

Raios Cósmicos

Masterclasses Pierre Auger

Uma [nova] janela para

A nossa [IN]compreensão do Universo

Pedro Abreu
LIP, IST

Masterclasses Pierre Auger,
Ciência Viva no Laboratório
LIP, Lisboa
8.07.2025



Raios Cósmicos – Na origem da Física de Partículas



Séc. XIX: o eletroscópio era utilizado desde Coulomb para estudar as Forças Elétricas.

Problema: o eletroscópio descarregava-se sozinho com o tempo!



PORQUÊ ?!

Cargas no ar ? Ionização ?

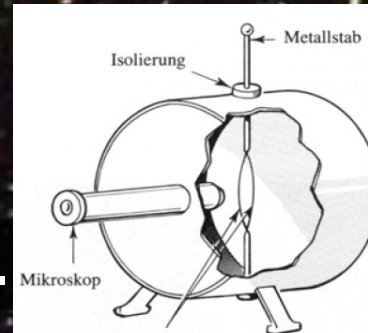
o ar deixa de ser um bom isolante

1896: descoberta a radioatividade.
Radioatividade natural da Terra?

O efeito devia diminuir com a altitude

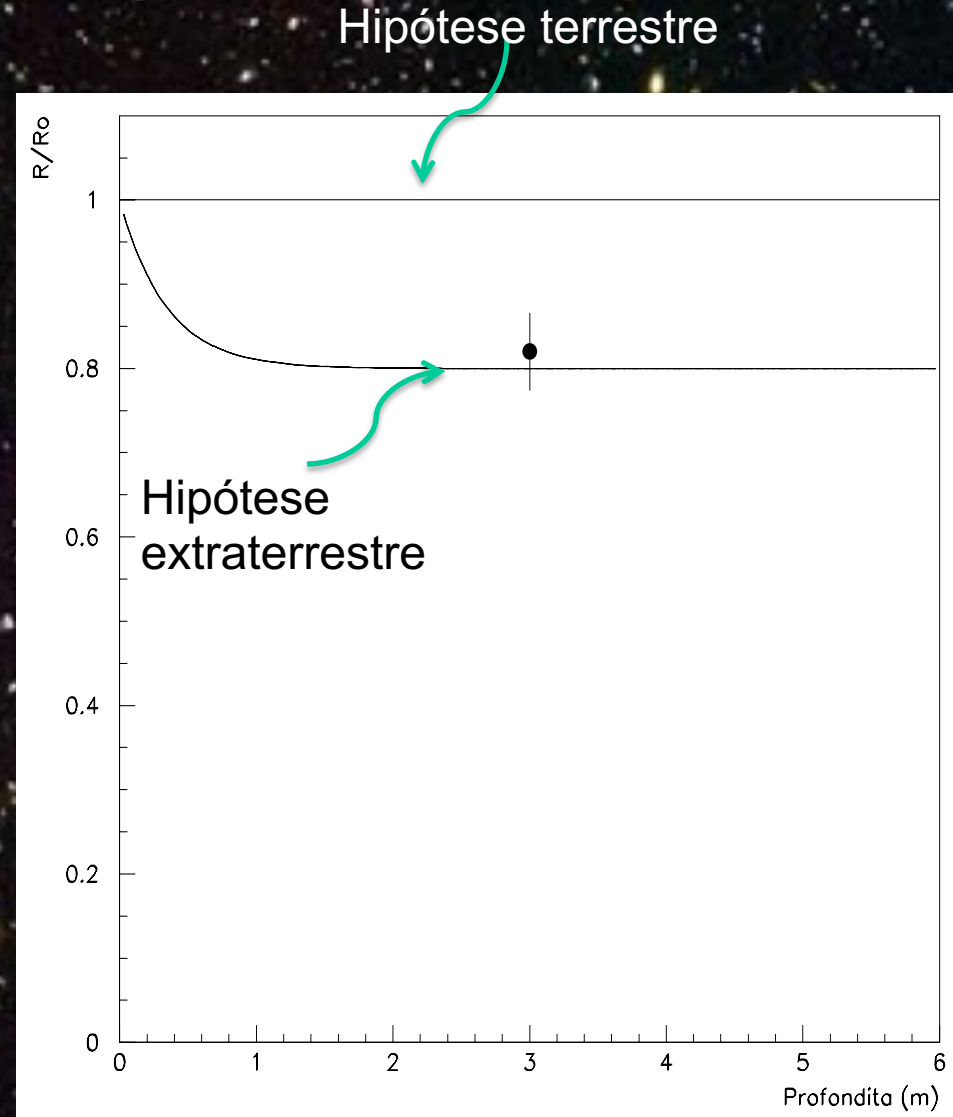
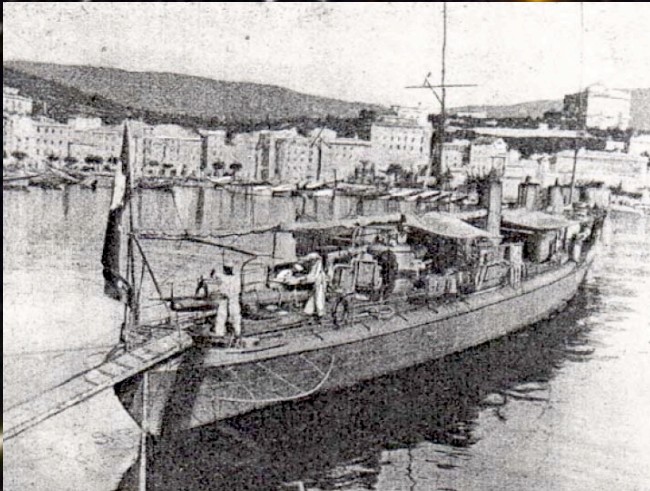
1907: Padre Theodore Wulf melhora
o eletroscópio e sobe à Torre Eiffel

Não diminuía significativamente...



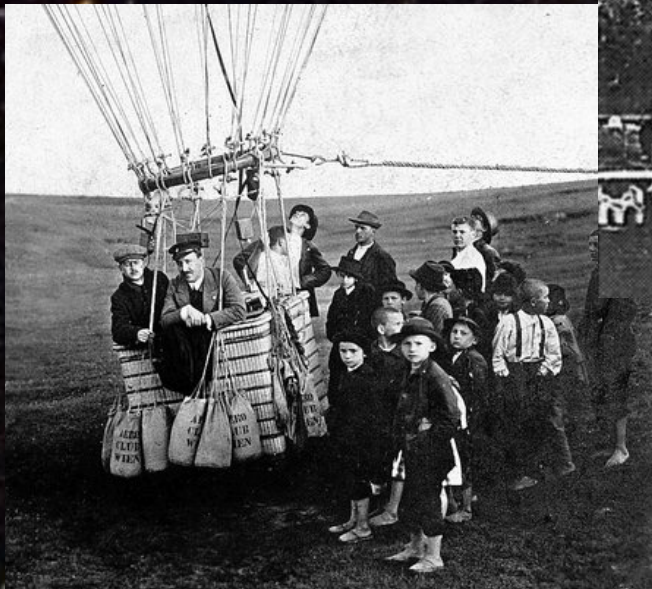
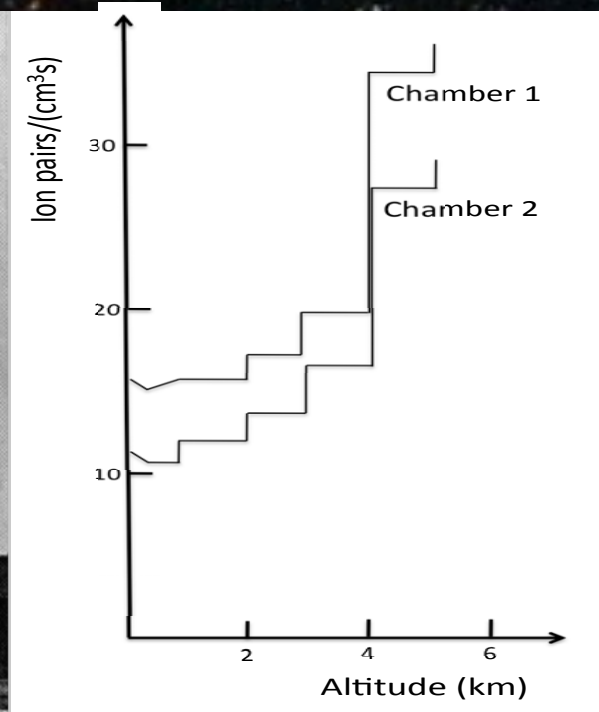
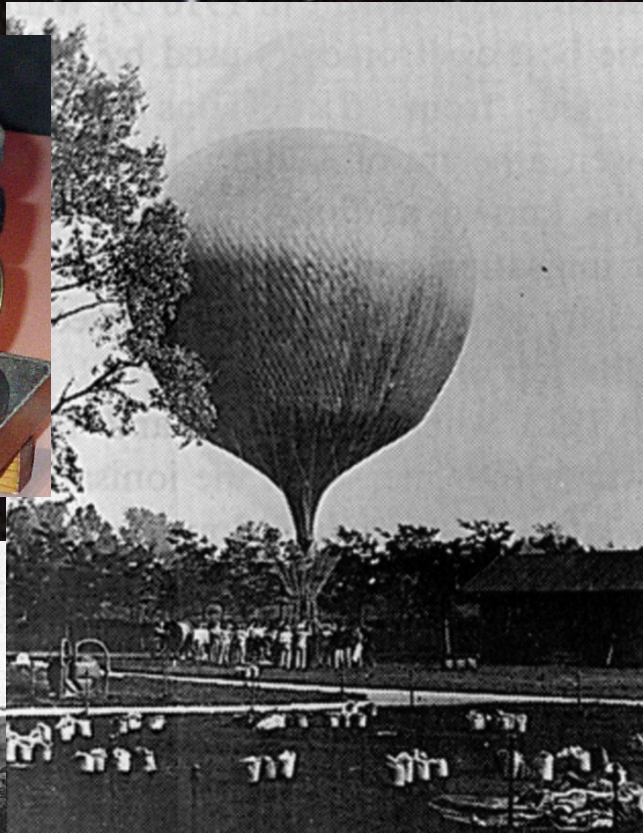
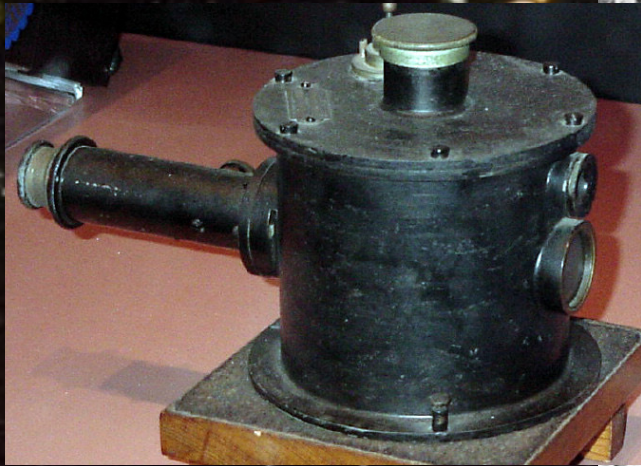
Raios Cósmicos – Na origem da Física de Partículas

1910: Domenico Pacini: Medidas em profundidade



Raios Cósmicos – Na origem da Física de Partículas

Viktor Hess, 1912: 10 Vôos em balão de ar quente até altitudes de 5 km!!



- Dia / Noite
- Eclipse do Sol!

Esta radiação deve vir de cima e não de baixo!!!

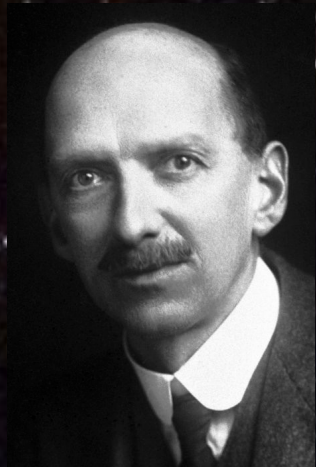
“Raios Cósmicos” ! (Milikan)

Raios Cósmicos – Na origem da Física de Partículas

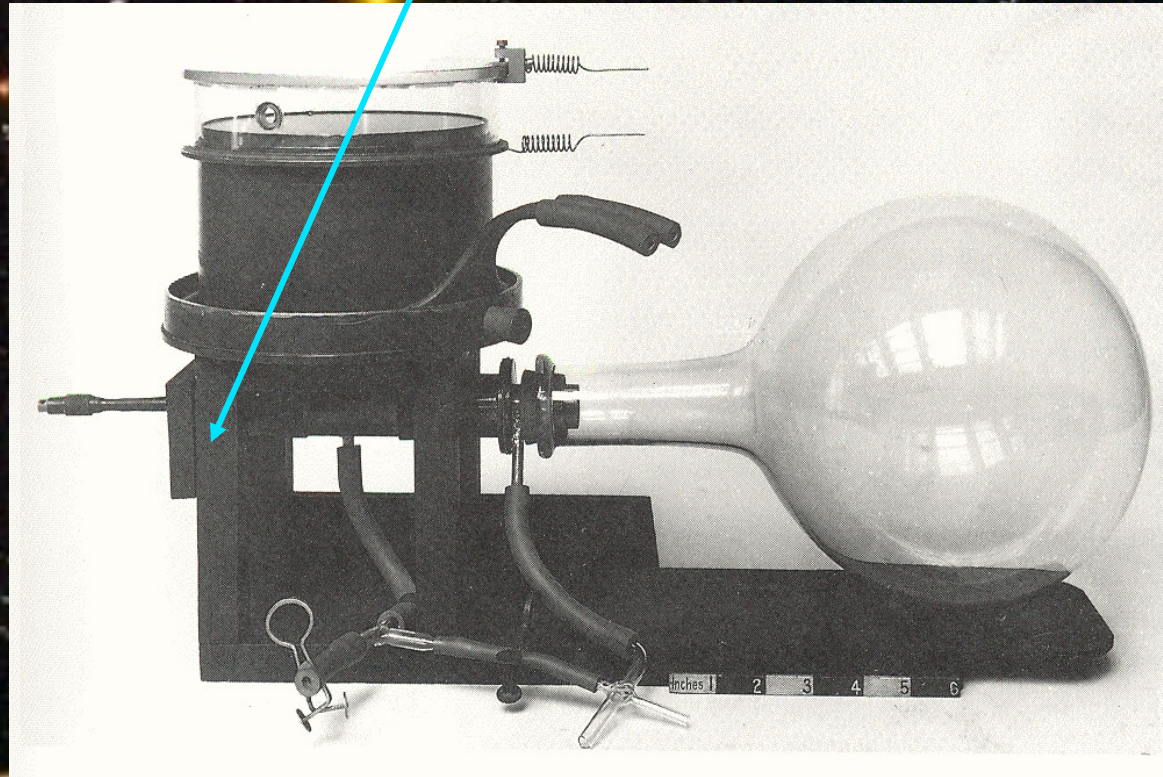
O primeiro acelerador de partículas só apareceu na década de 1950

Os raios cósmicos eram a única fonte de partículas muito energéticas

A câmara de nevoeiro (Wilson, 1911) tornou possível a observação da trajetória de uma partícula eletricamente carregada



Charles T.R. Wilson
Prémio Nobel 1927



Raios Cósmicos – Na origem da Física de Partículas

Paul Dirac, 1928–30: Equação para o eletrão muito energético



Prémio
Nobel 1933

$$\left\{ i\hbar \left(\frac{\partial}{\partial x} + \alpha \frac{\partial}{\partial x} \right) + \alpha mc \right\} \psi = 0$$

que prevê anti-matéria!

$$E = mc^2$$

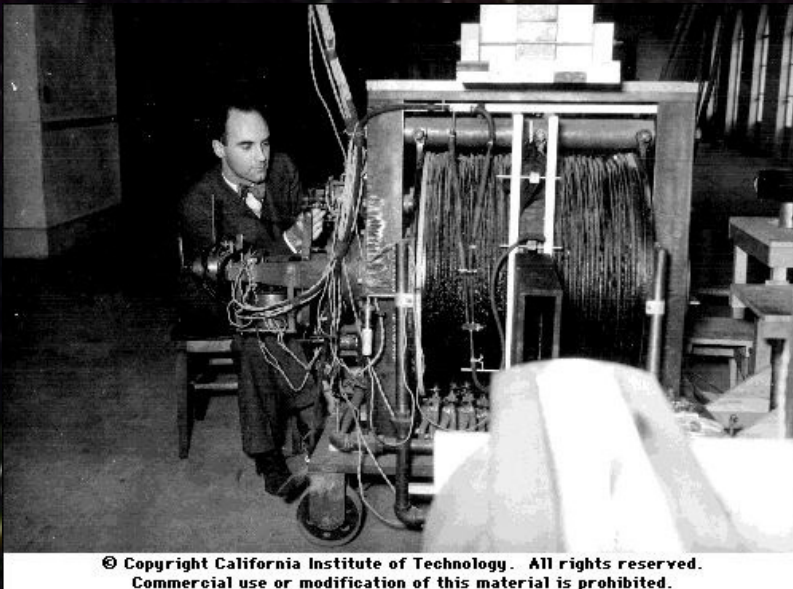
$$E^2 = m^2 c^4 + c^2 p^2$$

$$E = \sqrt{m^2 c^4 + c^2 p^2}$$

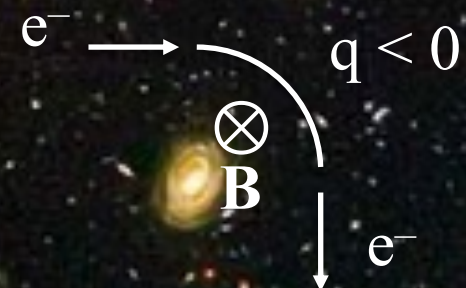
partícula com energia $E < 0 \Leftrightarrow$ ANTI-partícula com $E > 0$

Deviam existir **ANTI-PARTÍCULAS!!!**

Carl Anderson constrói uma
câmara de nevoeiro
com grande campo magnético



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

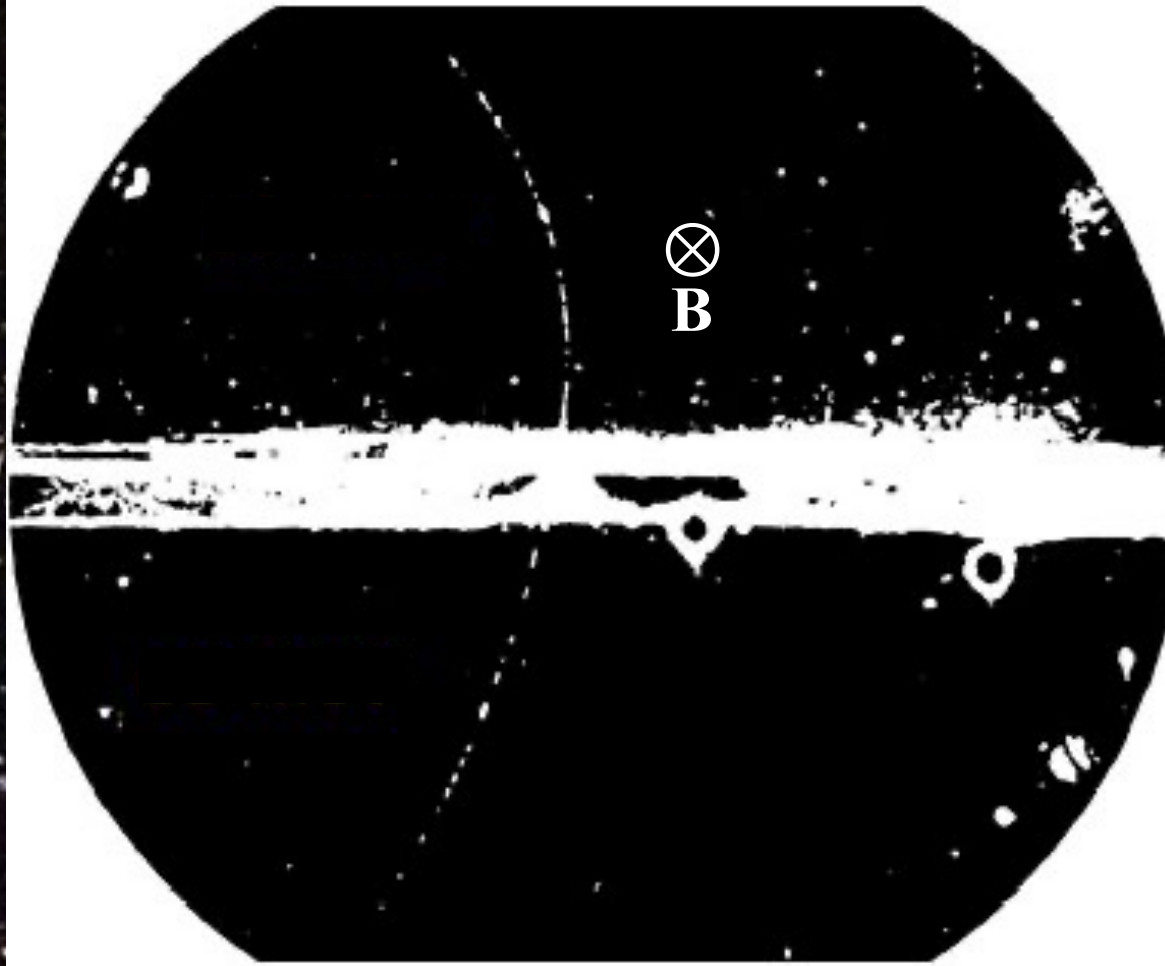


Antimatéria descoberta nos Raios Cósmicos

Carl Anderson



**Prémio
Nobel 1936 c/
Viktor Hess**



o POSITRÃO é o anti-eletrão!

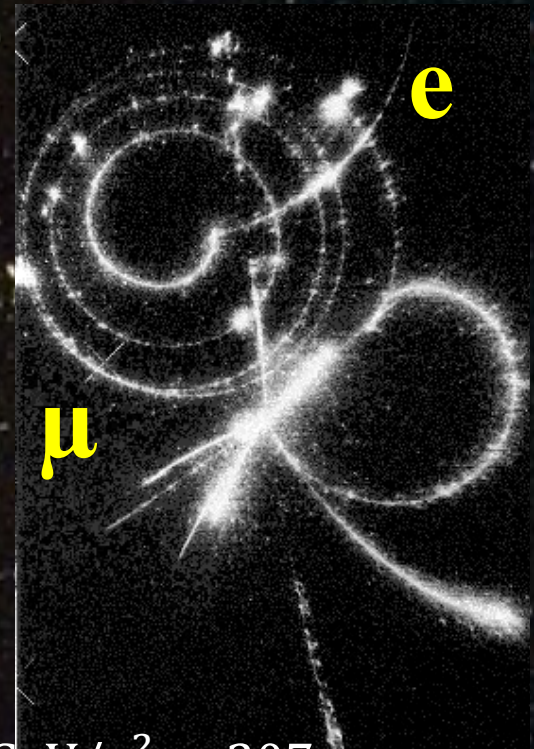
Raios Cósmicos – um laboratório de física de partículas!



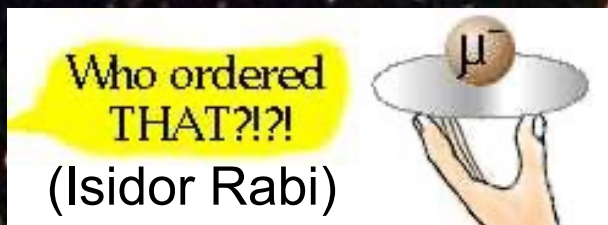
1934: Yukawa propõe uma teoria para a força forte (nuclear), mediada por uma partícula de massa entre a do elétron e a do próton: o MESOTRÃO (de massa $\cong 0,140 \text{ GeV}/c^2$)

Hideki Yukawa (Prémio Nobel 1949)

Anderson and Neddermeyer transportaram o detetor para a montanha (Peak mountain)

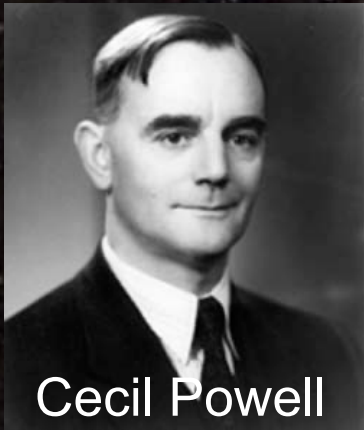


1937: Descubrem o muão (μ) !!!



(com massa $m_\mu = 0,106 \text{ GeV}/c^2 \cong 207 m_e \cong m_p/9$, mas não tem interação nuclear forte!)

Raios Cósmicos – um laboratório de física de partículas!

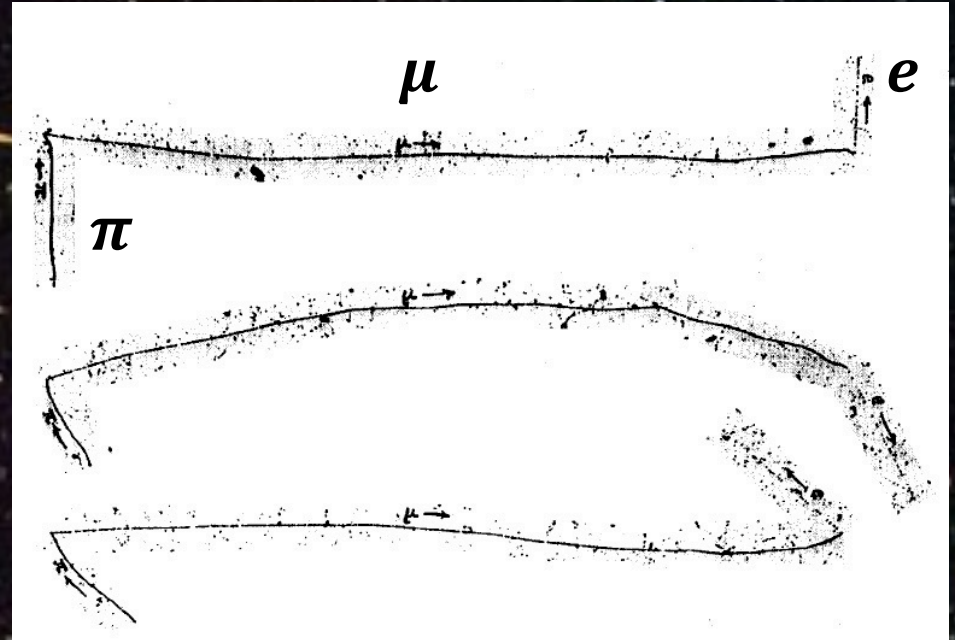


Cecil Powell



Prémio Nobel 1950

**1947: Powell (com César Lattes e Giuseppe Occhialini)
descobrem o píon (π)**



No mesmo ano, Rochester e Butler descobrem os Kaões, partículas de massa intermédia entre os píões e o protão: $m_K \cong 0,5 \text{ GeV}/c^2$

Mas estas novas partículas tinham um comportamento muito estranho, tendo-lhes sido associado um novo número quântico – a estranheza.

Muitas outras descobertas se seguiram, com o advento dos aceleradores artificiais, de outras partículas com as propriedades mais variadas.

O MODELO PADRÃO DAS PARTÍCULAS E INTERACÇÕES FUNDAMENTAIS



O Modelo Padrão é uma teoria quântica que resume o nosso conhecimento actual da física das partículas e interações fundamentais (as interações manifestam-se através das forças e dos decaimentos das partículas instáveis).

FERMIÕES

constituintes da matéria

spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptões spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Sabor	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica	Sabor	Massa Aprox. GeV/c ²	Carga Eléctrica
ν_L neutrino* mais leve	$(0-2) \times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electrão	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M neutrino* intermédio	$(0.009-2) \times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muão	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H neutrino* pesado	$(0.05-2) \times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

*Ver em baixo o parágrafo sobre neutrinos.

Spin é o momento angular intrínseco das partículas. O spin é dado em unidades de $\hbar$, que é a unidade quântica de momento angular, com $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$ GeV s $\approx 1.05 \times 10^{-34}$ J s.

Cargas eléctricas são dadas em unidades de carga eléctrica do próton. Em unidades SI, a carga eléctrica do próton é 1.60×10^{-19} coulomb.

A unidade de **Energia** em física de partículas é o **GeV** (giga-electron-volt), ao atravessar a diferença de potencial de 1 GeV = 10^9 eV = 1.6 $\times 10^{-10}$ J. A massa do próton é 0.938 GeV/c².

Neutrinos

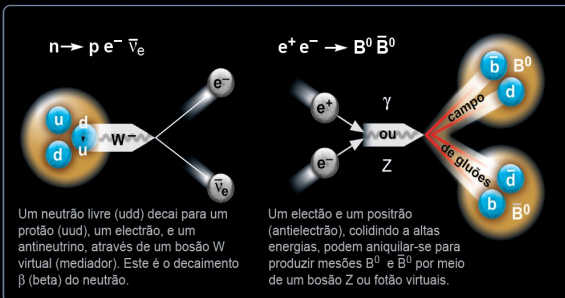
Os neutrinos são produzidos no Sol, supernovas, reactores nucleares, colisões em aceleradores, e muitos outros processos. Qualquer neutrino pode ser descrito como um de três estados de sabor de neutrinos: ν_e , ν_μ , ou ν_τ , de acordo com o tipo de leptão associado na sua produção. Cada estado destes é uma mistura quântica de três estados de massa de neutrinos ν_L , ν_M , e ν_H , para os quais os intervalos de massa são indicados na tabela. O estudo dos neutrinos pode ajudar à compreensão da assimetria matéria-antimatéria e da evolução das estrelas e das estruturas das galáxias.

Matéria e Antimatéria

Para cada tipo de partícula existe o correspondente tipo de antipartícula, indicado com uma barra sobre o símbolo da partícula (excepto se se mostrar a carga + ou -). A partícula e a antipartícula têm a mesma massa e spin mas cargas eléctricas opostas. Alguns bósons electricamente neutros (por ex., Z^0 , γ , e $\eta_c = c\bar{c}$, mas não $K^0 = d\bar{s}$) são as próprias antipartículas.

Processos com Partículas

Estes diagramas são concepções artísticas. Áreas alaranjadas representam as nuvens de glúons.



BOSÕES

mediadores das interações

spin = 0, 1, 2, ...

Electrofraca spin = 1			Forte (cor) spin = 1		
Nome	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica	Nome	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica
γ fóton	0	0	g glúão	0	0
W^- bósons W	80.39	-1	Bosão de Higgs spin = 0		
W^+ bósons W	80.39	+1	Nome	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica
Z bóson Z	91.188	0	H Higgs	126	0

Bosão de Higgs

O bóson de Higgs é um elemento fundamental do Modelo Padrão. A sua descoberta confirma o mecanismo pelo qual as partículas elementares adquirem massa.

Carga de cor

Só os quarks e os glúões é que possuem "carga de cor" e são sensíveis à interação forte. Cada quark pode ter uma de três cores ("vermelho", "verde", "azul"). Mas estas não têm nada que ver com as cores da luz visível. Tal como as partículas electricamente carregadas interagem trocando glúões.

<http://www.cpepphysics.org/fundamental-particles/>

Propriedade	Interação Gravitica	Interação Fraca	Interação Electromagnética (Electrofraca)	Interação Forte
Actua em:	Massa - Energia	Sabor	Carga Eléctrica	Carga de cor
Partículas afectadas:	Todas	Quarks, Leptões	Electricamente carregadas	Quarks, Glúões
Partículas mediadoras:	Gravitão (ainda por observar)	$W^+ W^- Z^0$	γ	Glúões
Intensidade a $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60

partículas "coloridas" (quarks e glúões) se aniquilam, a energia no campo de forças de cor entre elas aumenta. Esta energia pode ser convertida em sucessivos pares quark-antiquark. Estes quarks (q) e antiquarks ($\bar{q}$) combinam-se em hádrons, que são as partículas observáveis.

Dois tipos de hádrons foram observados na natureza: mesões $q\bar{q}$ e bárions qqq . Entre os muitos tipos de bárions observados temos o próton (uud), antipróton ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$), e neutrão (udd). As cargas eléctricas dos quarks somam-se para o próton ter carga 1 e o neutrão carga 0. Entre os vários tipos de mesões temos o píon π^+ (u $\bar{d}$), kaão K^+ (u $\bar{s}$), e B^0 (d $\bar{b}$).

Saiba mais em **ParticleAdventure.org**



Mistérios por resolver

Motivados por novas questões na nossa compreensão física do Universo, os físicos de partículas seguem caminhos diferentes na direcção de novas descobertas maravilhosas. As experiências poderão vir a encontrar dimensões extra de espaço, buracos negros microscópicos, ou sinais da teoria das cordas.

Porque acelera o Universo?



A expansão do Universo parece estar a acelerar. Será devido à Constante Cosmológica de Einstein? Se não, poderão as experiências vir a revelar novas forças da Natureza ou até dimensões (escondidas) de espaço?

Onde está a Antimatéria?



Matéria e antimatéria terão sido criadas em iguais quantidades no Big Bang. Porque é que agora vemos só matéria, à excepção de quantidades diminutas de antimatéria criadas em laboratório ou nos Raios Cósmicos?

O que é a Matéria Escura?



Grande parte da massa observada nas galáxias e aglomerados de galáxias é formada por matéria invisível. Pode esta matéria escura ser feita de novos tipos de partículas que apenas interagem fracamente com a matéria normal?

Existem Dimensões Extra?



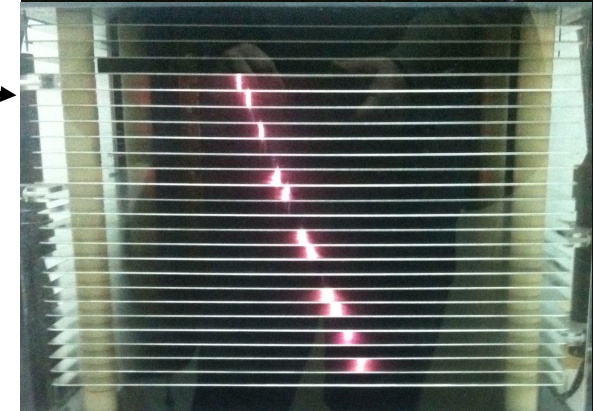
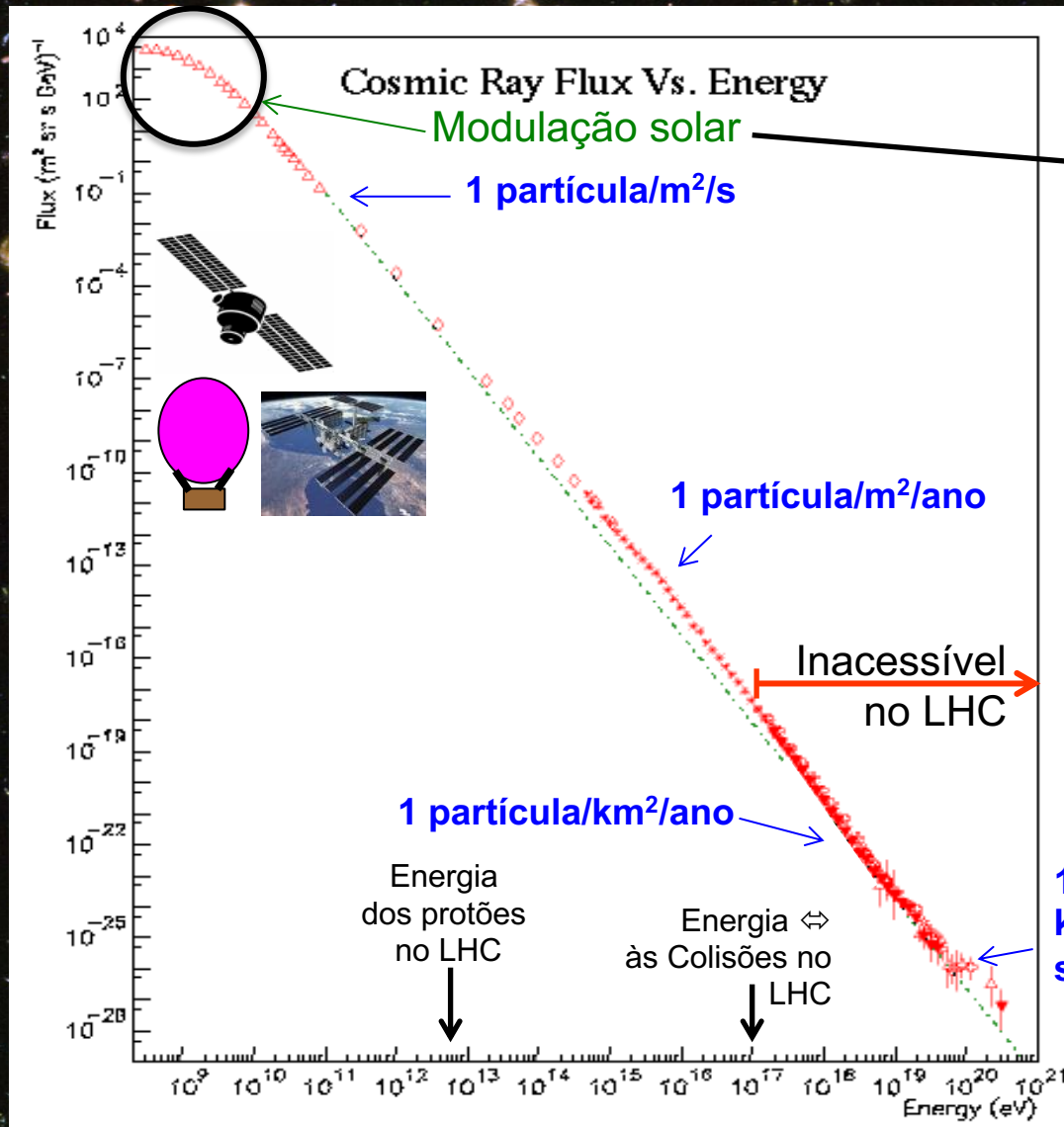
Uma indicação para dimensões extra de espaço pode ser a baixíssima intensidade da força gravítica, quando comparada com as outras três forças fundamentais da Natureza (um ímã pode levantar um clipe, sobrepondo-se à gravidade exercida por todo o planeta Terra).

Raios C3smicos – Os maiores aceleradores no Universo!



Fluxo em funo3o da energia (part3culas que nos chegam)

Fluxo
32 ordens de grandeza em



Energia no centro de massa, E_{CM} , 3 a energia dispon3vel numa colis3o3:

LHC – Colis3o3 frontal:

$$E_{CM} = 2E_P$$

Raio C3smico – Colis3o3 alvo “fixo”:

$$E_{CM} = \sqrt{2mE_P}$$

1 part3cula/
 $\text{km}^2/\text{s3culo}$!

11 ordens de grandeza em Energia

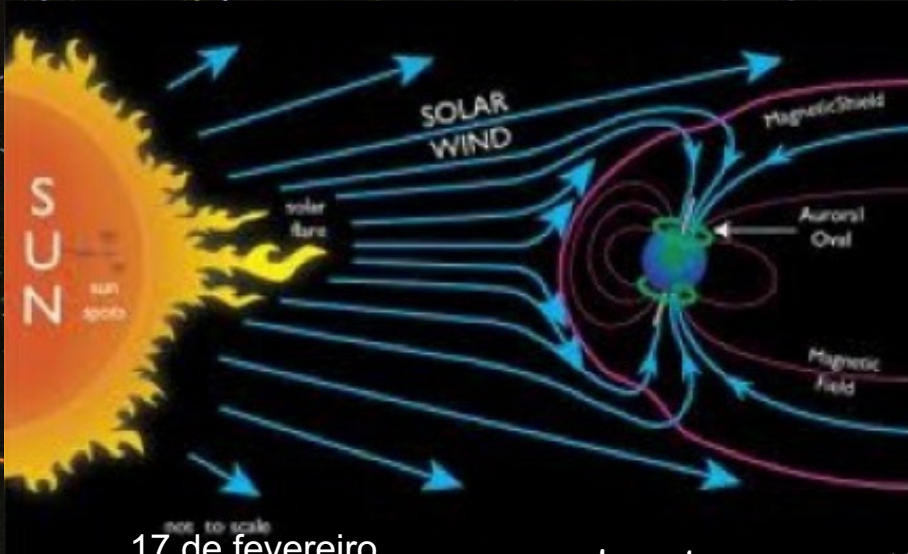
Raios Cósmicos – origem das Auroras Boreais/Austrais



Aurora Boreal



Aurora Austral
(vista da ISS)



Partículas carregadas provenientes do Sol e de outros locais, com energias “baixas”, são desviadas para os pólos pelo campo magnético da Terra, levando à Aurora Boreal no Pólo Norte e Aurora Austral no Pólo Sul

17 de fevereiro
2024

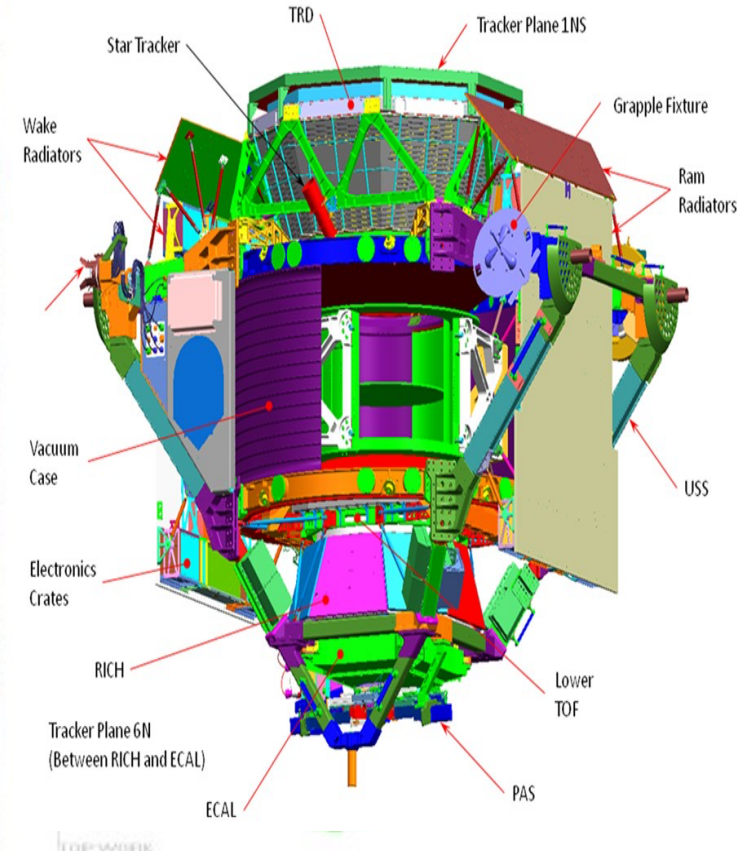
pedro abreu - partículas e raios cósmicos

Raios Cósmicos – Detecção no espaço



(dos balões à Estação Espacial Internacional)

AMS-02



AMS-02 foi instalado na ISS em 2011 e funcionará até 2028

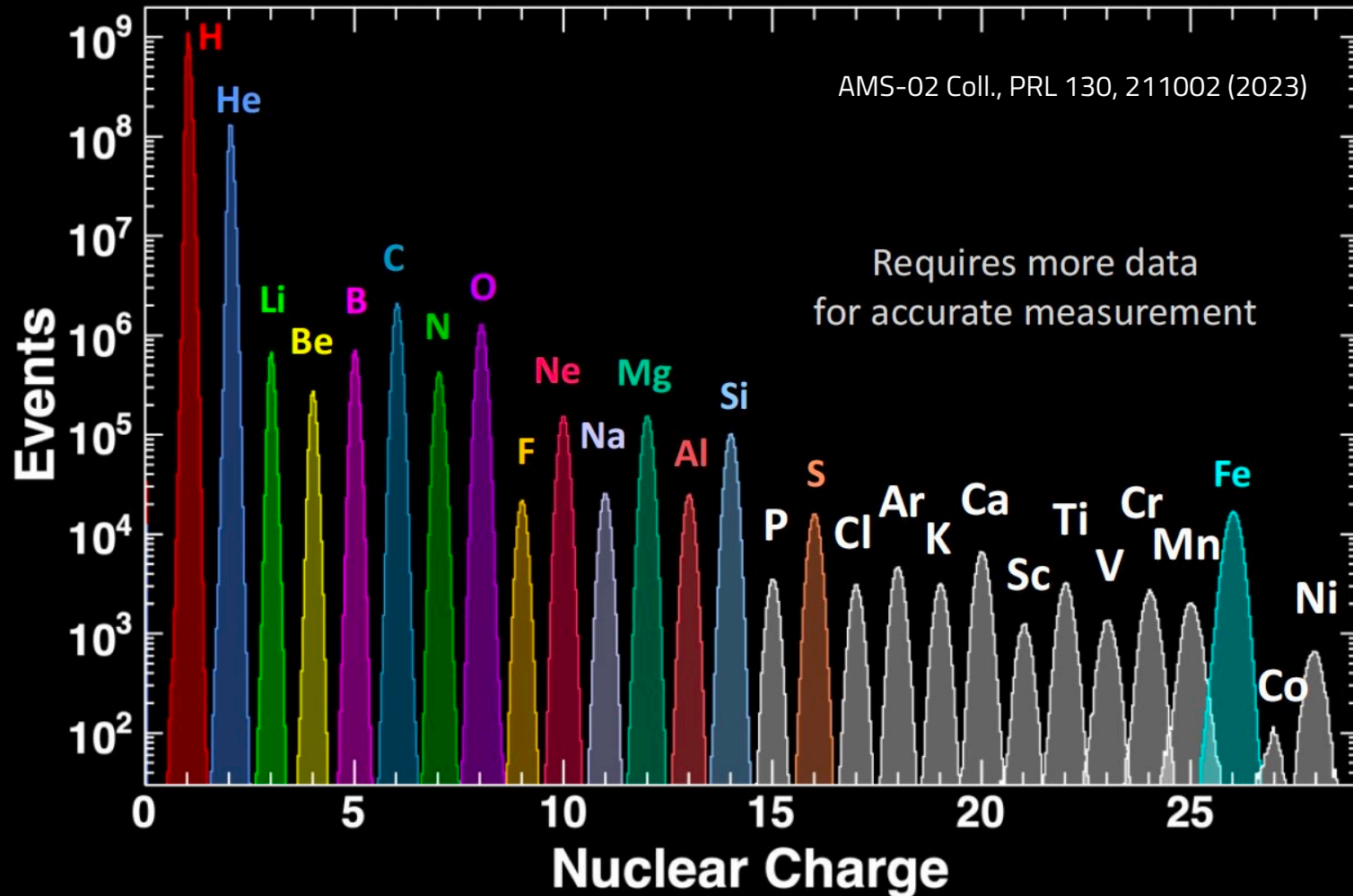
17 de fevereiro
2024

pedro abreu - partículas e raios cósmicos



AMS determination of Cosmic Ray Nuclei

AMS will provide complete and accurate spectra for the
29 elements and provide the foundation for a comprehensive theory of cosmic rays.



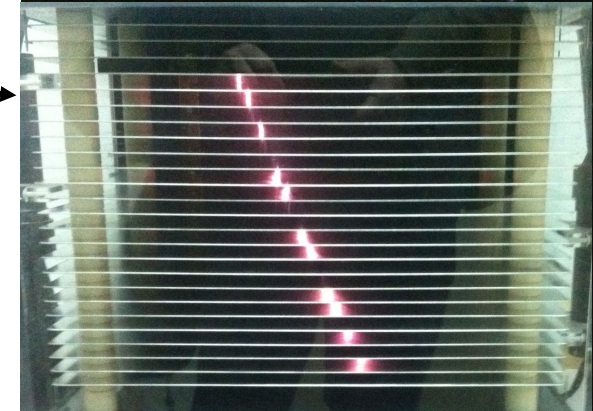
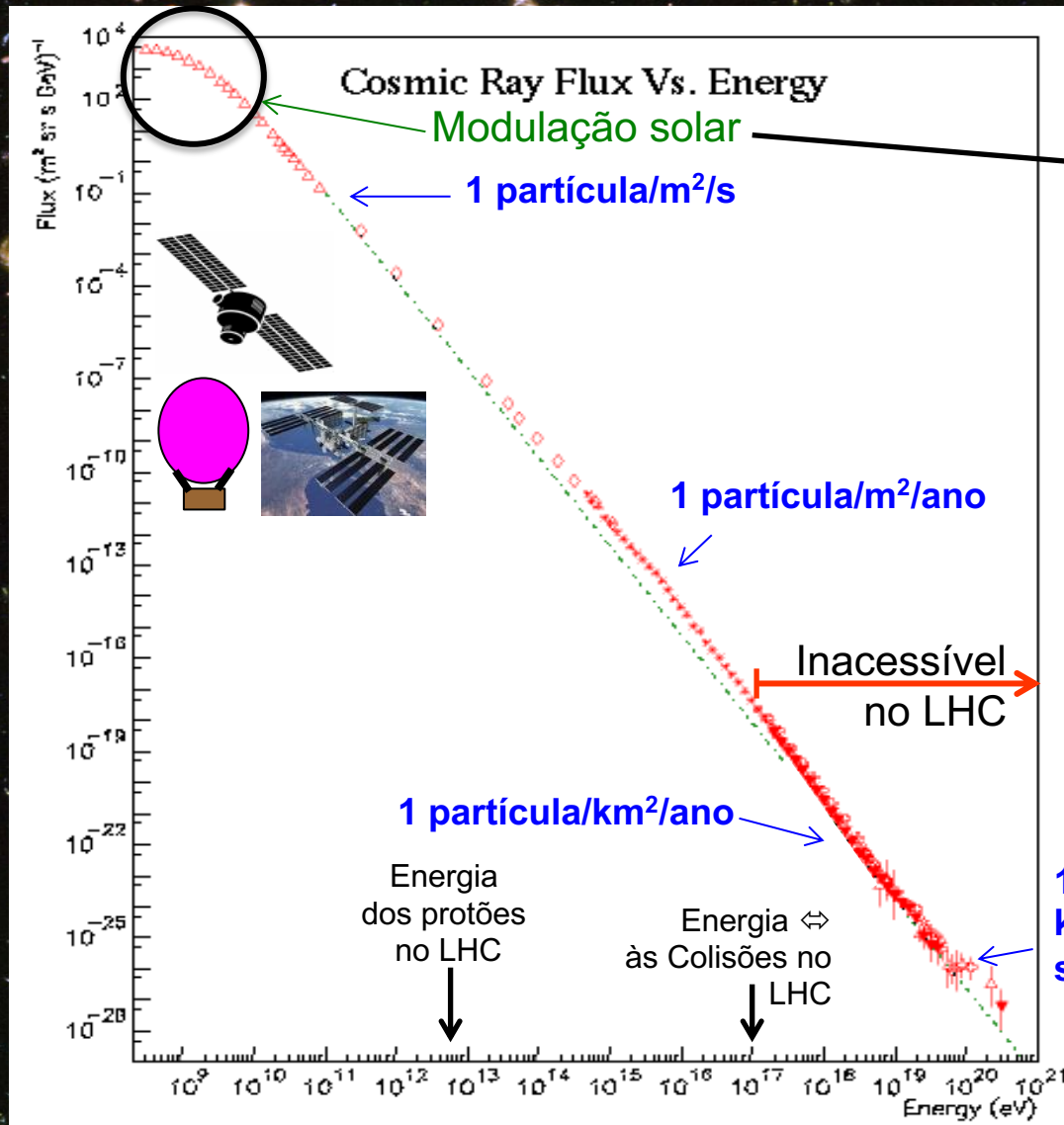
Raios C3smicos – Os maiores aceleradores no Universo!



Fluxo em funo3o da energia (part3culas que nos chegam)

Fluxo

32 ordens de grandeza em



Energia no centro de massa, E_{CM} , 3 a energia dispon3vel numa colis3o3o:

LHC – Colis3o3o frontal:

$$E_{CM} = 2E_P$$

Raio C3smico – Colis3o3o alvo "fixo":

$$E_{CM} = \sqrt{2mE_P}$$

11 ordens de grandeza em

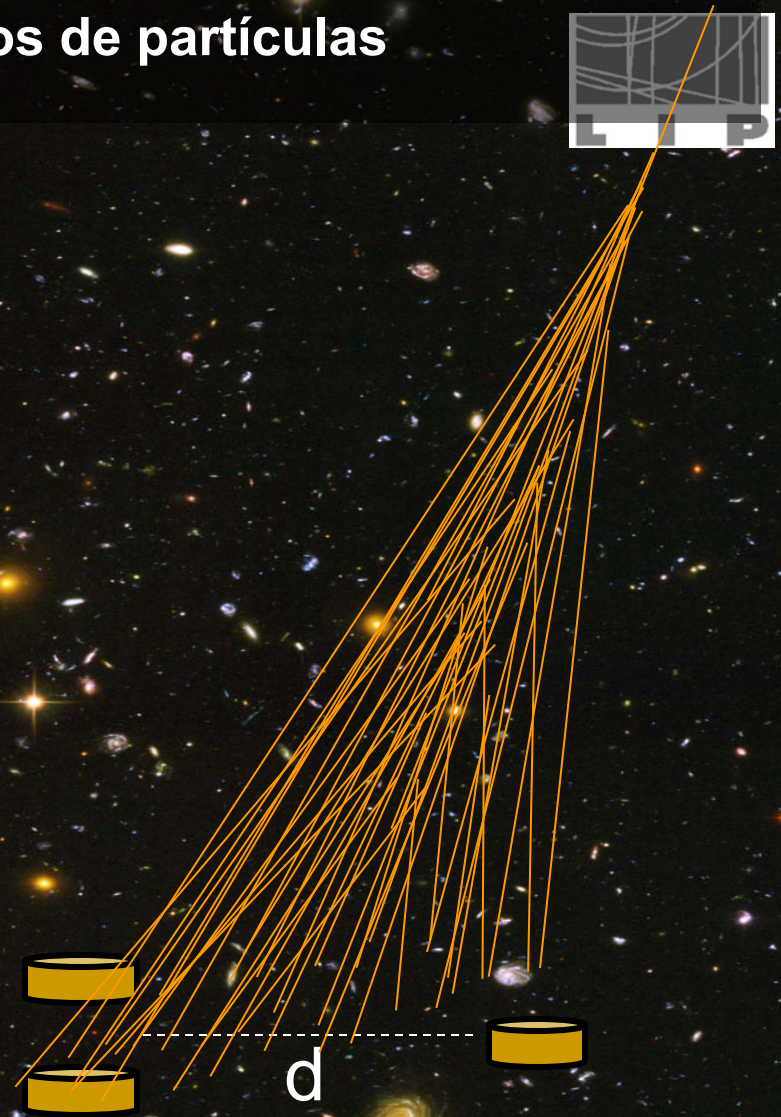
Energia

Raios Cósmicos – Chuveiros de partículas



Pierre Auger, 1938

Coincidências !

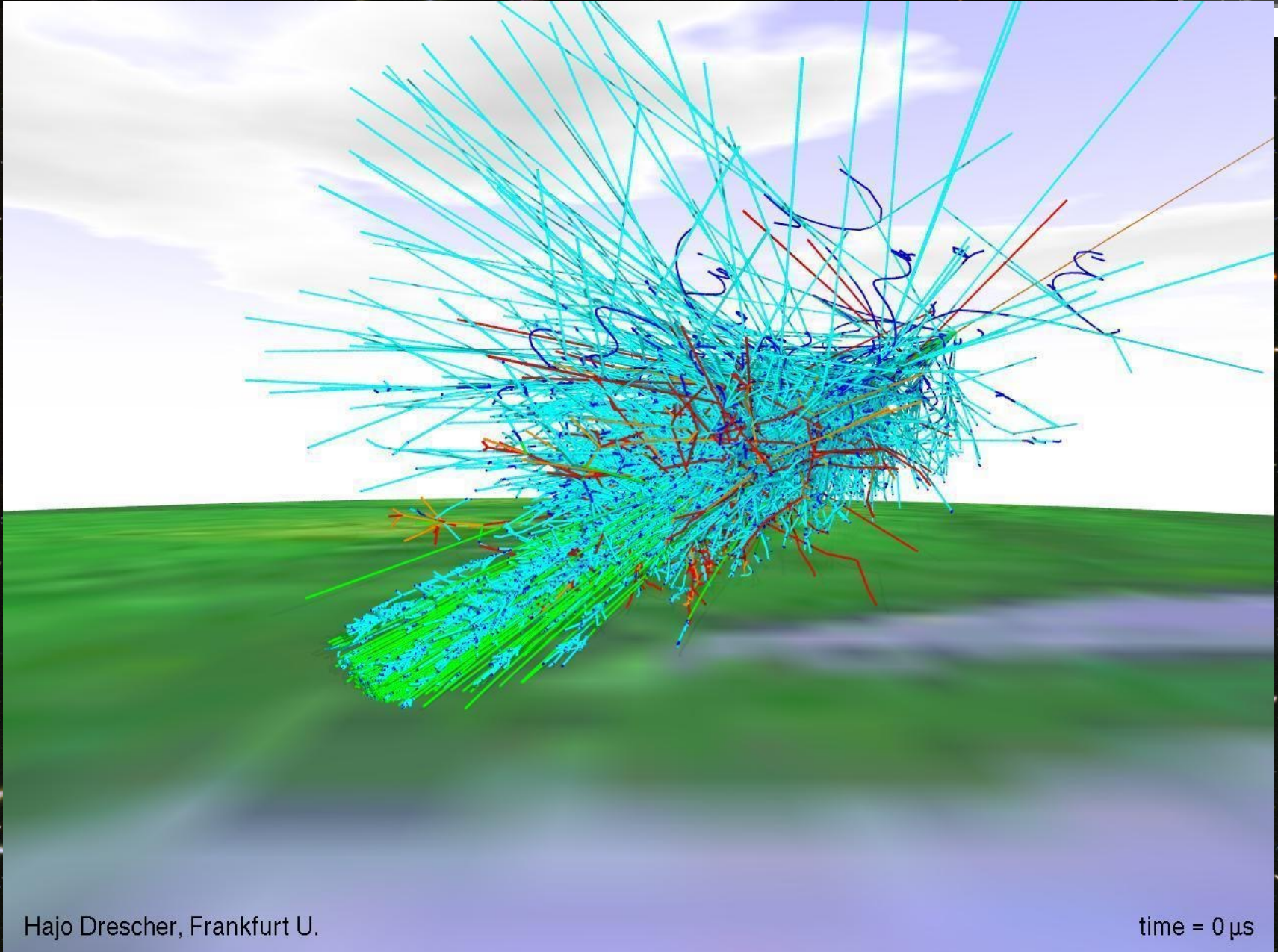


**Primeiras estimativas da energia dos chuveiros
(do raio cósmico primário)!**

17 de fevereiro
2024

pedro abreu - partículas e raios cósmicos

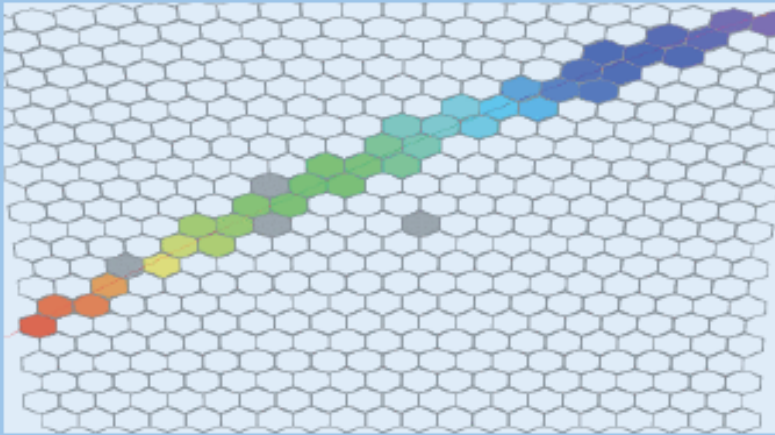
Raios Cósmicos de Energia Extrema – Chuveiros de Partículas



Raios Cósmicos de Energia Extrema – Chuveiros de Partículas



vistas pela luz produzida no ar



Raios Cósmicos
com $E > 10^{14}$ eV
originam chuveiros
de partículas na atmosfera

ou detectadas no solo
por amostragem!

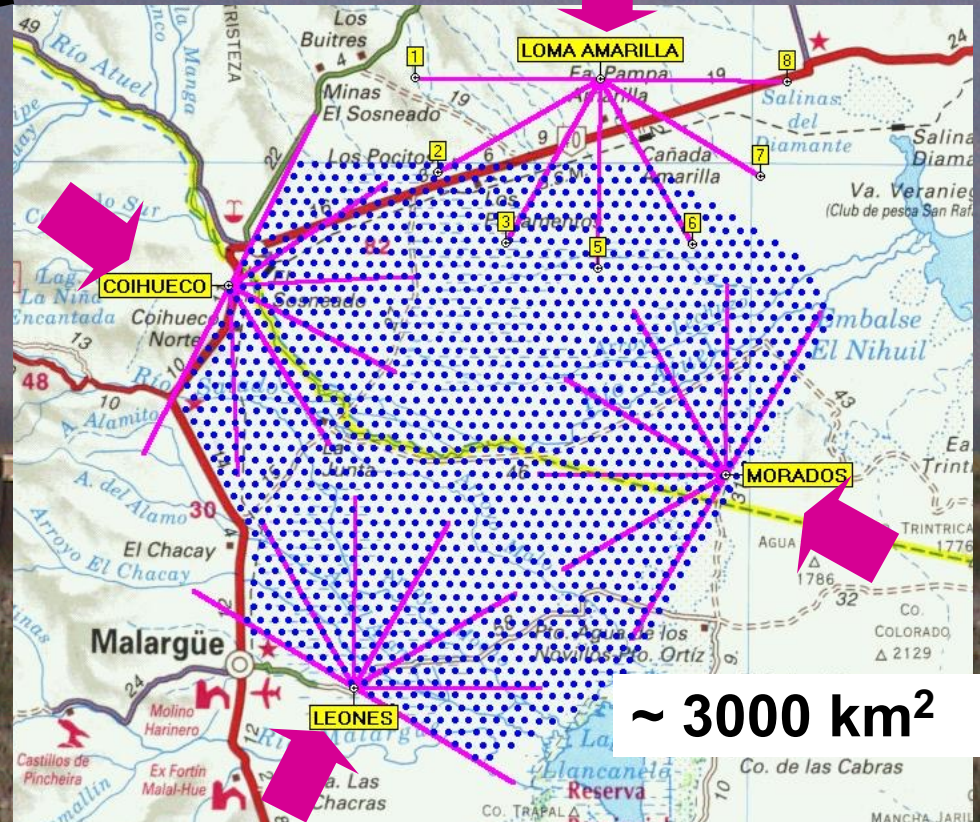


milhões de partículas espalhados por km^2

1 próton/pião:
100 muões:
10000 $e^-/e^+/\gamma$

Click to edit Master title style

Malargüe, Mendoza (Argentina)



~ 3000 km²

Observatório Pierre Auger

1 partícula/km²/século == 30 por ano

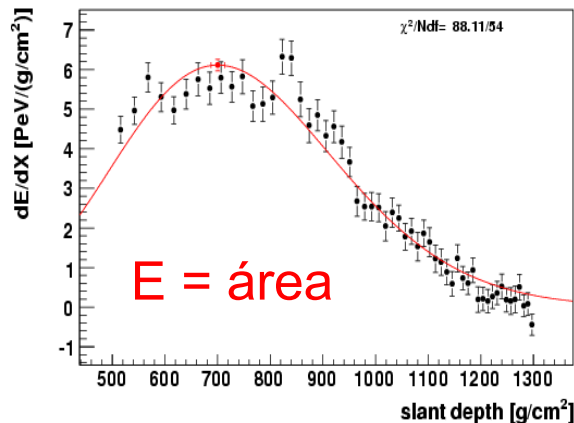
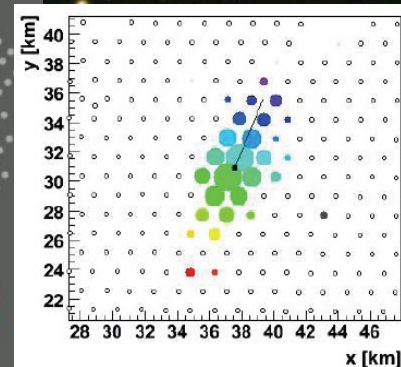
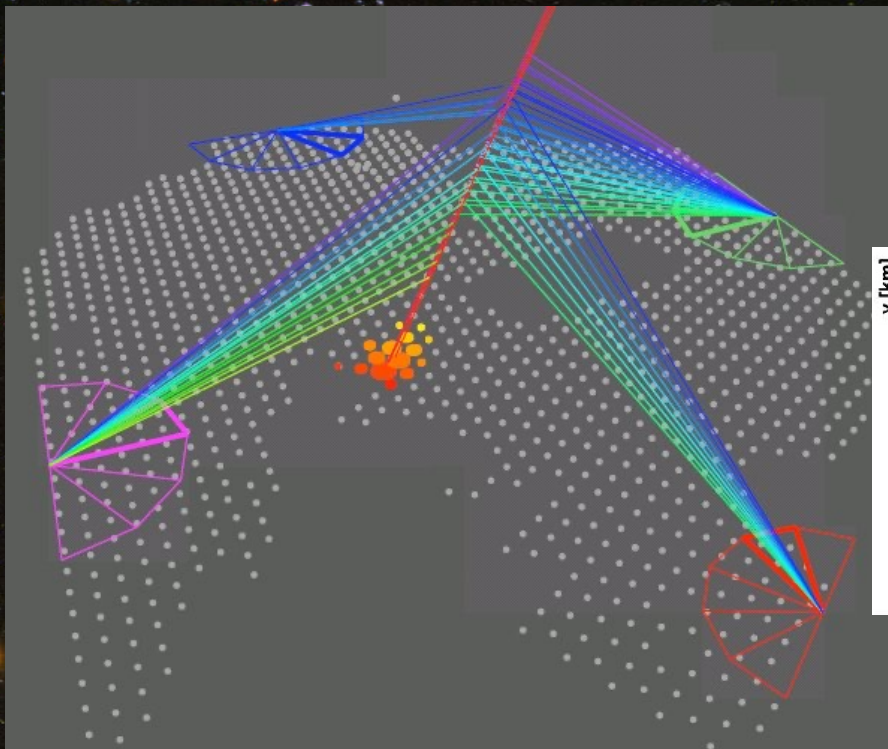
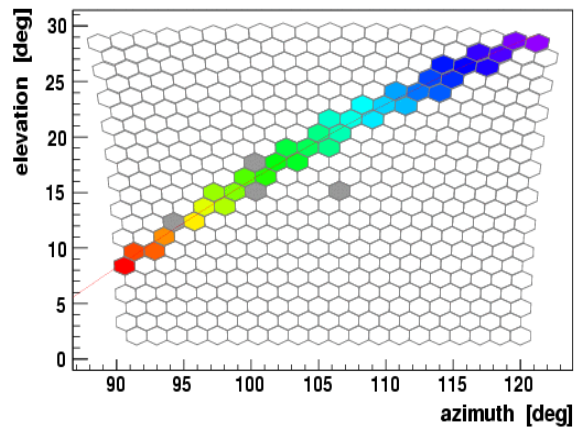


-----> Lisboa, Portugal

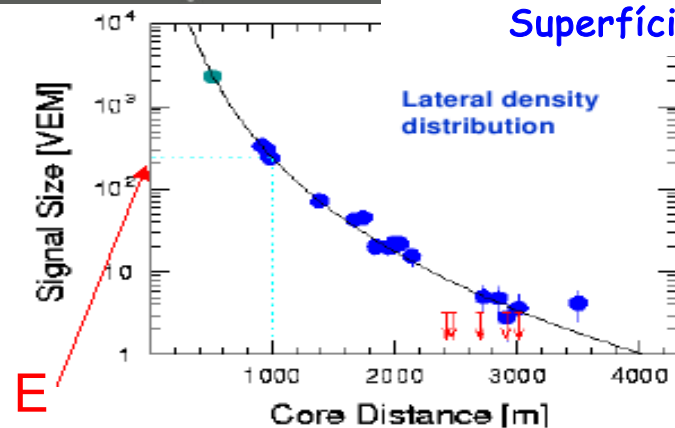
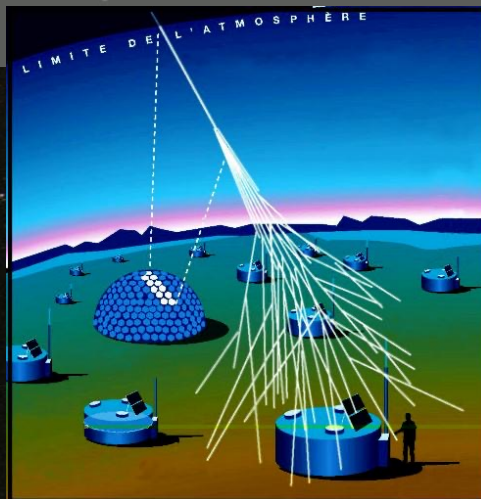
Um chuva de partículas no Observatório Pierre Auger



FD (Detector de Fluorescência):

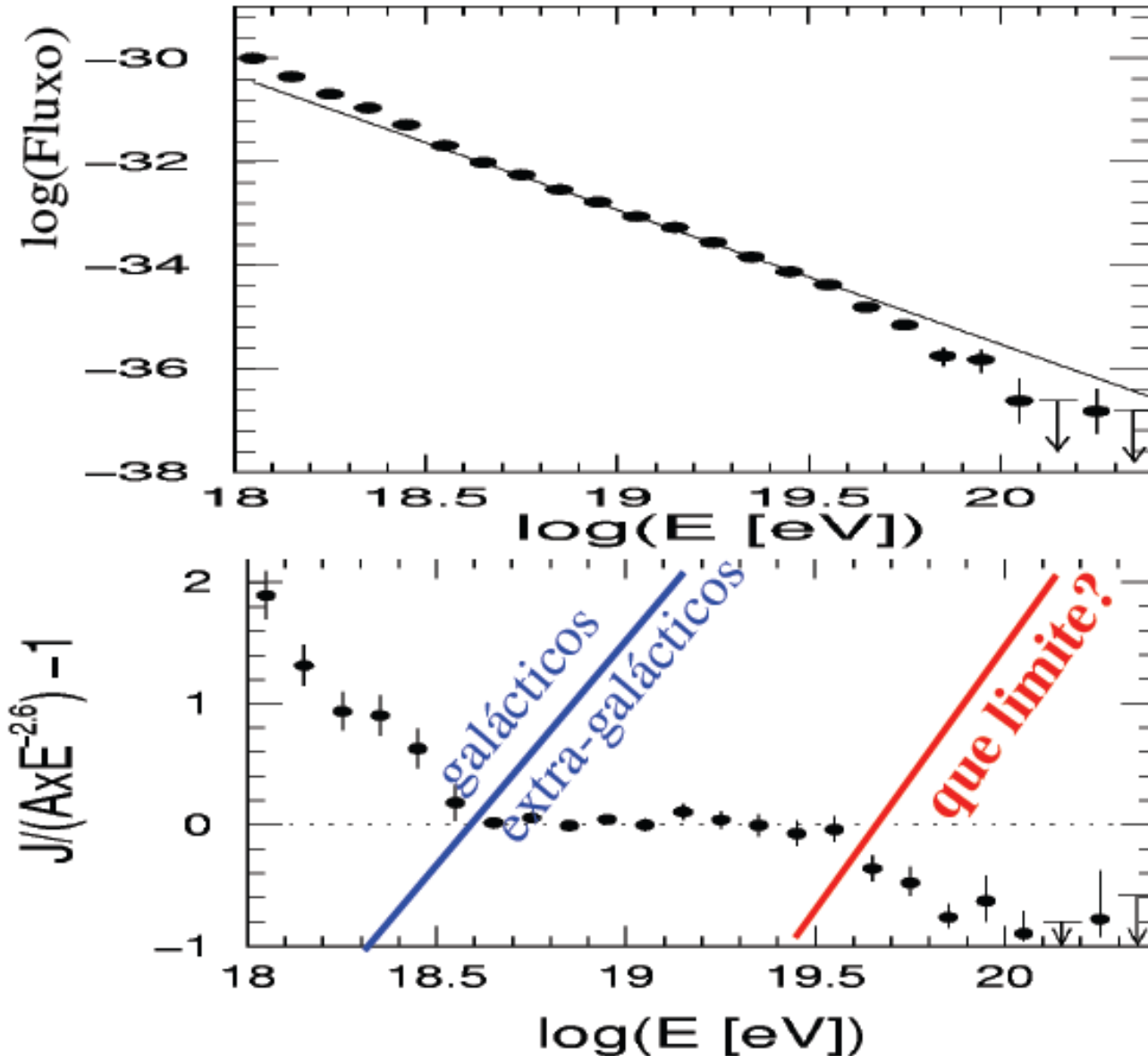


SD (Detector de Superfície):



17 de fevereiro
2024

O Espectro de Energia



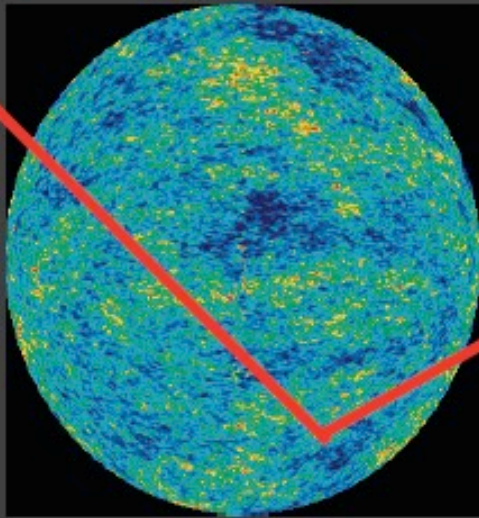
Medida do fluxo,
por dois métodos
independentes com
muito mais precisão
(só um ano de dados!)

Há limite para a
energia possível
na galáxia!
E fora?



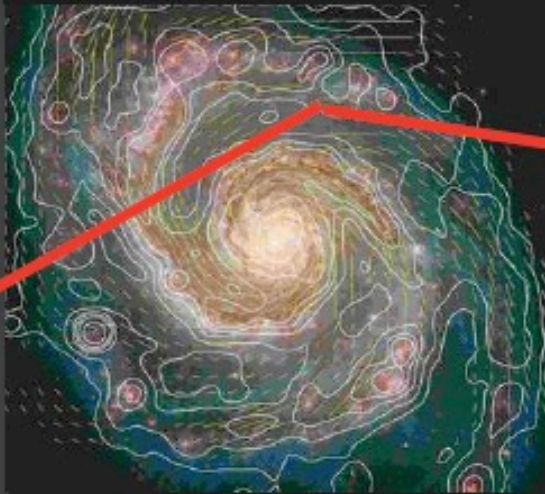
Raios cósmicos extra-galácticos

O Universo não é vazio:
radiação cósmica de fundo



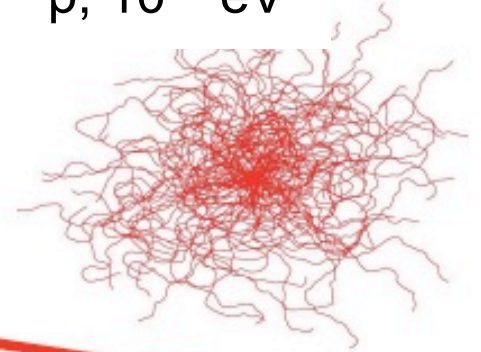
$T = 2.725 \text{ K} (0.2 \text{ meV}) \pm 0.0002 \text{ K}$

As Galáxias têm matéria
e campos magnéticos

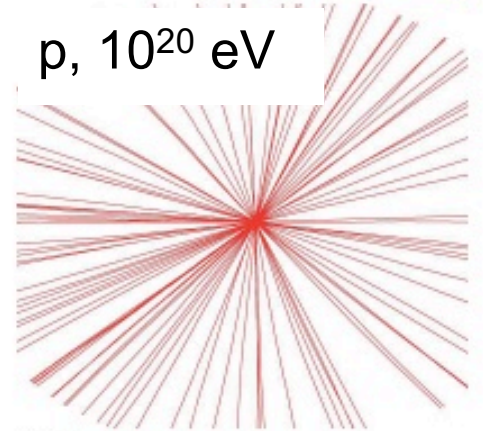


não medidos: $\sim \mu\text{G}$ em kpc?

$p, 10^{18} \text{ eV}$



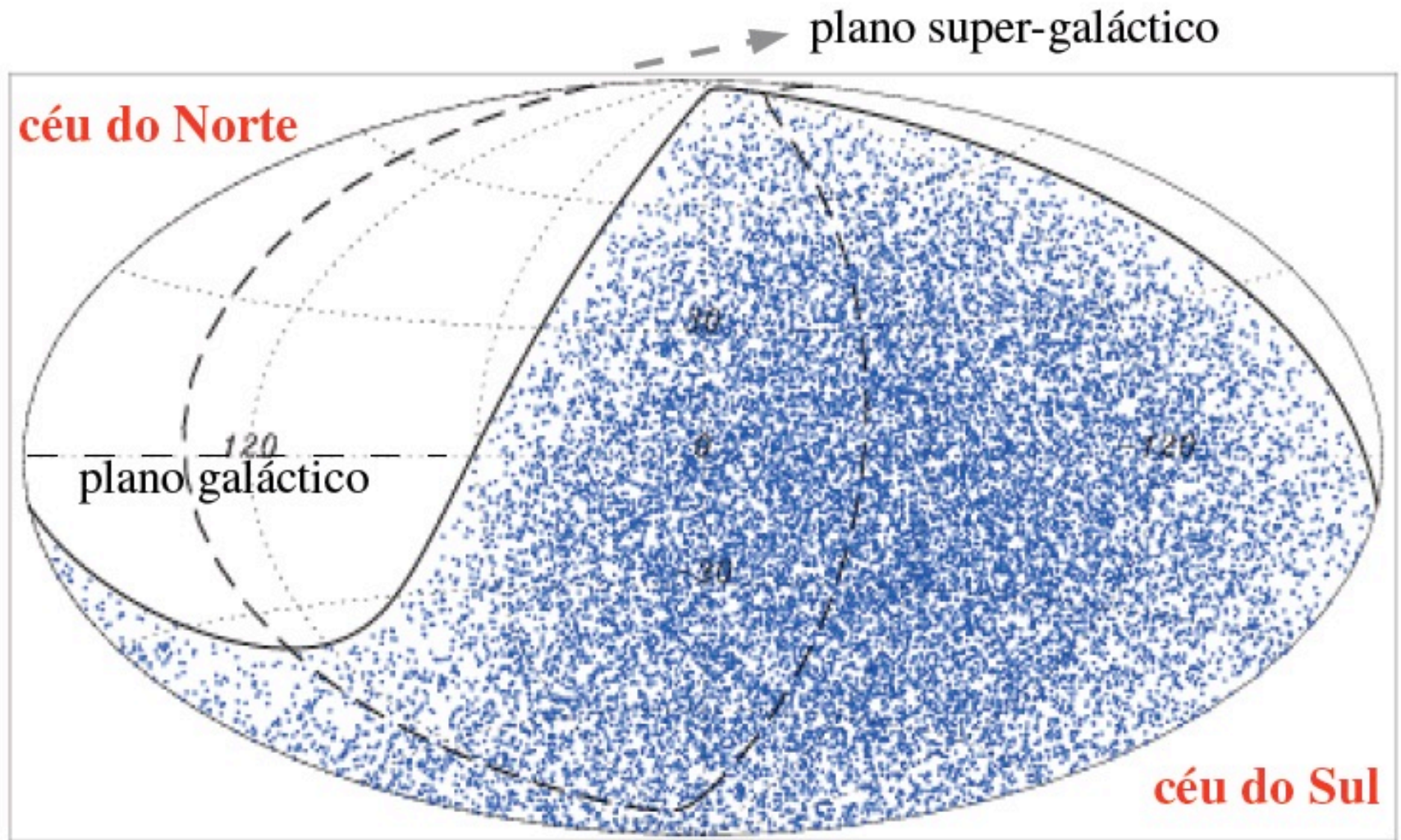
$p, 10^{20} \text{ eV}$



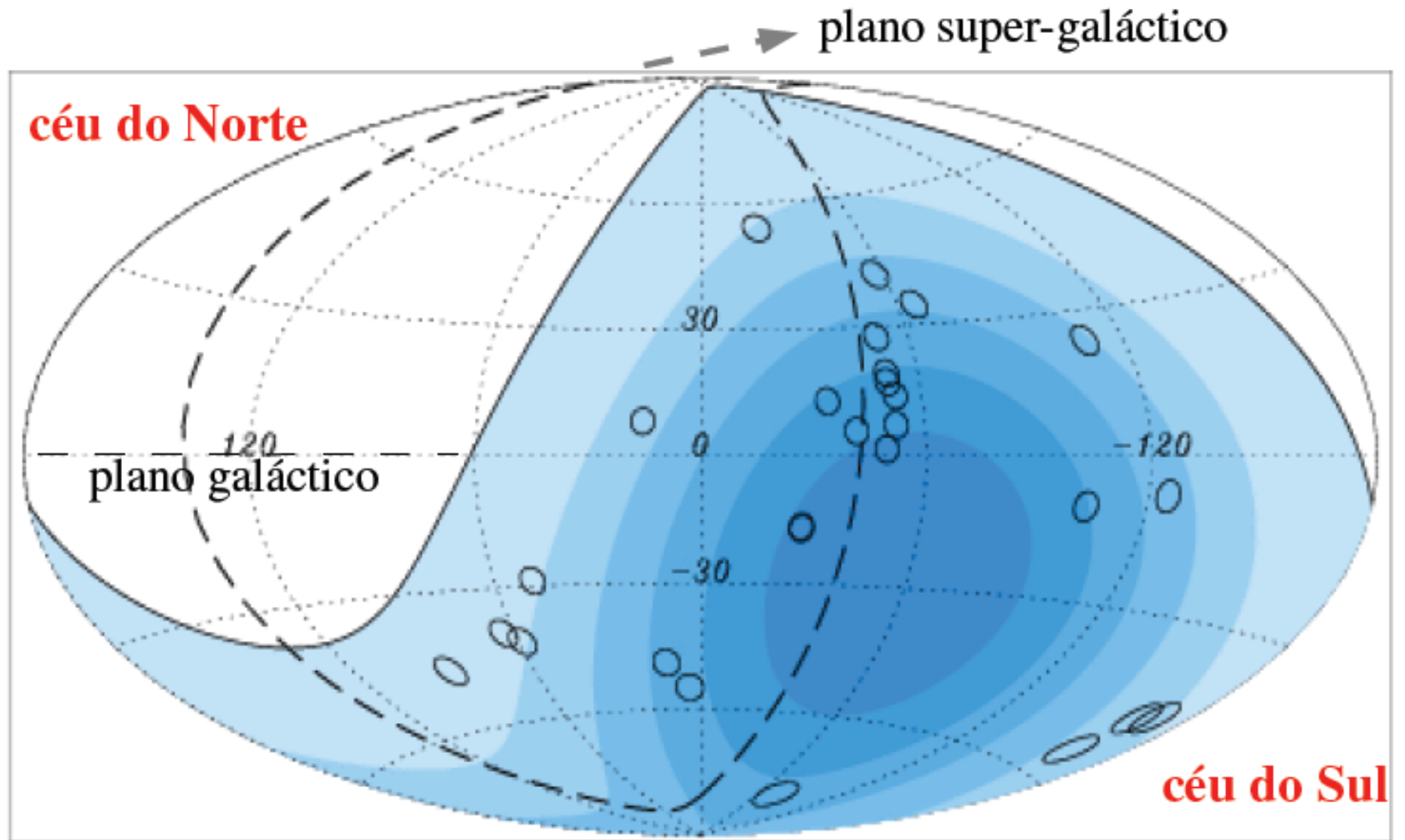
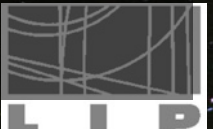
partículas de alta energia
interagem com fótons
da Radiação Cósmica

partículas de baixa energia ou
alta carga eléctrica são desviadas
pelos campos magnéticos

O “Céu” segundo o Observatório Pierre Auger ($E > 3 \text{ EeV}$)



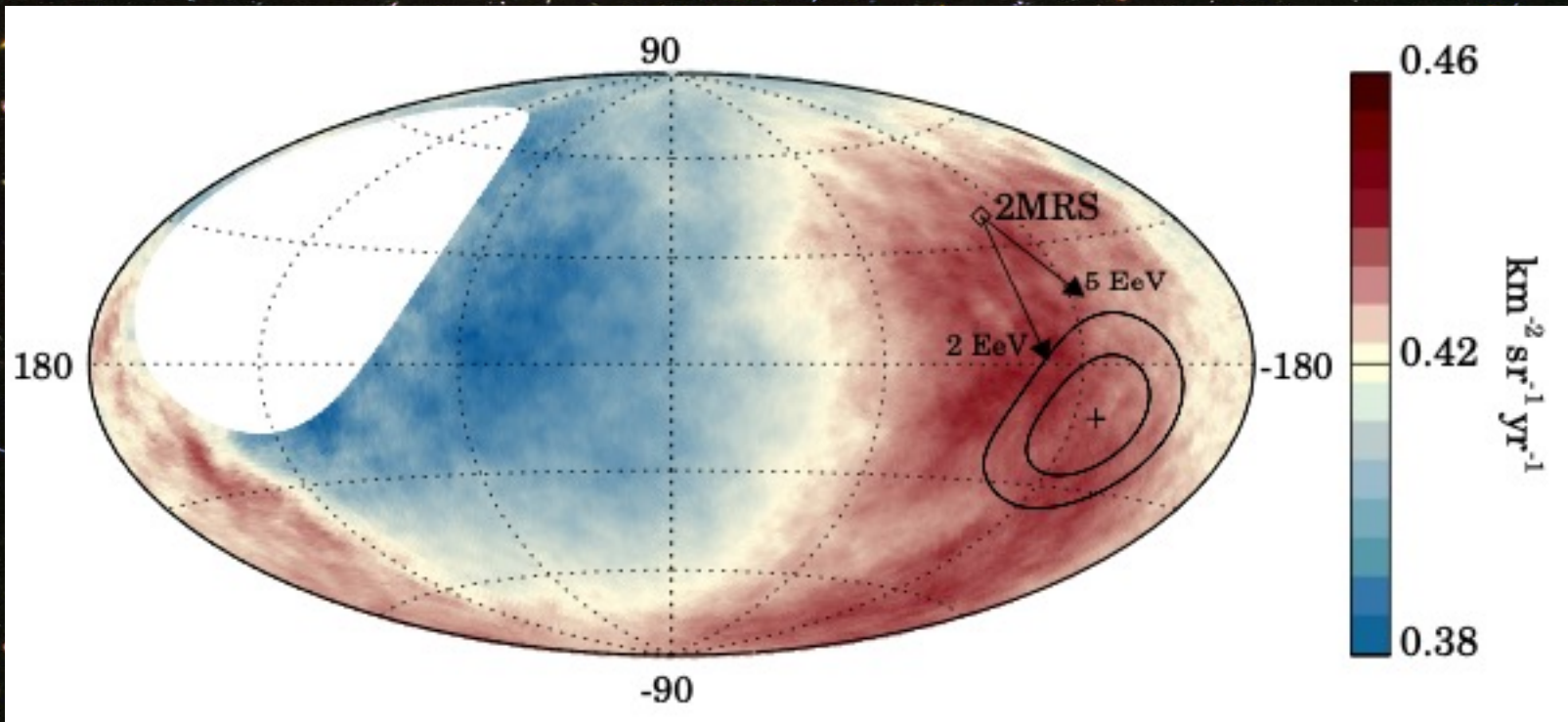
O “Céu” de Alta Energia ($E > 57 \text{ EeV}$)



Raios Cósmicos +energéticos têm origem EXTRA-Galáctica!



Anisotropia na distribuição da origem dos Raios Cósmicos de energias superiores a 32 EeV, indicam uma origem extra-galáctica destes raios cósmicos



Obrigado pela v/ atenção



Albert Einstein [P.N.1921]: (Com o conhecimento...)

*“podemos olhar para o Universo como se não existissem milagres.
Mas também podemos olhar para o Universo como se tudo fosse um milagre!”*