da distância percorrida e da energia do neutrino; os três neutrinos (e , μ , τ) misturam-se, através da sua massa (~ 0).

Para estudar as fontes temos de conhecer bem os mensageiros, mas sem as fontes naturais não teríamos esta descoberta!

CNGS (outras experiências: T2K, no Japão e MINOS, nos EUA)

O CERN produz neutrinos do muão de ~17 GeV que chegam ao LNGS, a ~732 km.

$$P_{\mu \rightarrow \tau} \sim 2\% \text{ a } 3\%$$

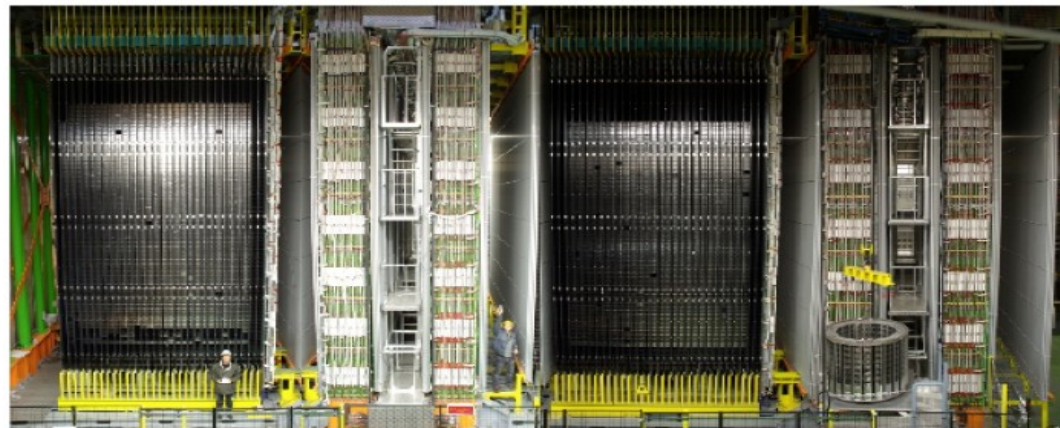


Qual é a melhor forma de medir esta distância?

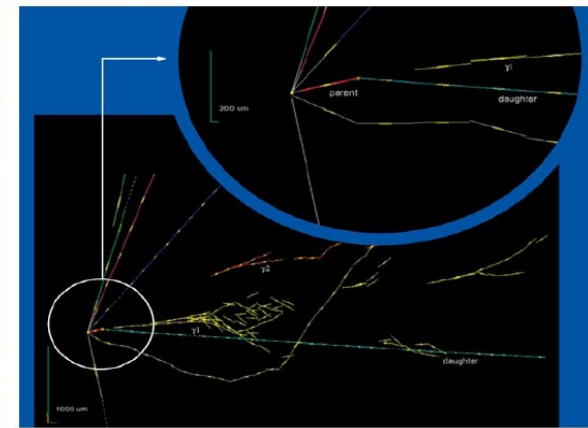
No LNGS:

ICARUS:
argón líquido

OPERA:
emulsão
fotográfica
(tau em 2010)



150 000 blocos para revelar independentemente



Física de Partículas com fontes naturais

A física de partículas começou nos raios cósmicos há 100 anos e muitos laboratórios-observatórios continuam hoje esse trabalho.

A massa dos neutrinos foi a penúltima grande descoberta, mas porque é tão menor que a das outras partículas elementares?

Onde está a anti-matéria que se supõe ter sido criada no BigBang?

O que é a matéria escura? e podemos criá-la nos aceleradores?

O Modelo Padrão é ainda válido para energias superiores ao LHC ou podemos descobrir novas partículas e nova sub-estrutura com os aceleradores cósmicos para já desconhecidos?

No séc. XX a astronomia usou mais comprimentos de onda, no séc. XXI usará também outras partículas além do fóton?