

# Rayos cósmicos II

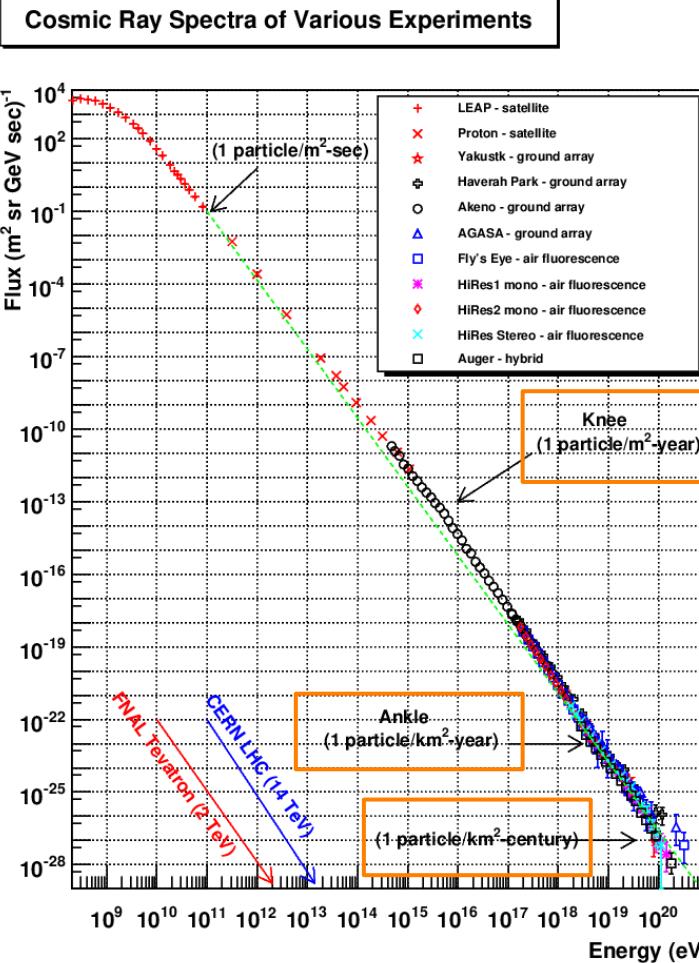
Curso: Astronomía general

Semestre: 2022-2

Profesor: Christian Sarmiento Cano

Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander

# Espectro de rayos cósmicos primarios



$$j(E) = \frac{dN}{dt \, dA \, d\Omega \, dE}$$

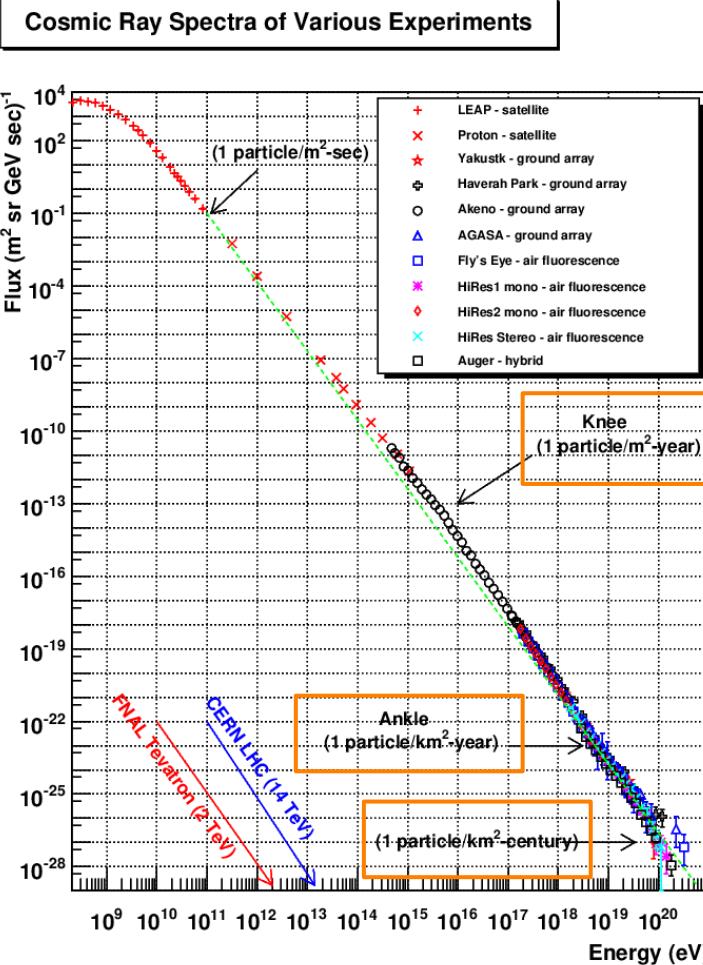
- Unidades

$$[j(E)] = \frac{1}{\text{m}^2 \text{s} \text{sr eV}}$$

- En general:

$$j(E) = j_0 E^\alpha, \alpha \approx -3$$

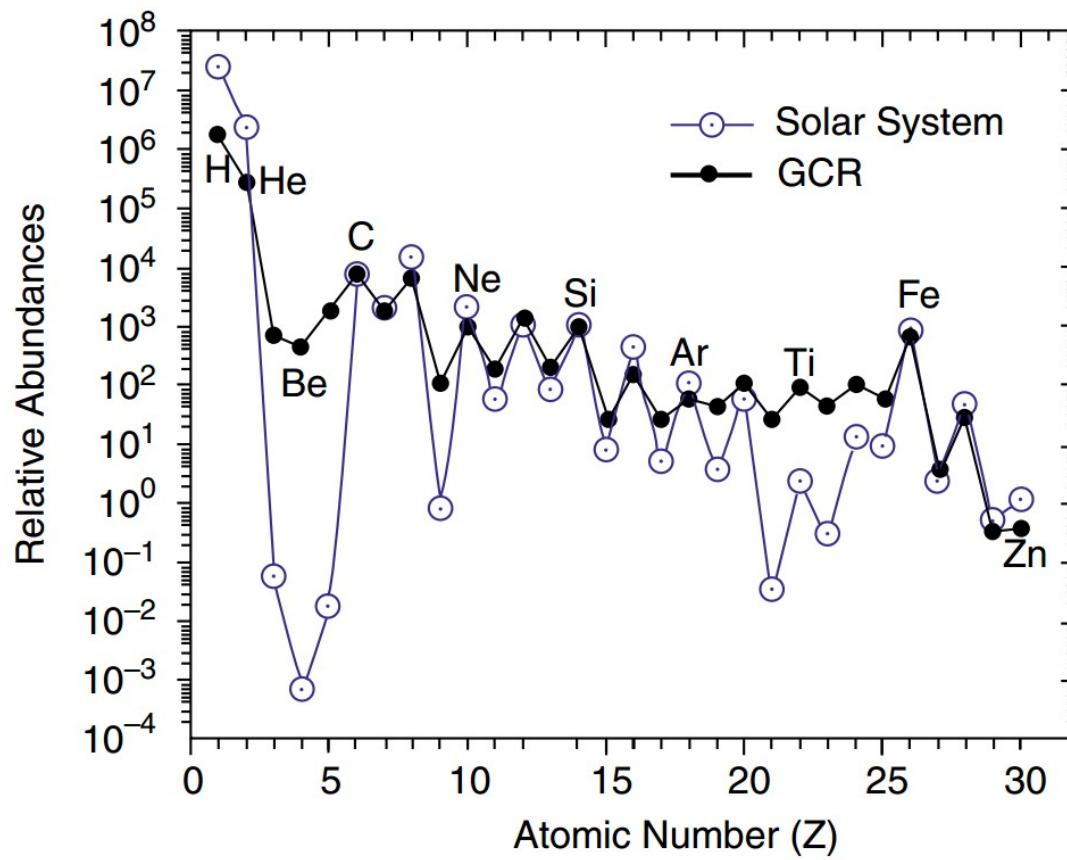
# Espectro de rayos cósmicos primarios



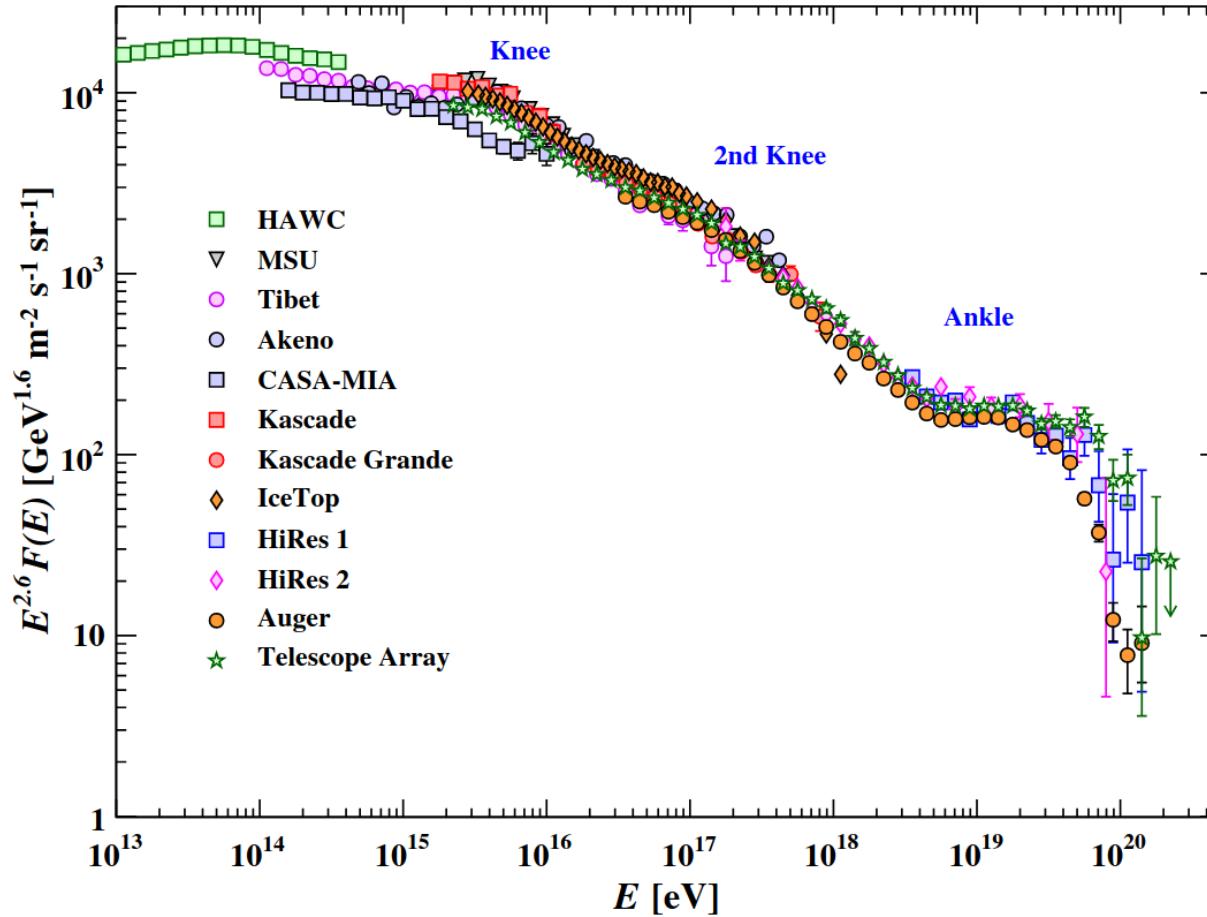
Cambios en la pendiente espectral:

- Viento Solar  $\rightarrow 10^9 \text{ eV}$
- 1<sup>ra</sup> rodilla  $\rightarrow 10^{15.5} \text{ eV}$
- 2<sup>da</sup> rodilla  $\rightarrow \sim 10^{17} \text{ eV}$
- Tobillo  $\rightarrow 10^{18.61} \text{ eV}$
- Supresión  $\rightarrow \sim 10^{19.46} \text{ eV}$

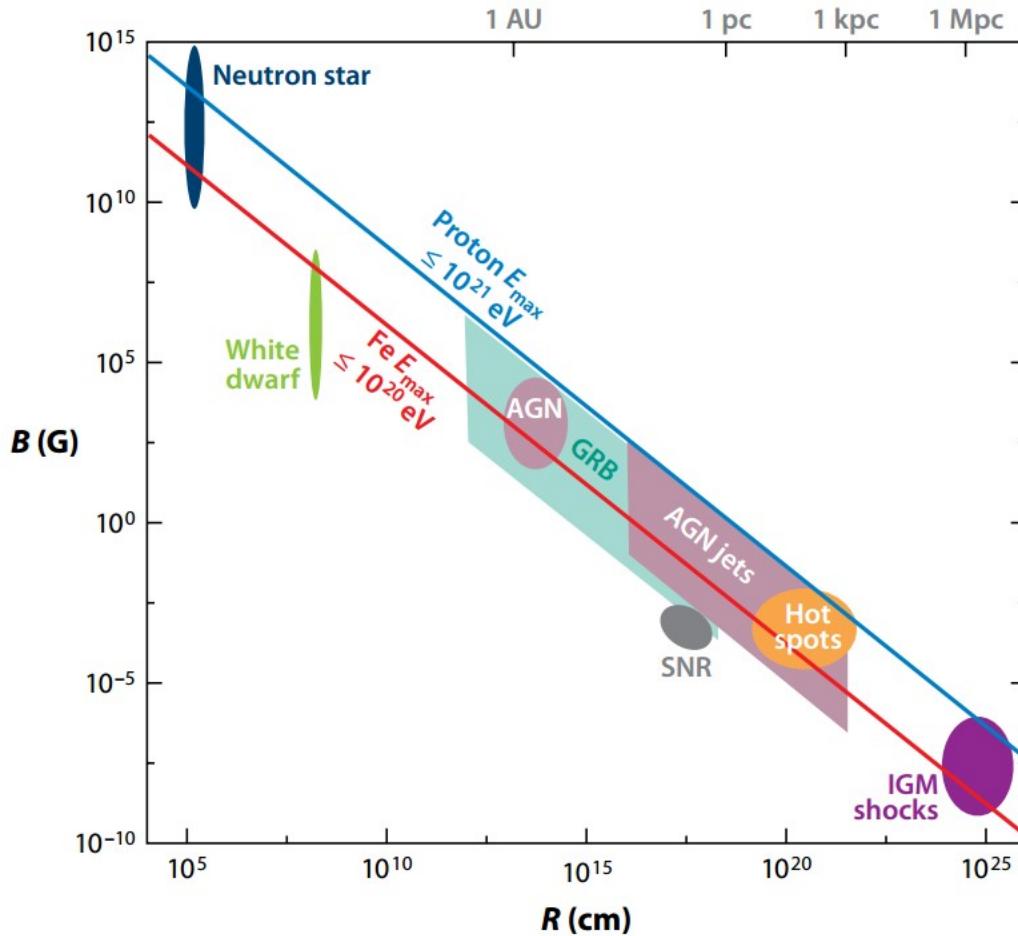
# Espectro de rayos cósmicos primarios



# Espectro de rayos cósmicos primarios



# Fuentes de astropartículas



$$E_{max} \simeq \varepsilon E \frac{R}{r_L},$$

Donde,

$$r_L = \frac{E}{ZB},$$

Entonces,

$$E_{max} \simeq \varepsilon ZBR.$$

# Cambios en la pendiente del espectro

- La capacidad de aceleración de la fuente es

$$E_{\max} \propto (Z \times B \times R)$$

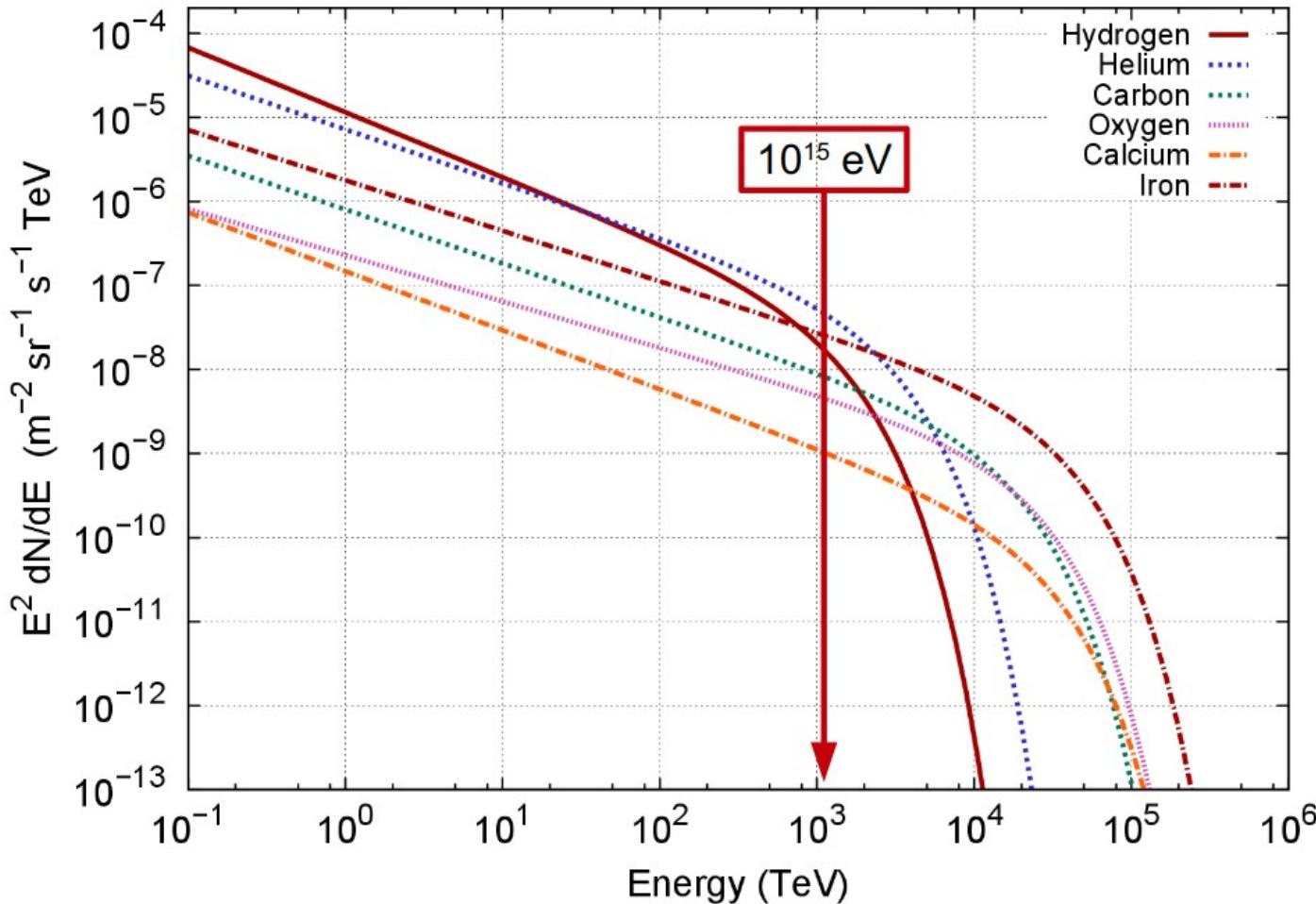
- Para una fuente ( $B$  y  $R$  están fijos),  $E_{\max} \propto Z$
- Por otro lado, el flujo de una especie química  $Z$ :

$$J(E, Z) \simeq j_0(Z) E^{\alpha(Z)}$$

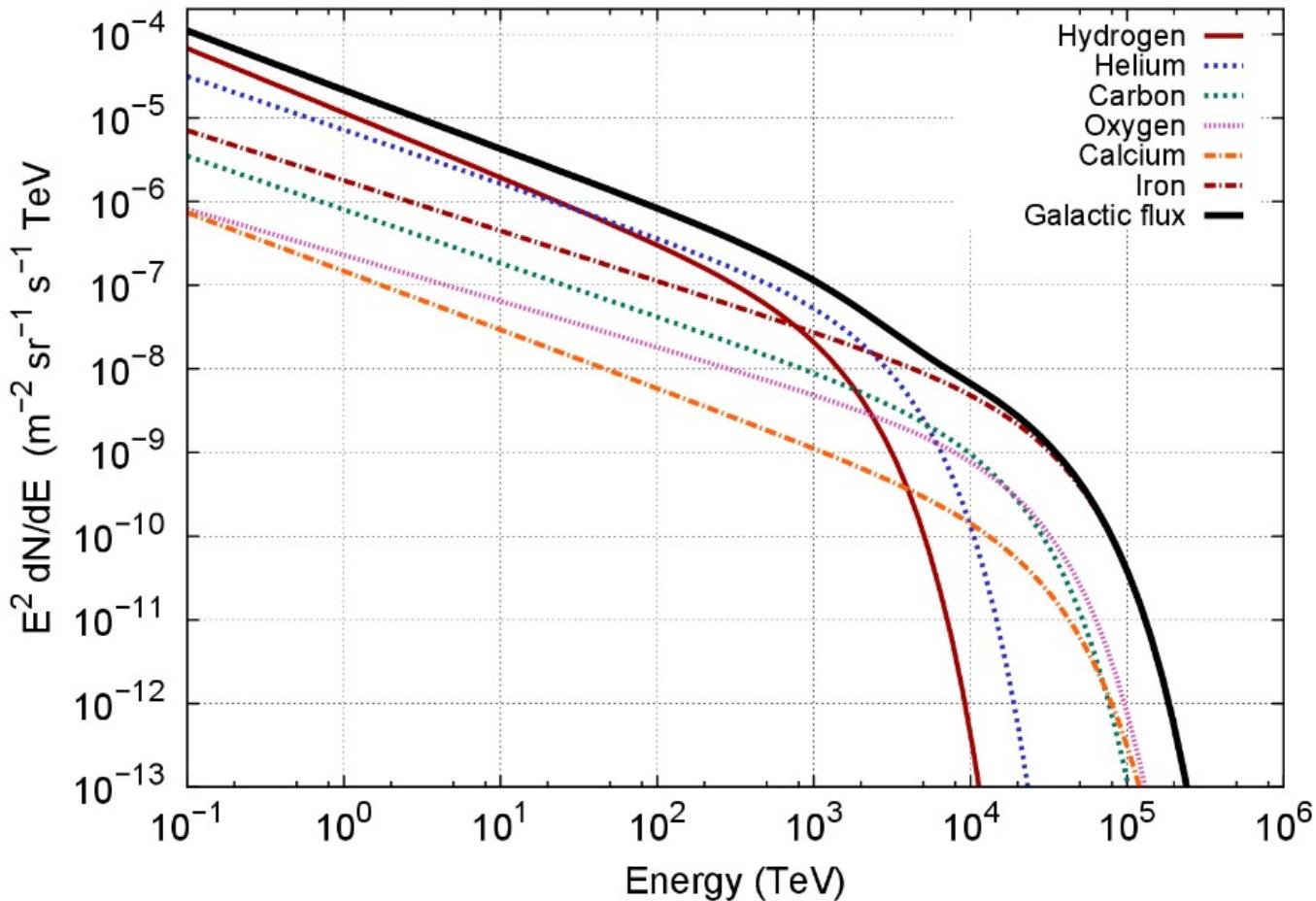
- Luego, hay una energía de corte  $E_c$  en el espectro de cada especie
- Proponemos un término de atenuación exponencial

$$J(E, Z) \simeq j_0(Z) E^{\alpha(Z)} \times \exp\left(-\frac{E}{ZE_c}\right), \quad E_c = 10^{15} \text{ eV}$$

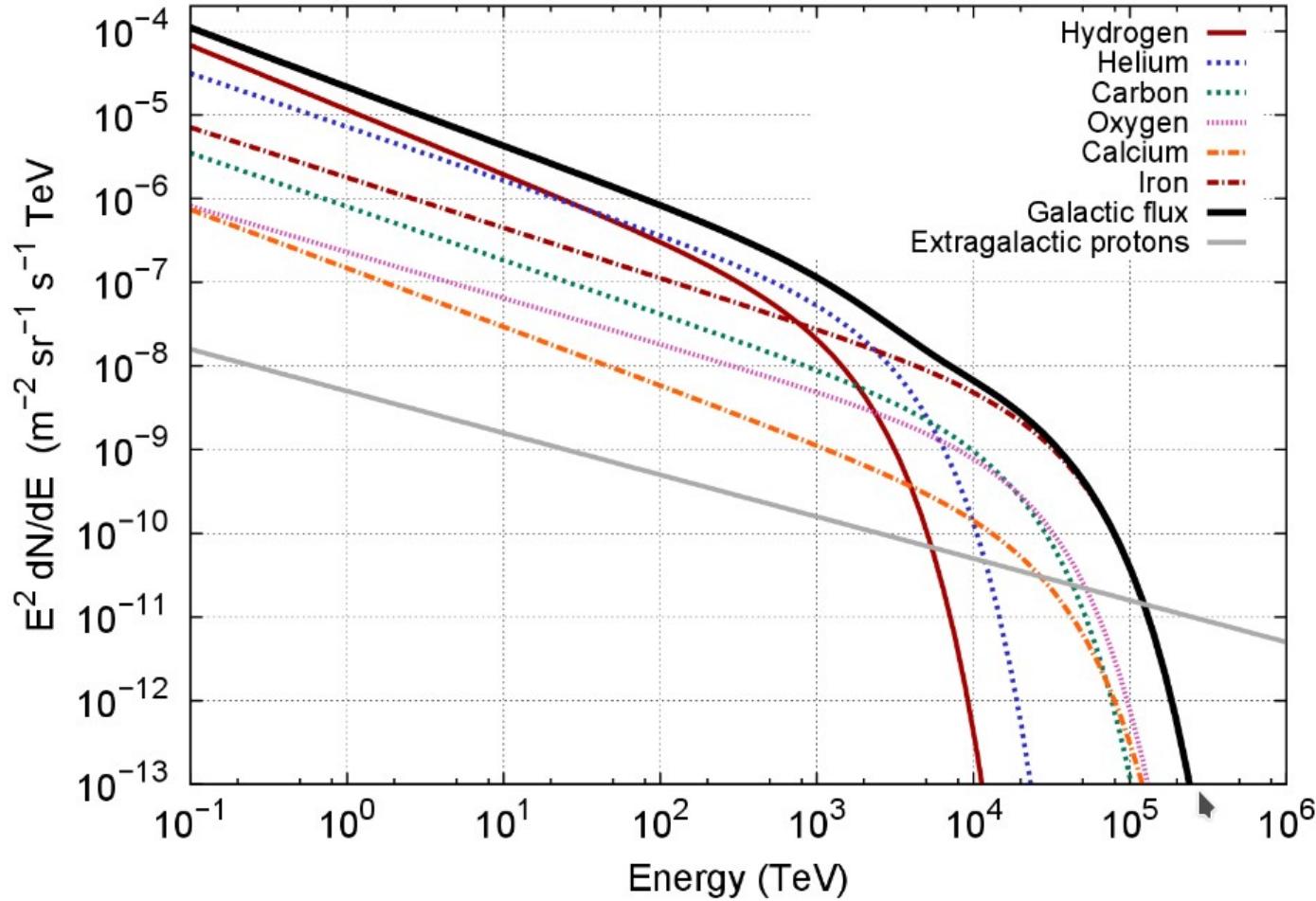
# Cambios en la pendiente del espectro



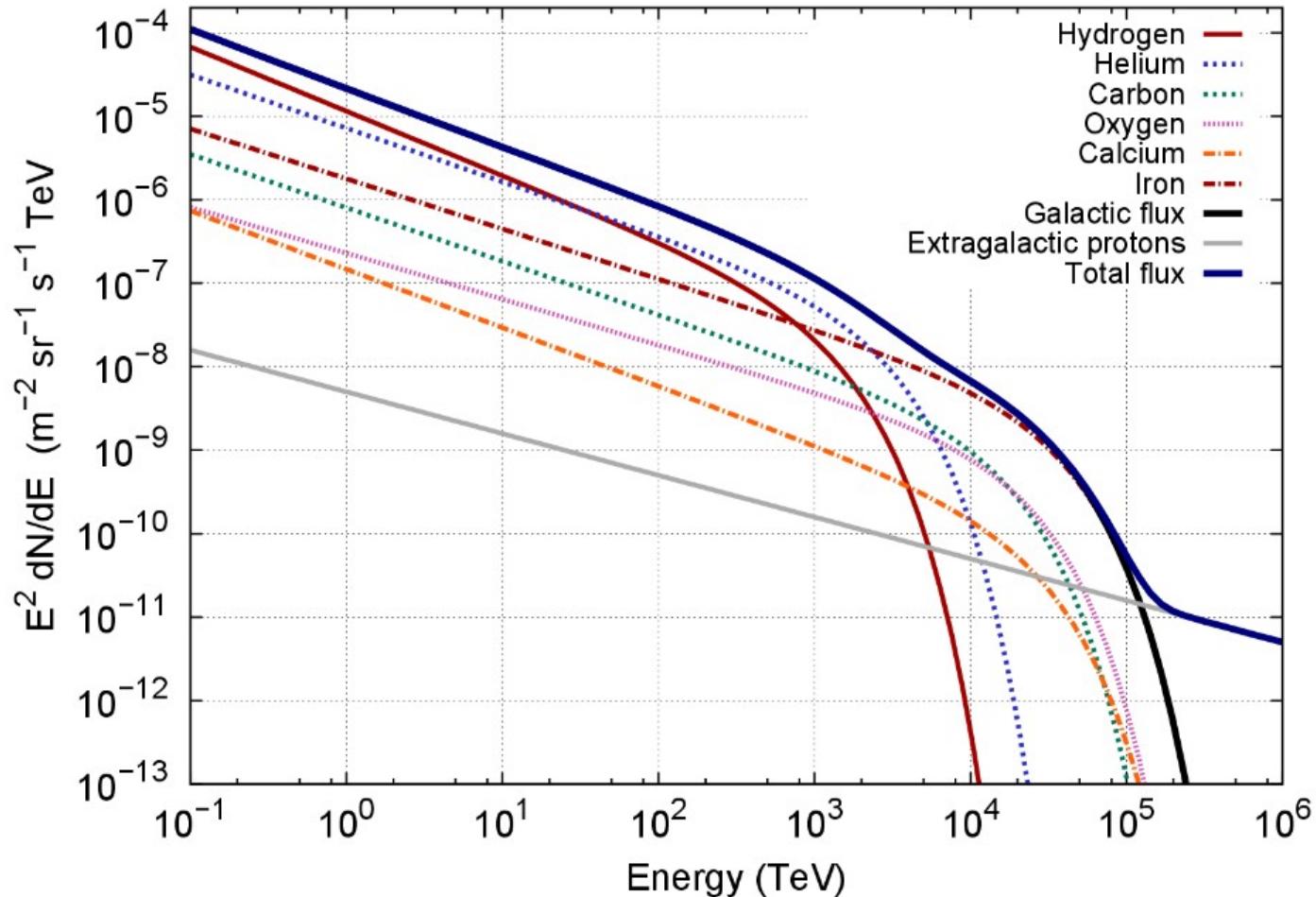
# Cambios en la pendiente del espectro



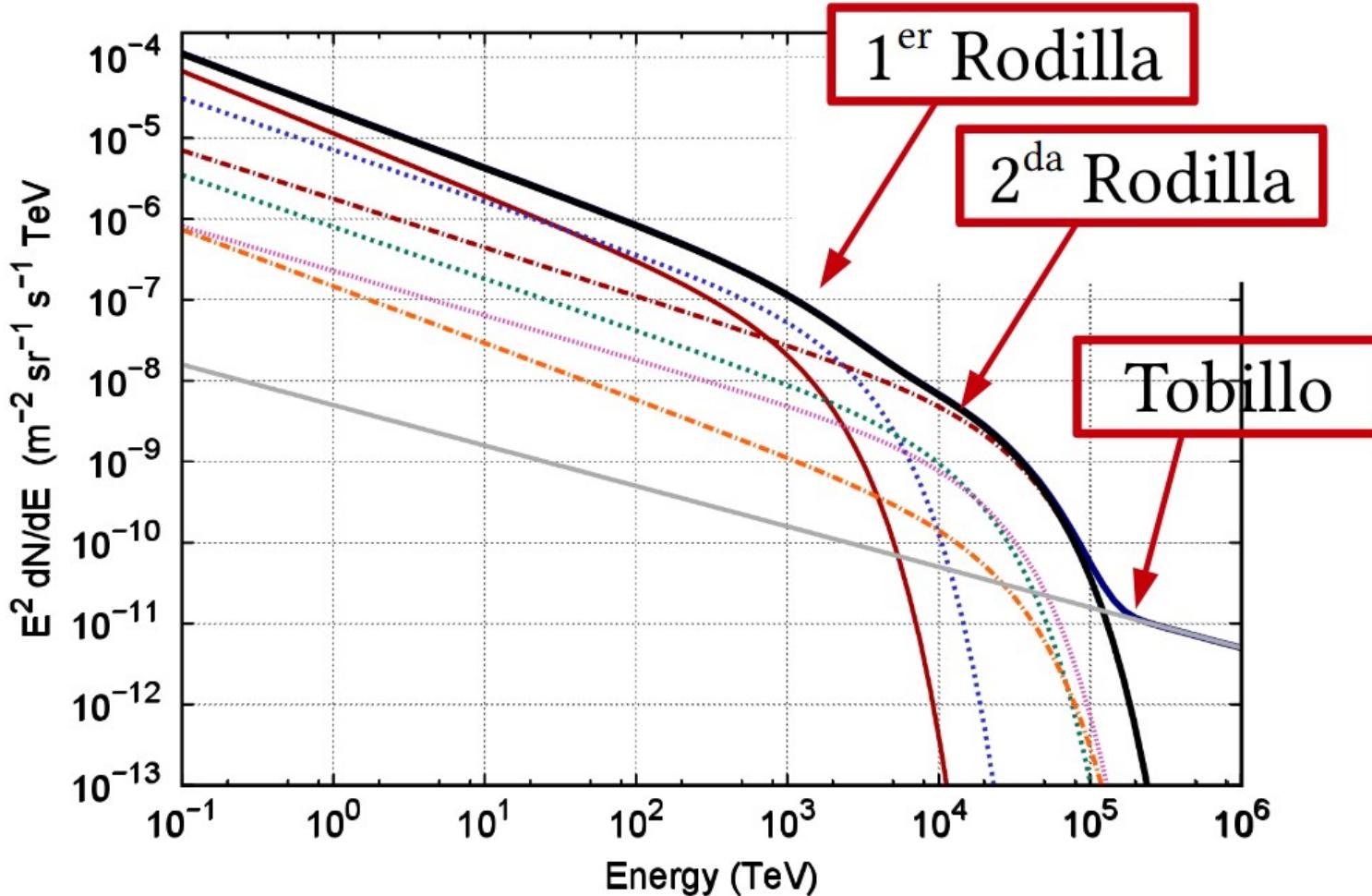
# Cambios en la pendiente del espectro



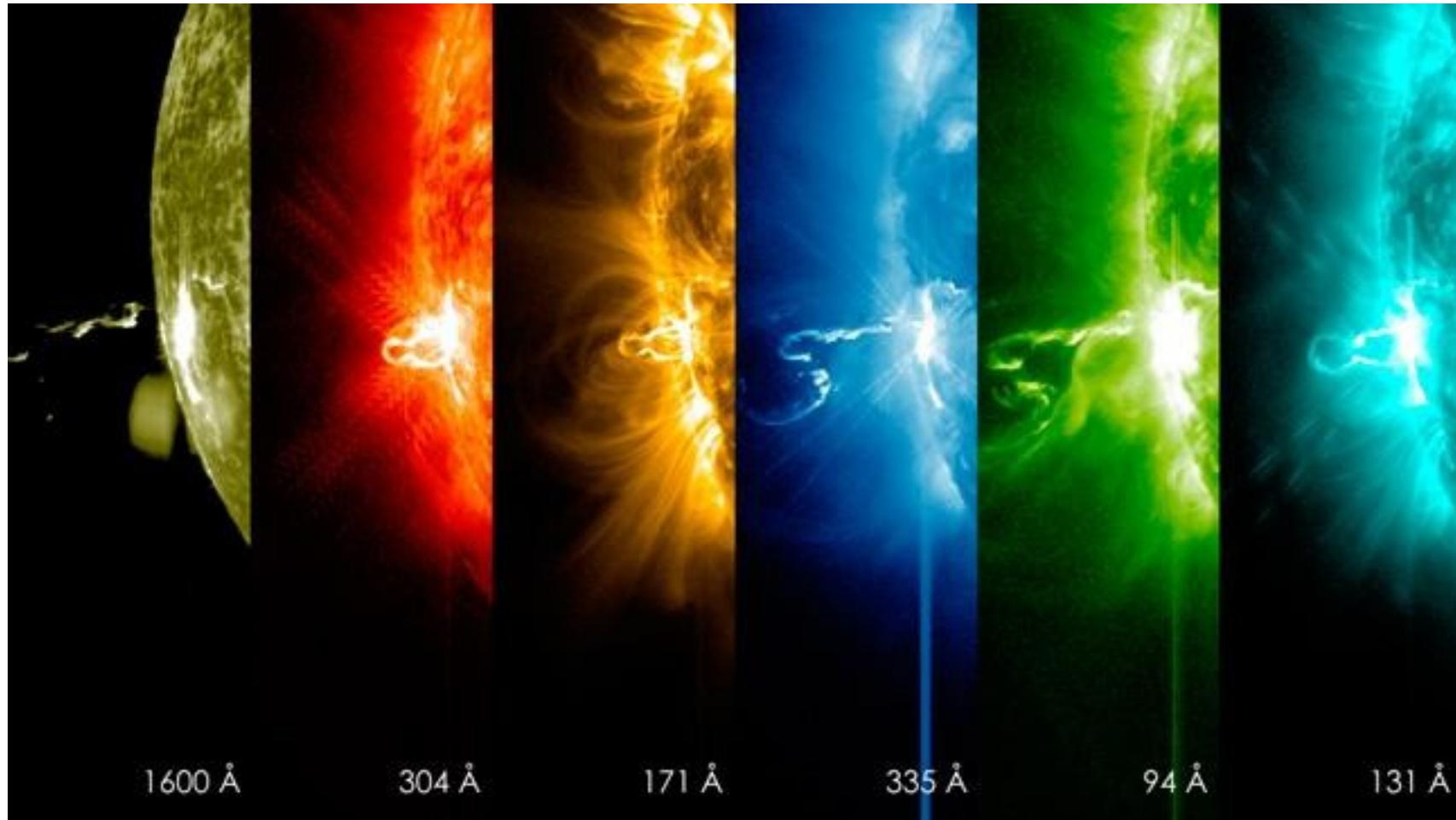
# Cambios en la pendiente del espectro



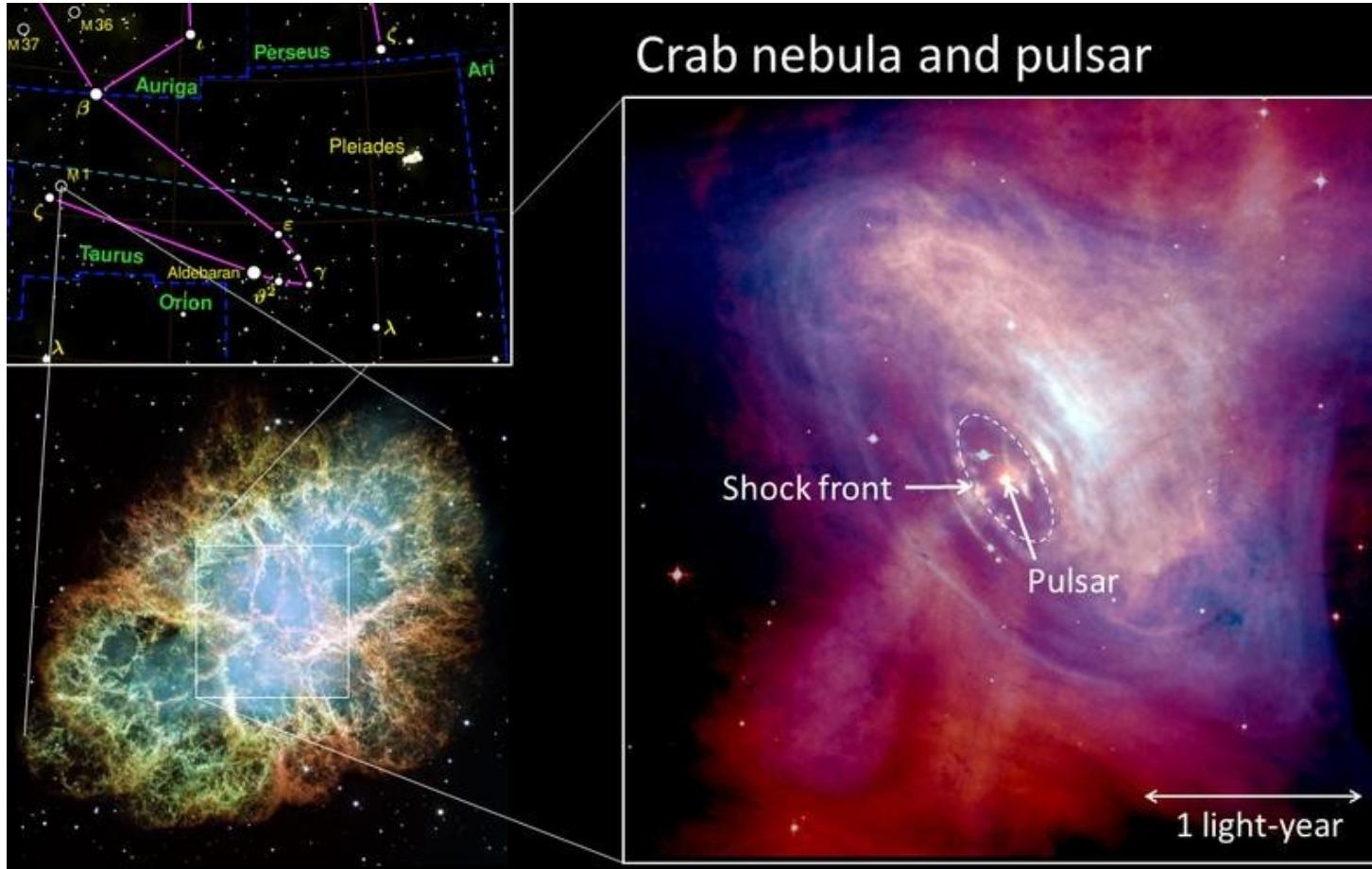
# Cambios en la pendiente del espectro



# El Sol



# Remanentes de Supernova

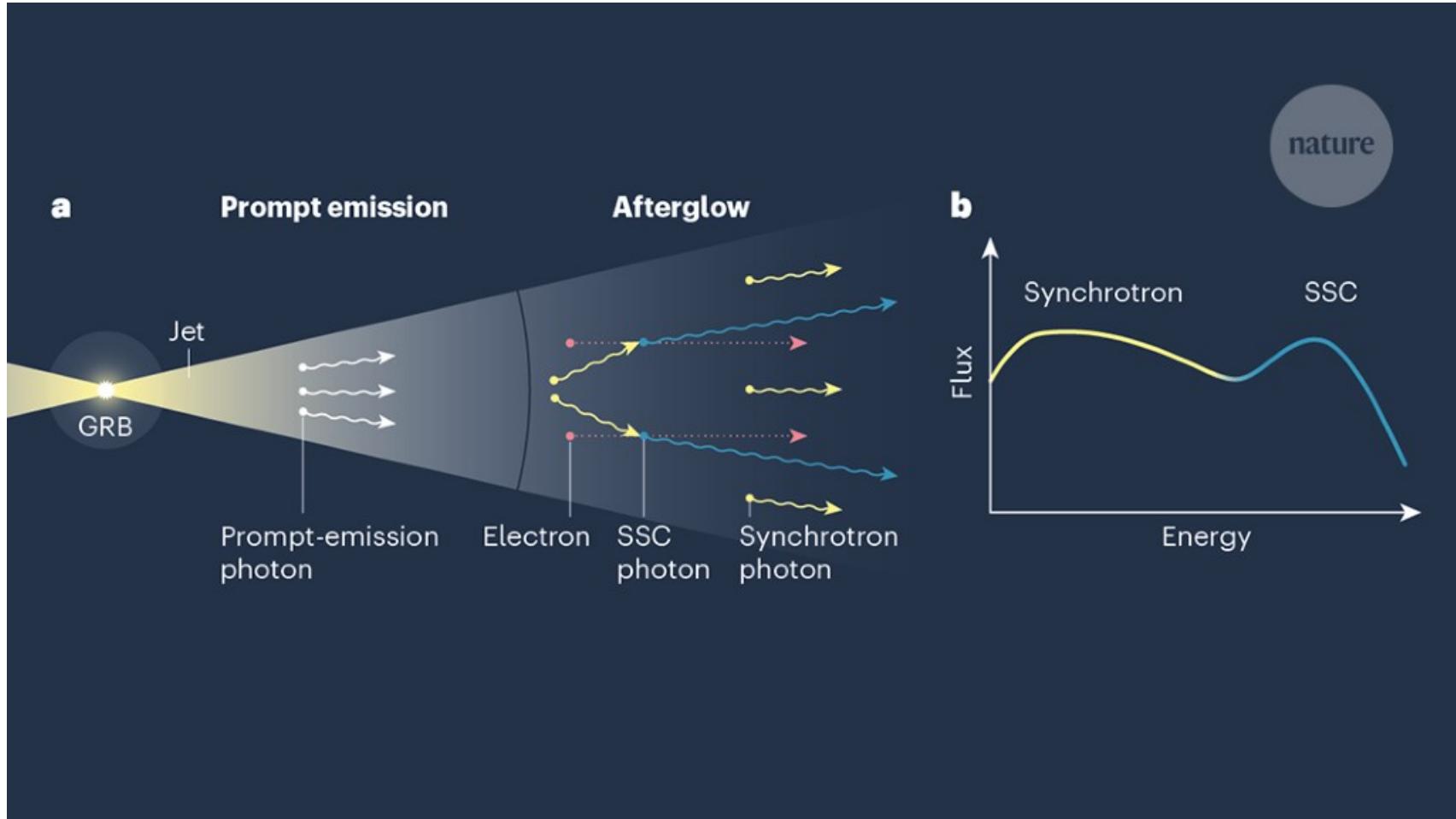


Emite partículas en el rango del KeV-GeV.

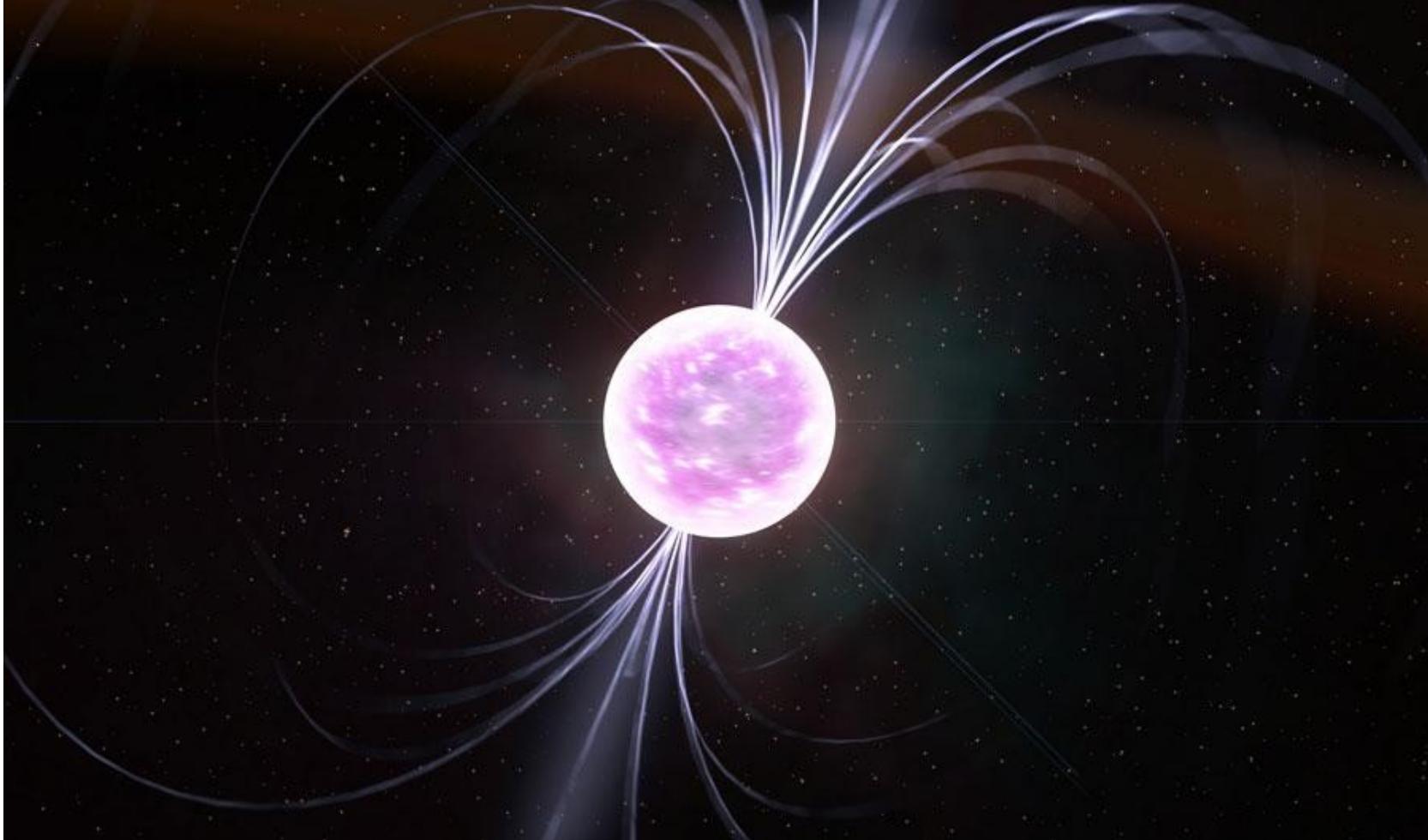
Se han corroborado detecciones tanto satelitales como en observatorios en Tierra.

¡Es una fuente de fotones gamma!

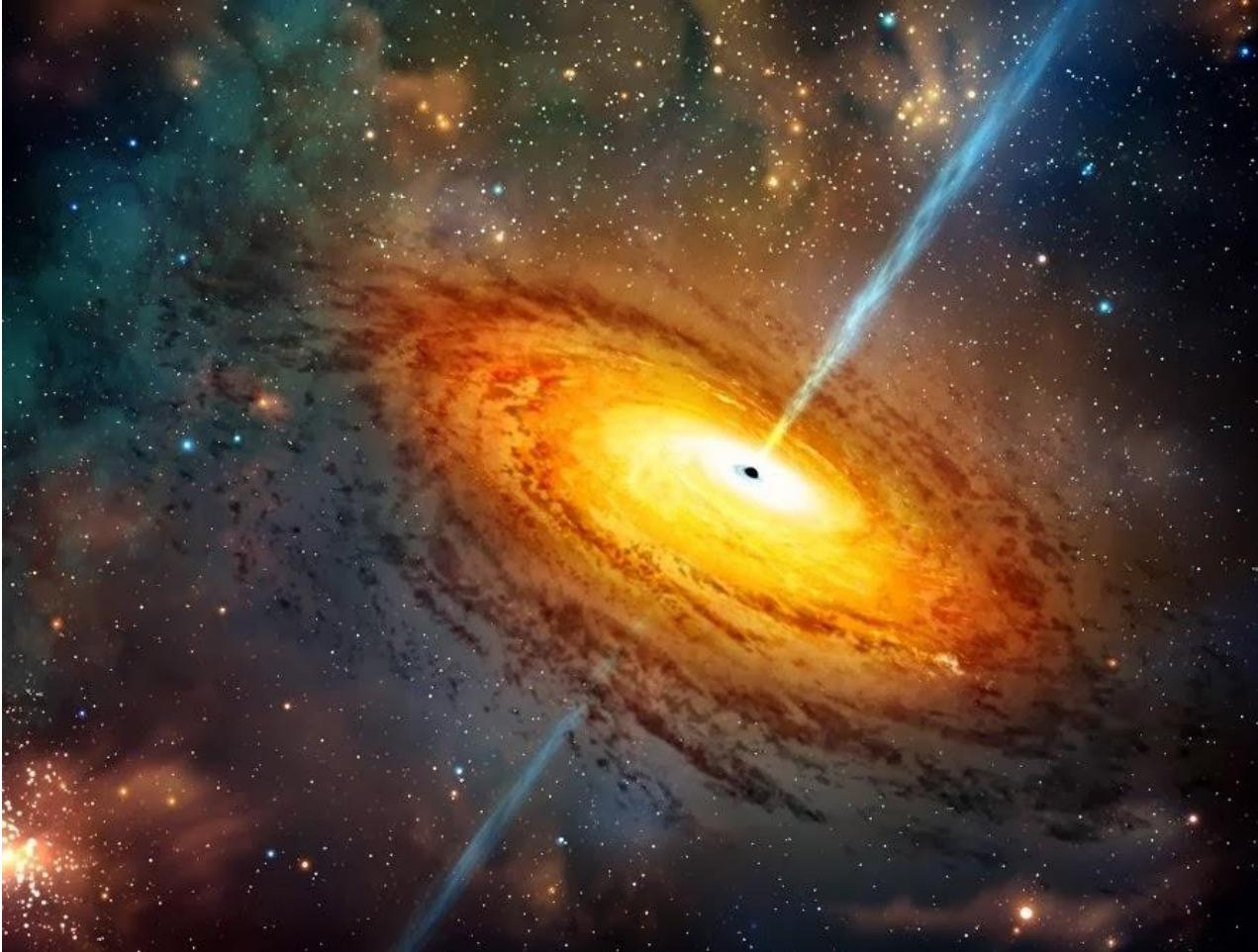
# Destellos de rayos gamma



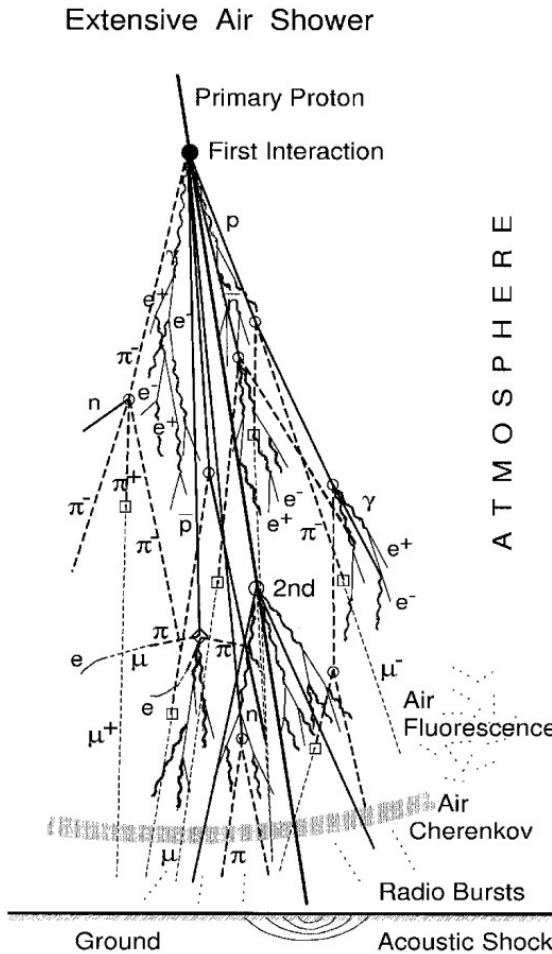
# Estrellas de neutrones



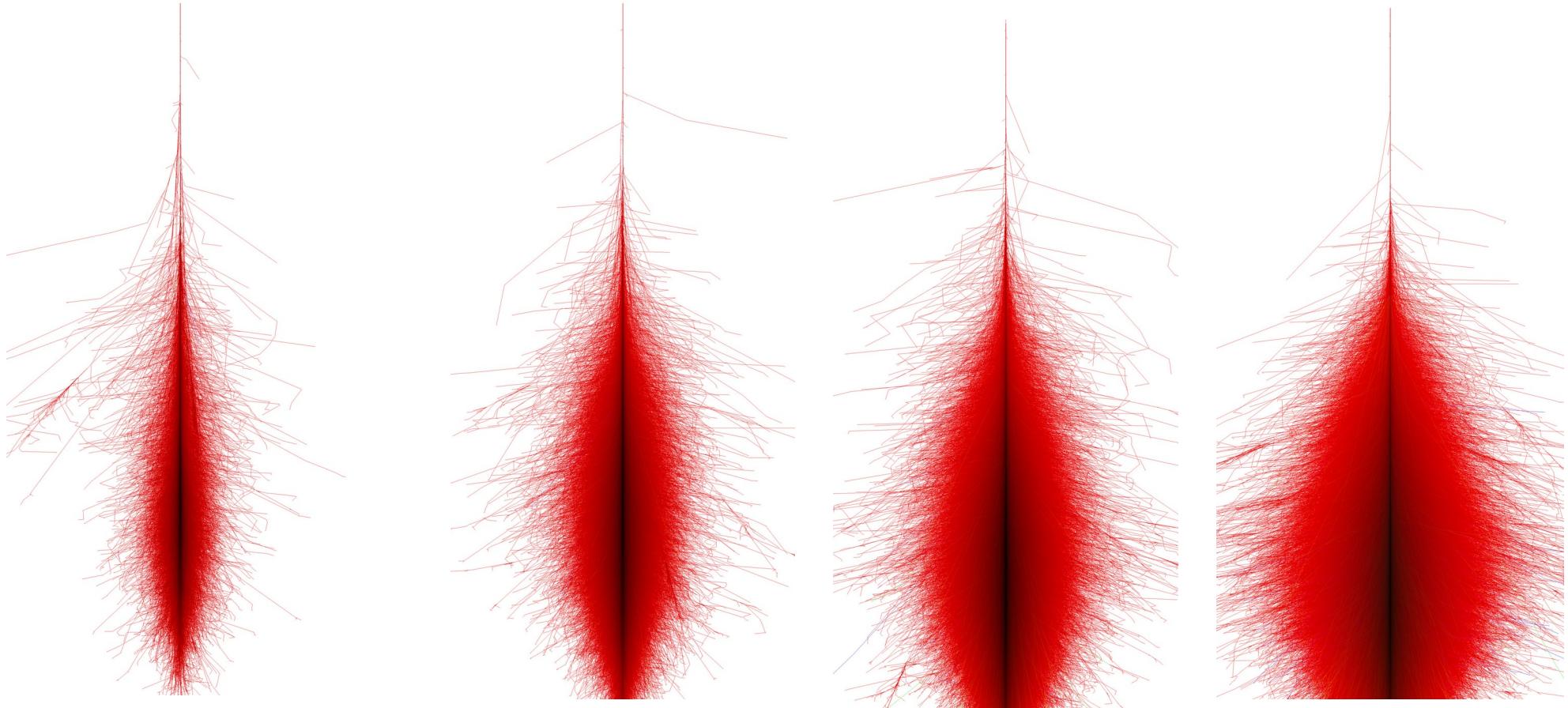
# Núcleos activos de galaxias



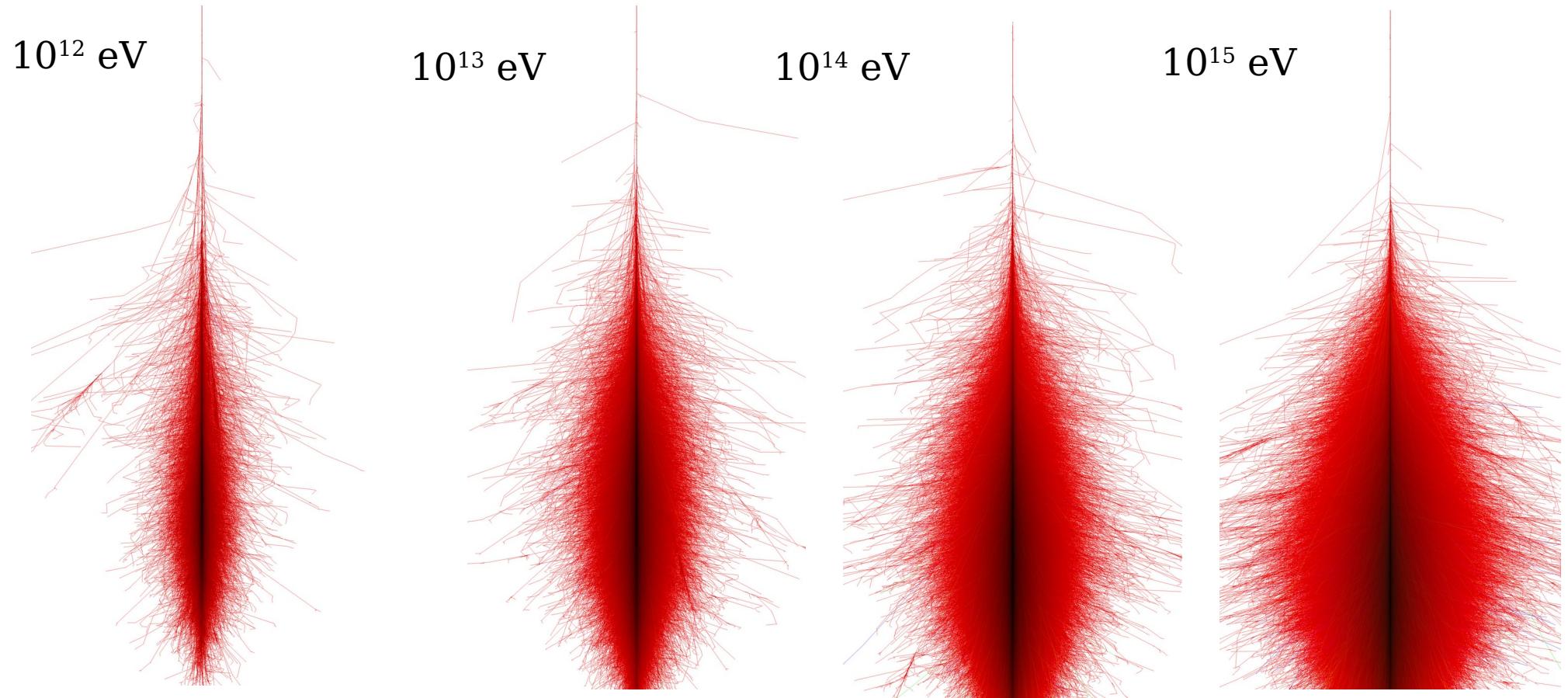
# Lluvias de partículas secundarias (EAS)



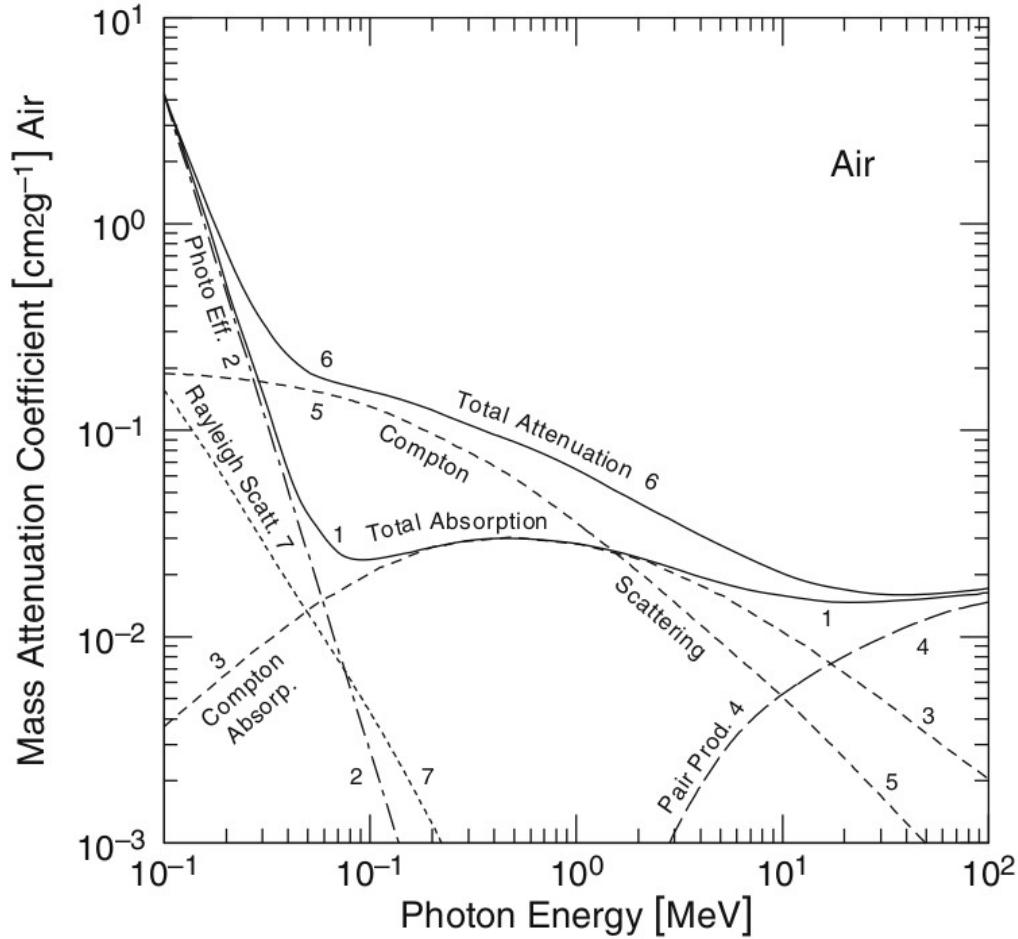
# Lluvias de partículas secundarias



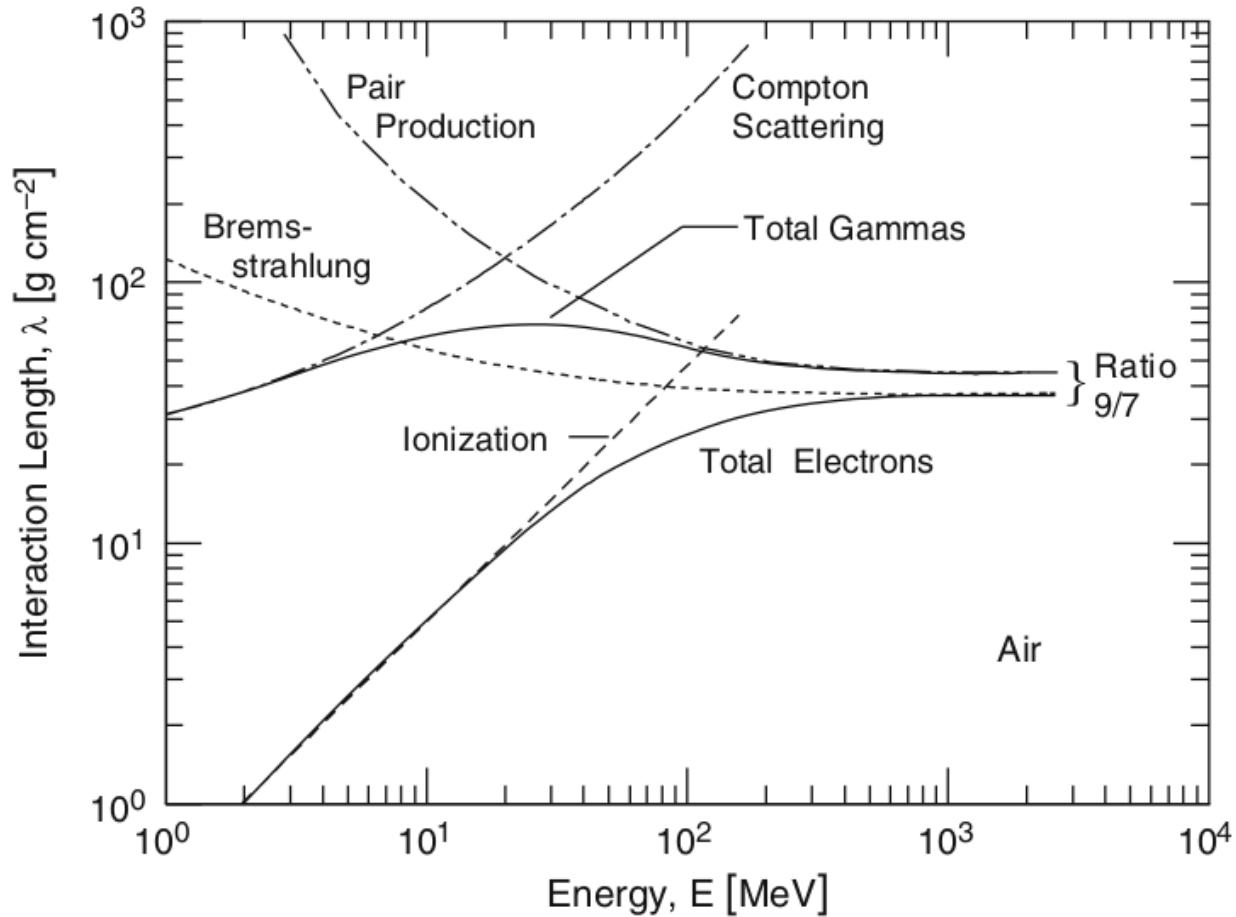
# Lluvias de partículas secundarias



# Procesos colisionales y radiativos

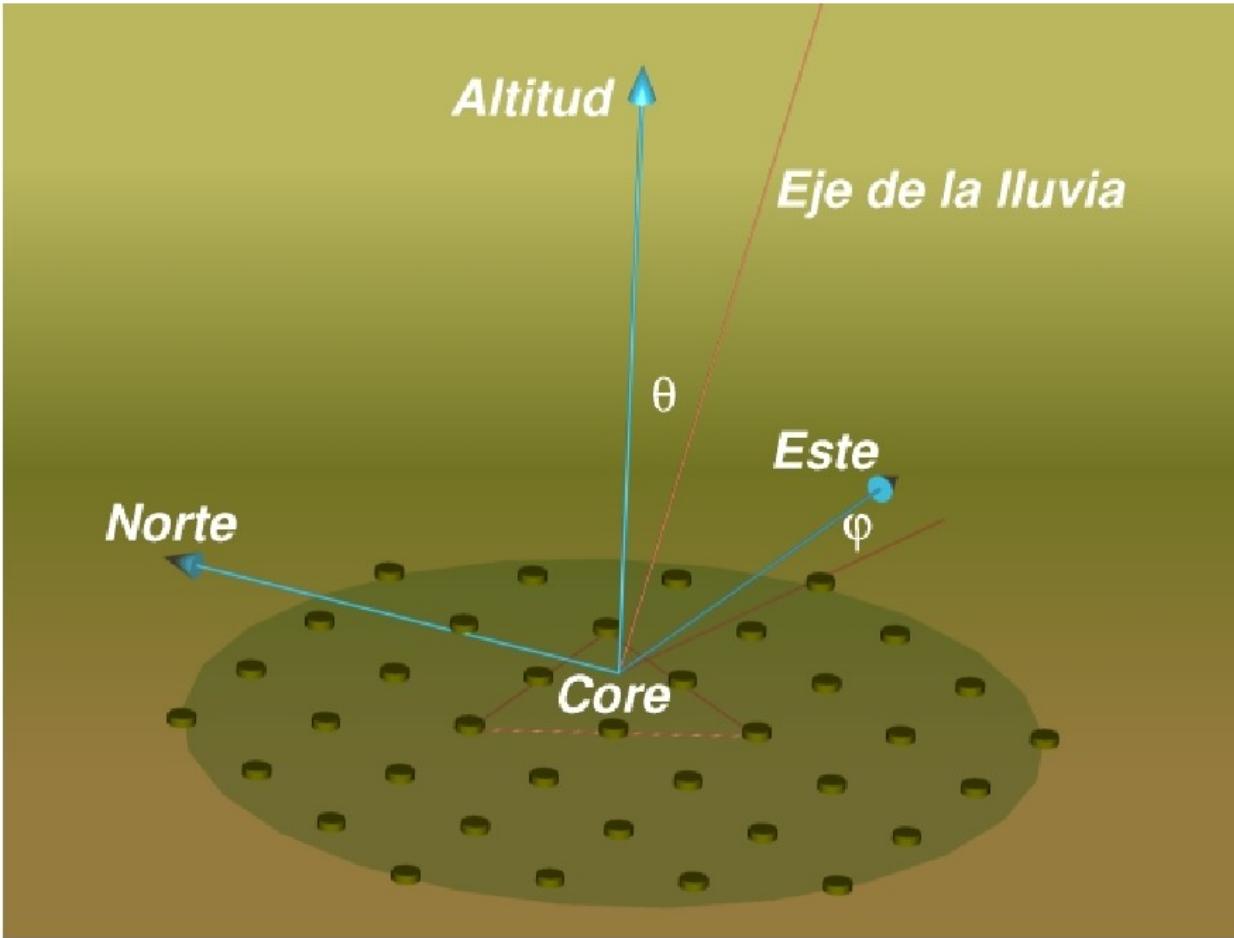


# Procesos colisionales y radiativos



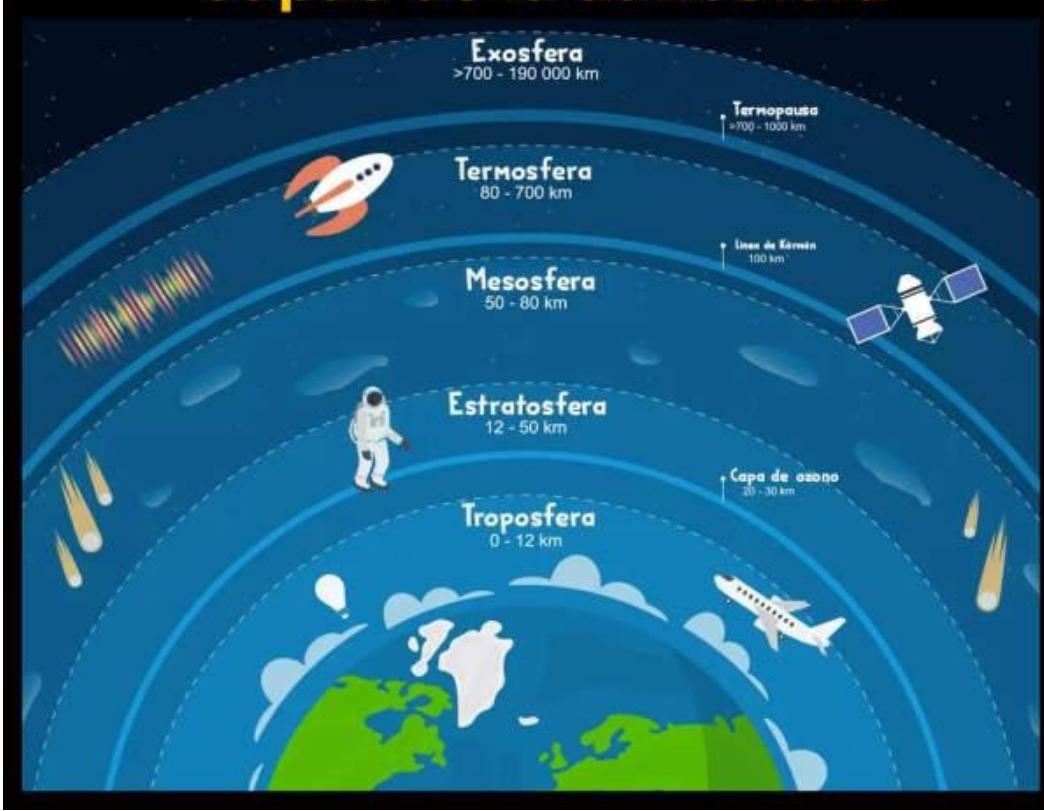
La longitud de interacción es la distancia en la cual las partículas cargadas pierden suficiente energía como para poder interactuar.

# Nuestro sistema coordenado



# Profundidad atmosférica

## Capas de la atmósfera

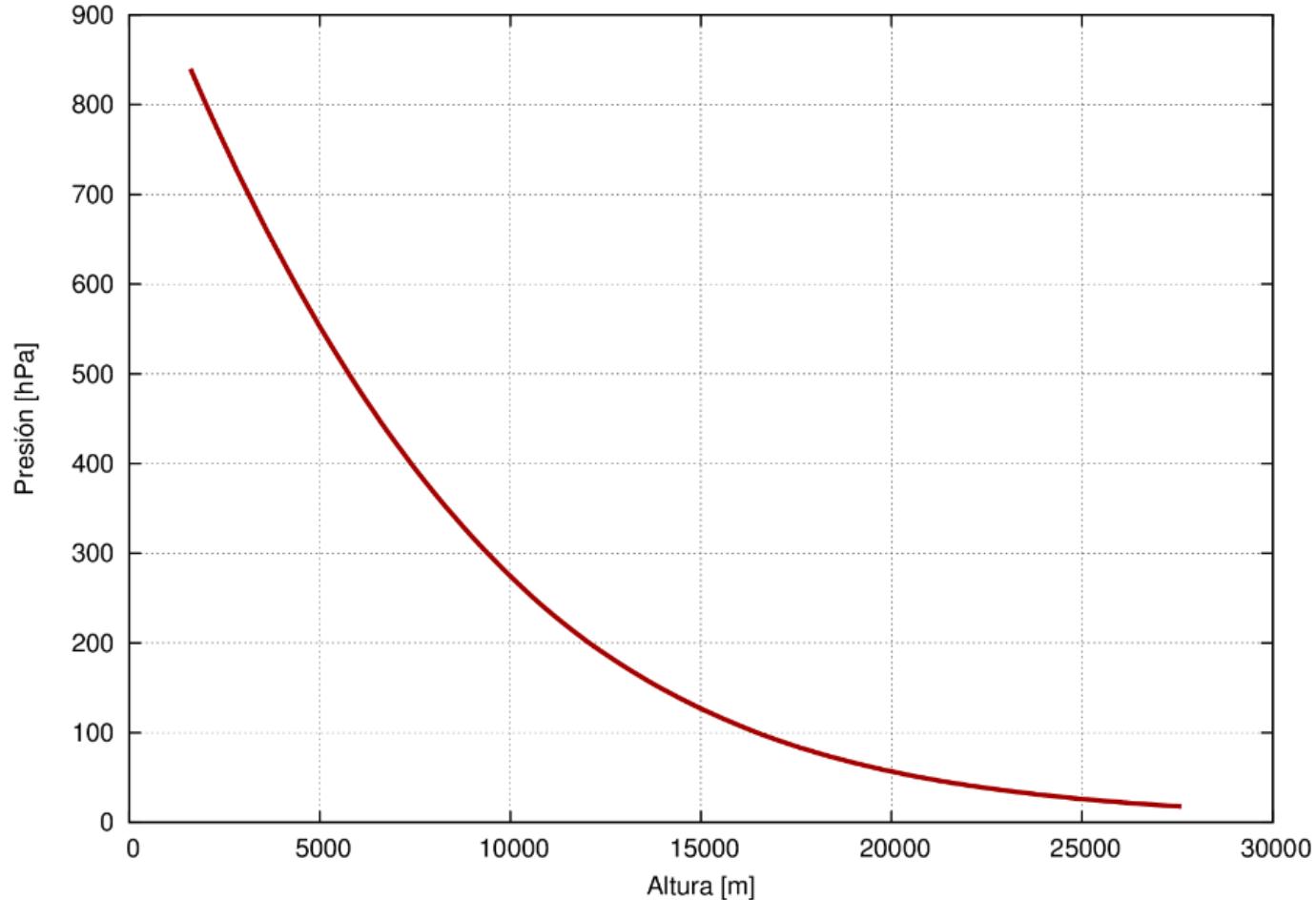


$$1 \text{ atm} = 1033 \text{ g/cm}^2 = 91 \text{ cm Pb}$$

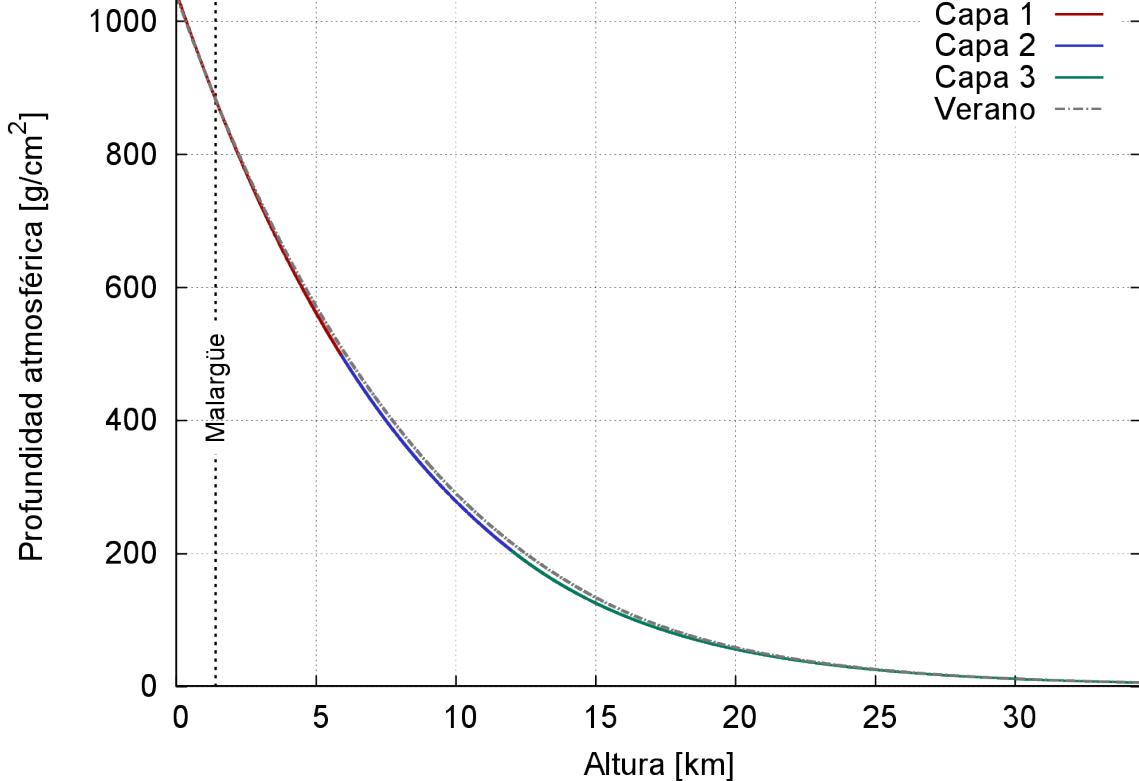
**Profundidad atmosférica X:**  
Cantidad de masa atravezada en la dirección transversal para una partícula entrando a la atm.

$$X(l) = \int_l^\infty \rho(l') dl'$$

# Presión vs Altura



# Modelo atmosférico de Linsley



$$X_i(h) = a_i + b_i \exp\left(-\frac{h}{c_i}\right)$$

$$X_5(h) = a_5 + b_5 \left(\frac{h}{c_5}\right)$$

Divide la atmósfera en cinco capas. Los coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$  y  $c_i$  y los límites entre capas se obtienen de mediciones en globo o datos satelitales (GDAS).

<https://arxiv.org/pdf/2006.01224.pdf>

# Modelo atmosférico de Linsley

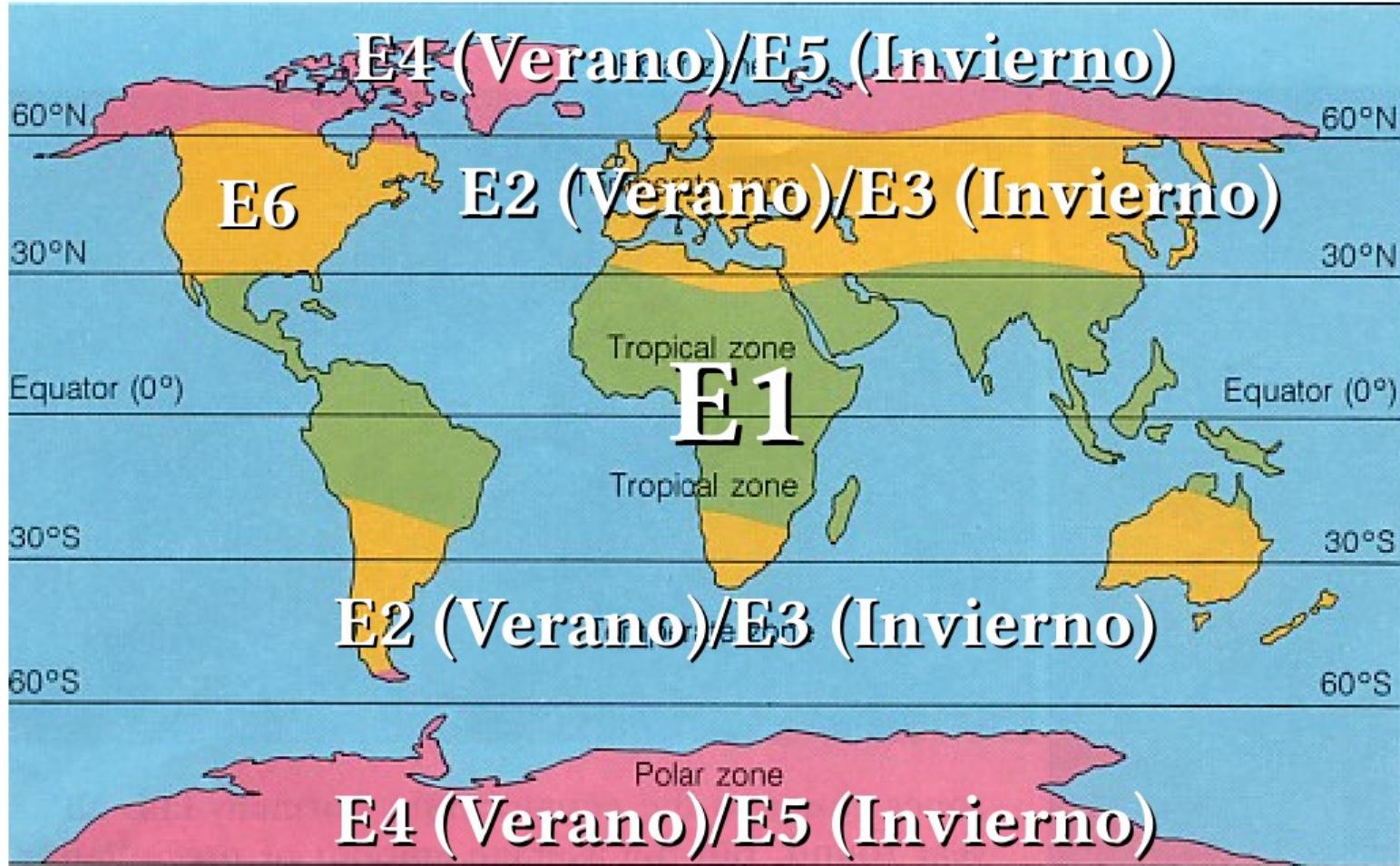
$$X_i(h) = a_i + b_i \exp\left(-\frac{h}{c_i}\right)$$

$$X_5(h) = a_5 + b_5 \left(\frac{h}{c_5}\right)$$

Capa	$h$ [km]	$a_i$ [ $\text{g cm}^{-2}$ ]	$b_i$ [ $\text{g cm}^{-2}$ ]	$c_i$ [cm]
1	0,0...5,9	-159,683519	1202,8804	977139,52
2	5,9...12,0	-79,5570480	1148,6275	858087,01
3	12,0...34,5	0,8914795	1432,0312	614451,60
4	34,5...100,0	$4,8719129 \times 10^{-4}$	696,42788	730875,73
5	> 100,0	0,01128292	1	$10^9$

<https://arxiv.org/pdf/2006.01224.pdf>

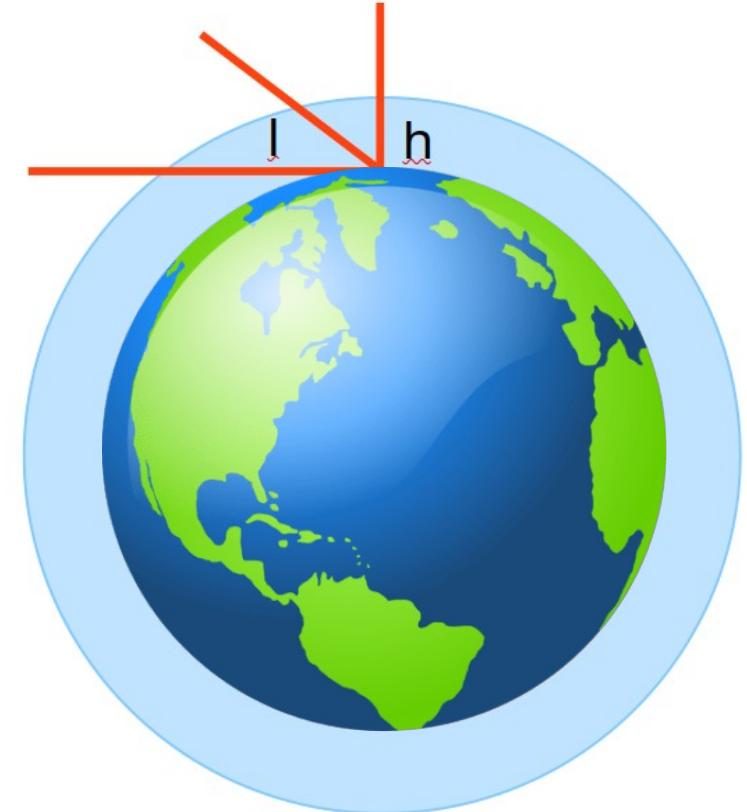
# Modelos MODTRAN



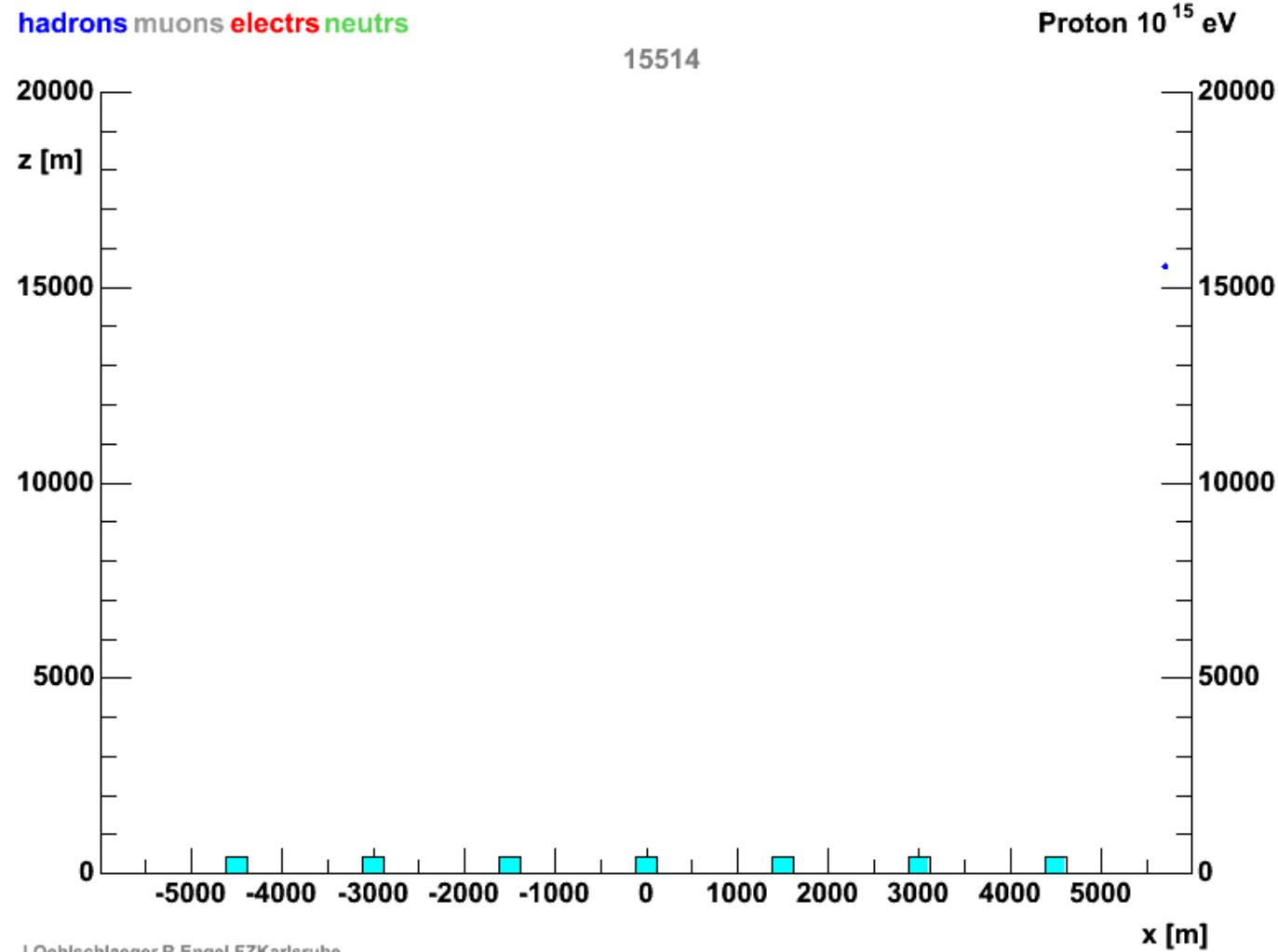
# La Tierra es curva

La cantidad de aire recorrida depende de la dirección de movimiento (ángulo cenital) del rayo cósmico primario.

$$h(l) \approx l \cos(\theta) + \frac{1}{2} \frac{l^2}{R_E} \sin^2(\theta)$$



La cantidad de aire atravesada para una partícula con  $\theta=90^\circ$  es  $\sim 40$  atmósferas.



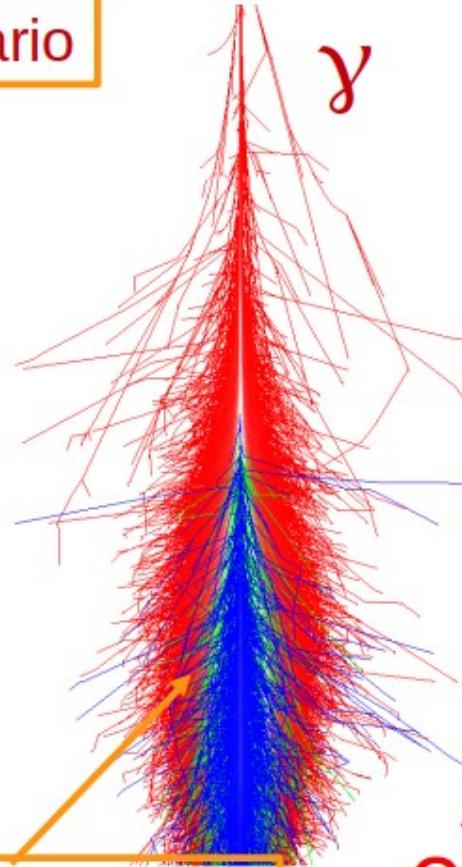
J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlsruhe

## Animaciones de dos EAS

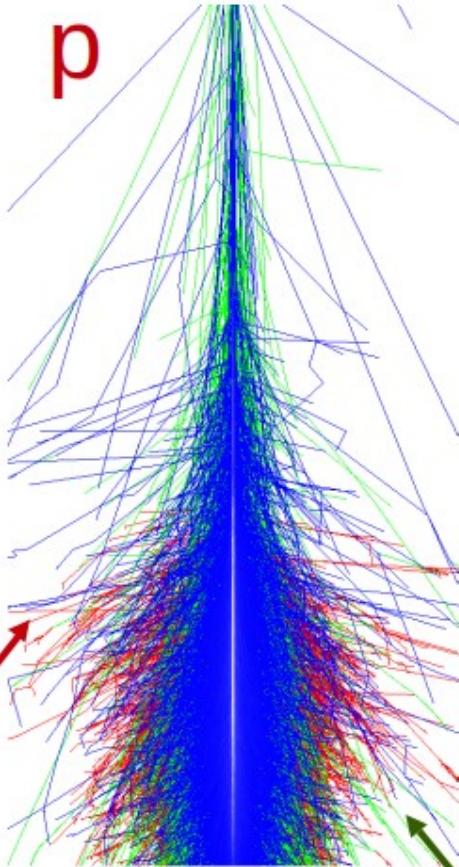
<https://www.youtube.com/watch?v=xchtgvzzc5M>

<https://www.youtube.com/watch?v=WgzAwKe5aTQ>

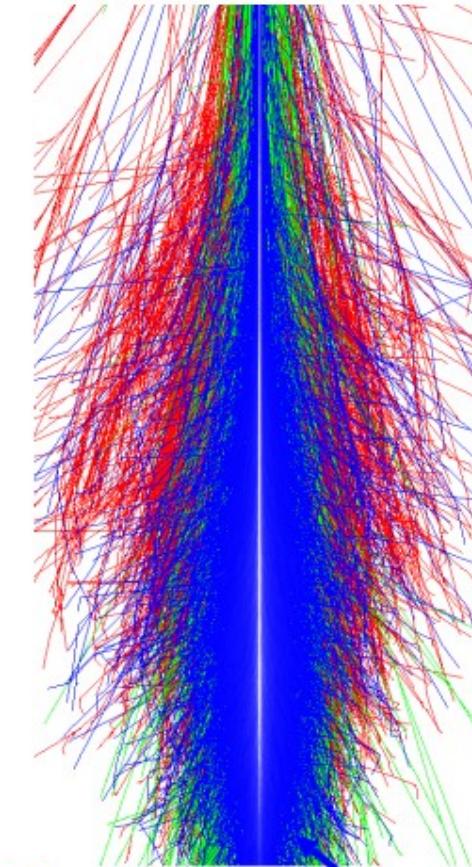
Primario



Secundarios



em



mu

hd

Desarrollo dependiente de la composición del primario

# Lluvias atmosféricas extendidas

- $X_0$  Punto de primera interacción
- $N_{\text{máx}}$  Número máximo de partículas en la lluvia:  $N_{\text{máx}} \propto E_p$
- $X_{\text{máx}}$  Profundidad del máximo:  $X_{\text{máx}} \propto \ln(E_p)$

## EM

- Decaimiento de  $\pi^0$ :  
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$   
 $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$
- Bethe-Heitler:  
Frenado:  $e^\pm \xrightarrow{\text{Z}Y} e^\pm \gamma$   
Pares:  $\gamma \xrightarrow{\text{Z}Y} e^+ e^-$
- Domina  $N_{\text{máx}} \rightarrow X_{\text{máx}}$
- $E_{\text{EM}} = (80\% - 90\%)E_p$

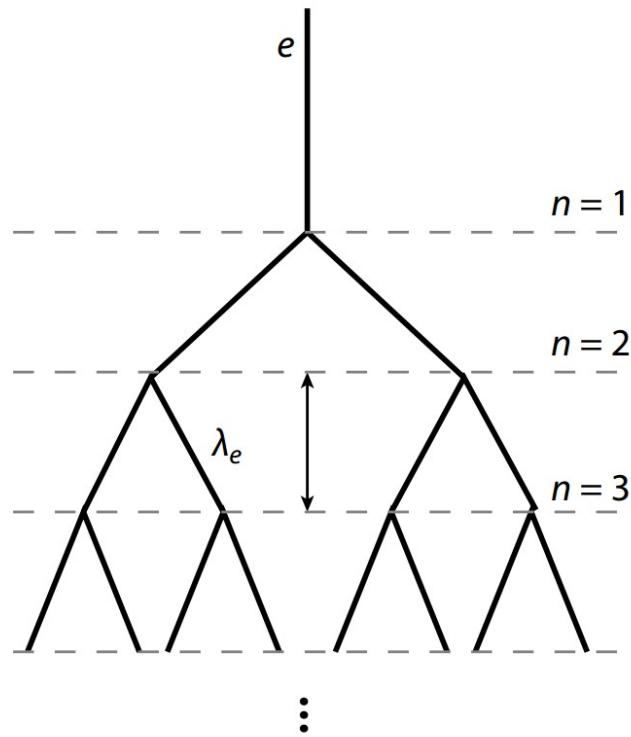
## Muónica

- Dec. de  $K^\pm$  y  $\pi^\pm$ :  
 $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$   
 $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$   
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
- Procesos radiativos  
 $\mu^\pm \xrightarrow{\text{Z}Y} \mu^\pm e^+ e^-$   
 $\mu^\pm \xrightarrow{\text{Z}Y} \mu^\pm + \text{had}$
- $N_\mu \propto A^{0,1} E_p^{0,9}$

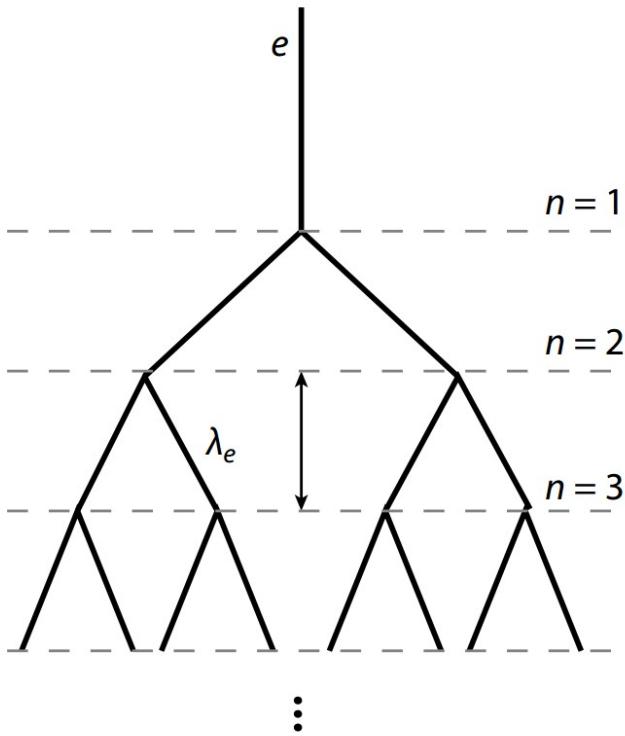
## Hadrónica

- Fragmentos nucleares
- $p, n, \pi^\pm, K^\pm$
- Mesones encantados
- *Leading particle effect*
- Concentrada en el eje de la lluvia
- $N_h \propto N_e^{0,95}$
- $N_h/N_e \sim 10^{-2} - 10^{-4}$

# Modelo de Heitler



# Modelo de Heitler



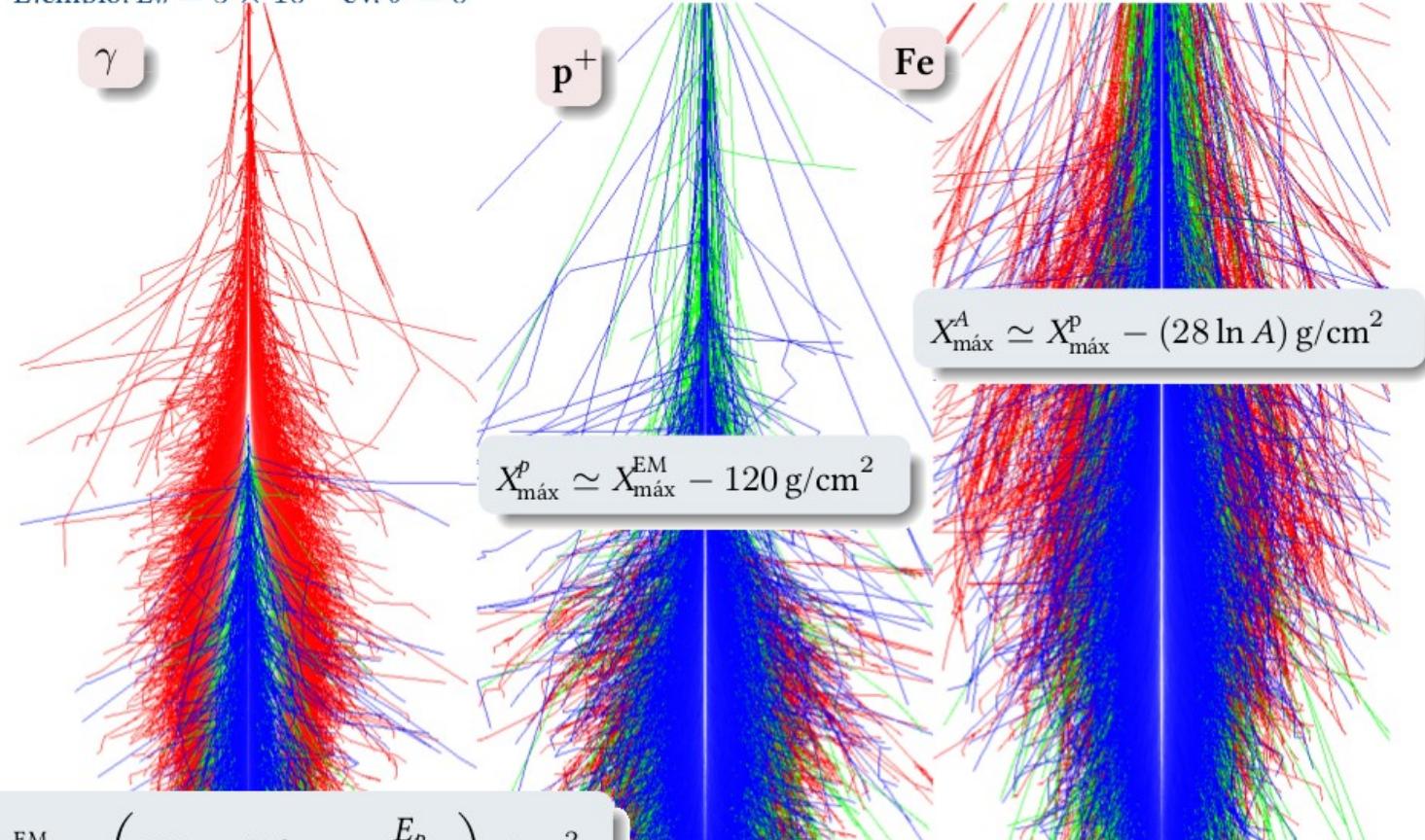
- Recorrida una distancia  $\lambda_{EM} = X_{EM} / \ln 2$ , una partícula produce 2 partículas con  $E_{n+1}=E_n/2$
- El número de partículas:  $N \sim 2^n$ :  $N(X) = 2^{X/\lambda_{EM}}$
- Luego, la energía media:  $\langle E \rangle = E_p / N(X) = E_p / 2^{X/\lambda_{EM}}$
- Ahora, si  $\langle E \rangle = E_c \rightarrow$  Se detiene la producción.

$$N_{\max} \sim \frac{E_p}{E_c}$$

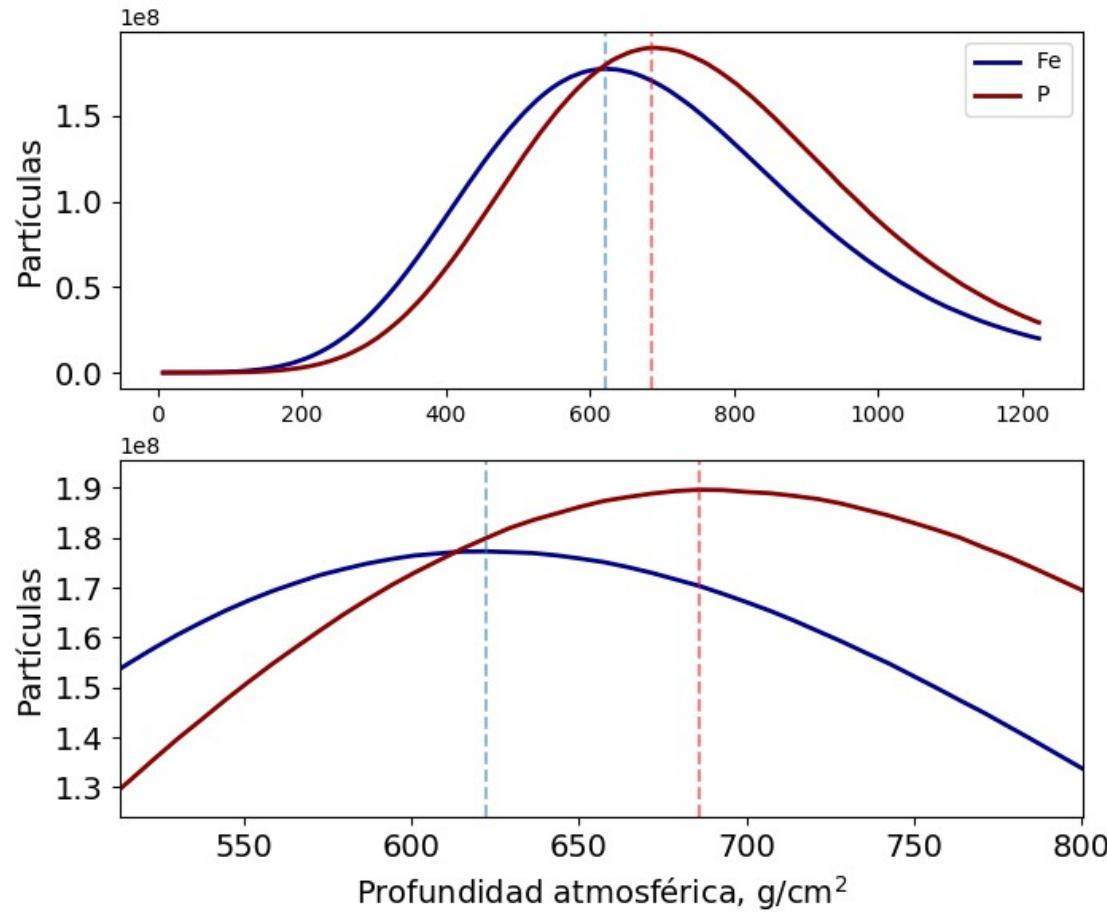
$$X_{\max} \sim \log \left( \frac{E_p}{E_c} \right)$$

# Cascadas atmosféricas

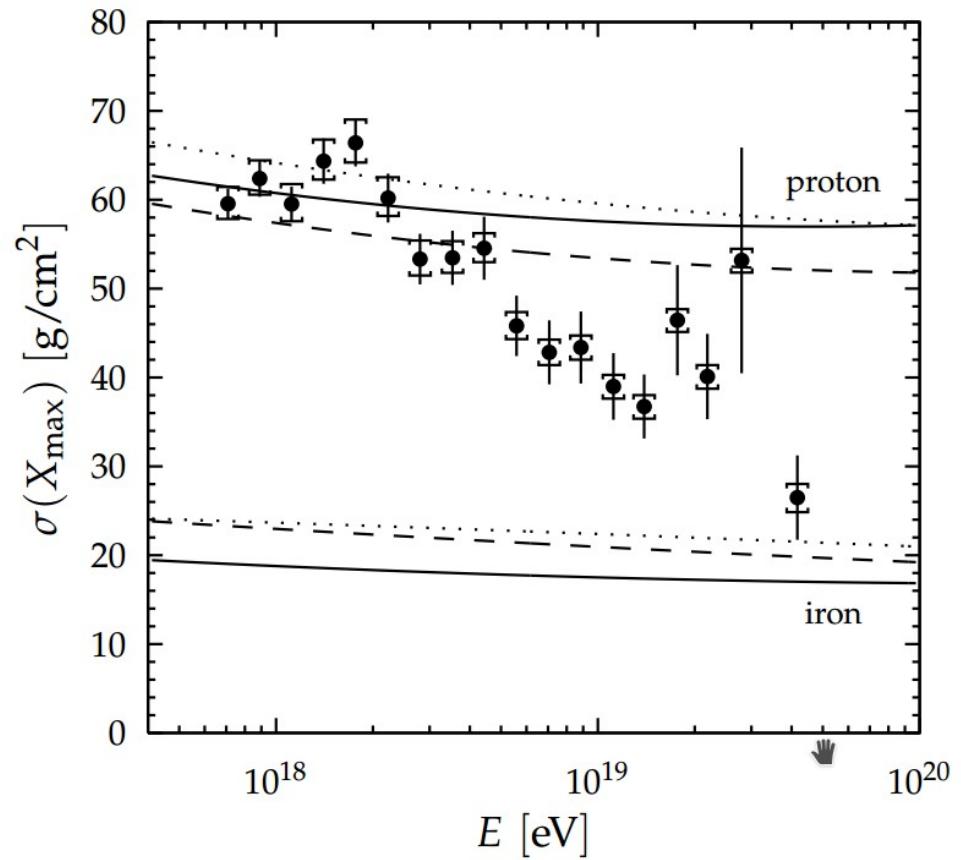
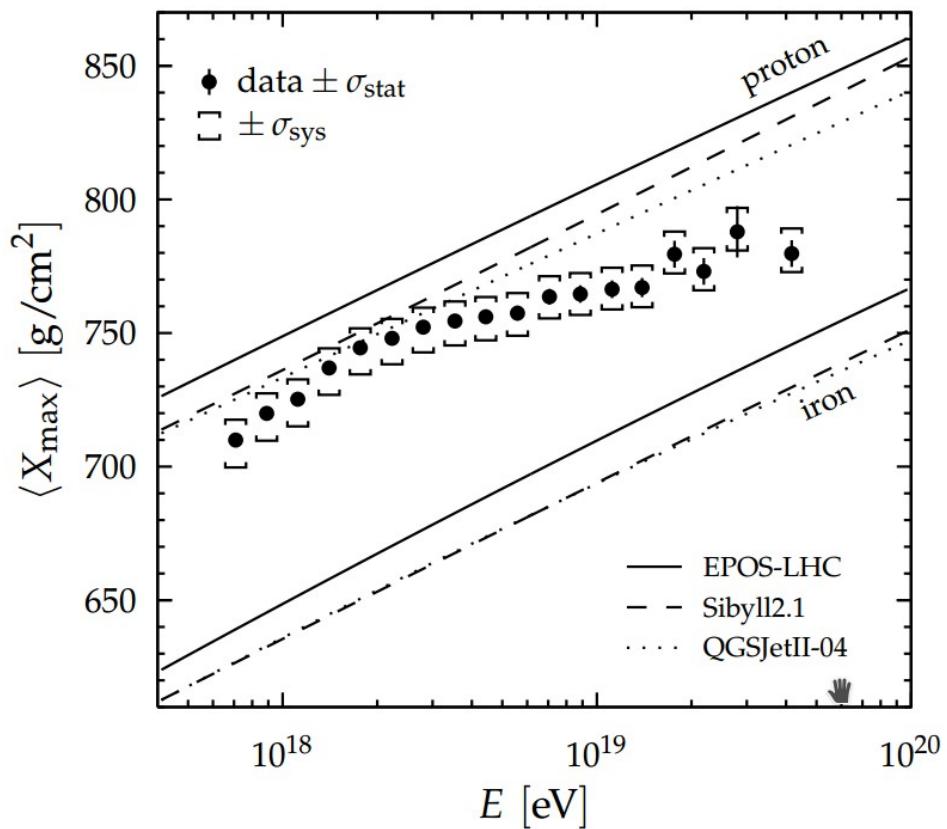
Ejemplo.  $E_n = 5 \times 10^{14}$  eV.  $\theta = 0^\circ$



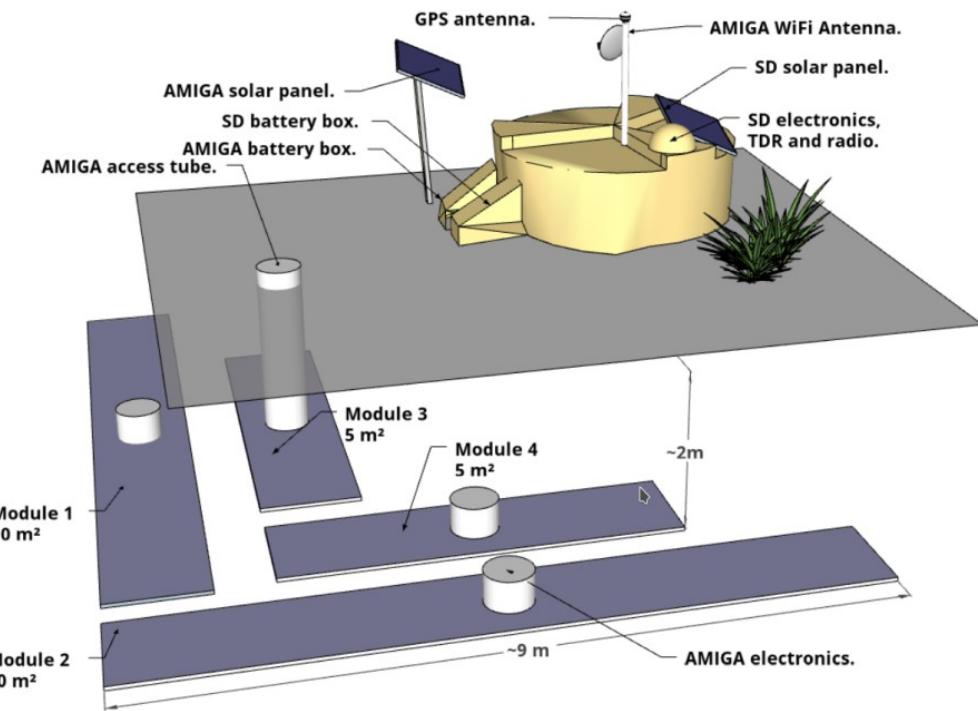
# Distribución longitudinal del Fe y P



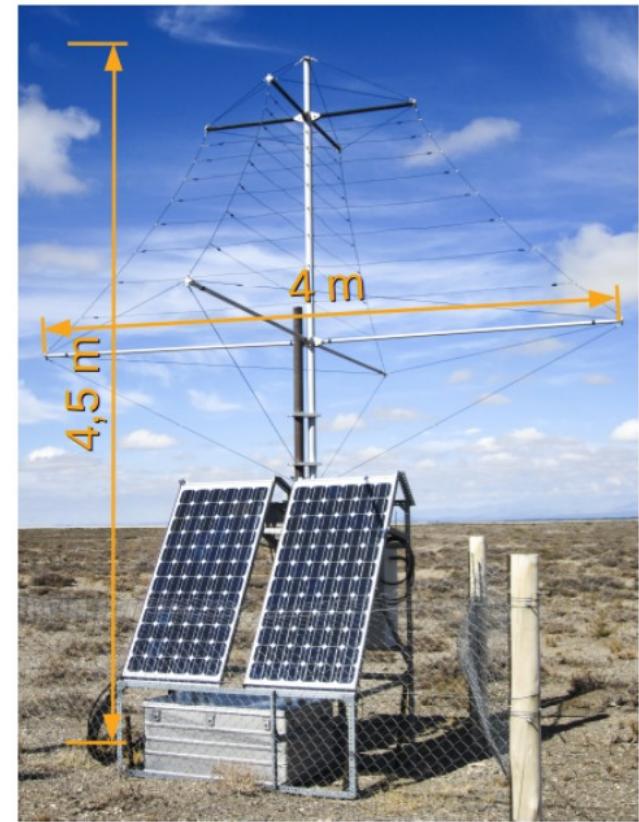
# $X_{\max}$ y composición química



# Separación hierro-protón

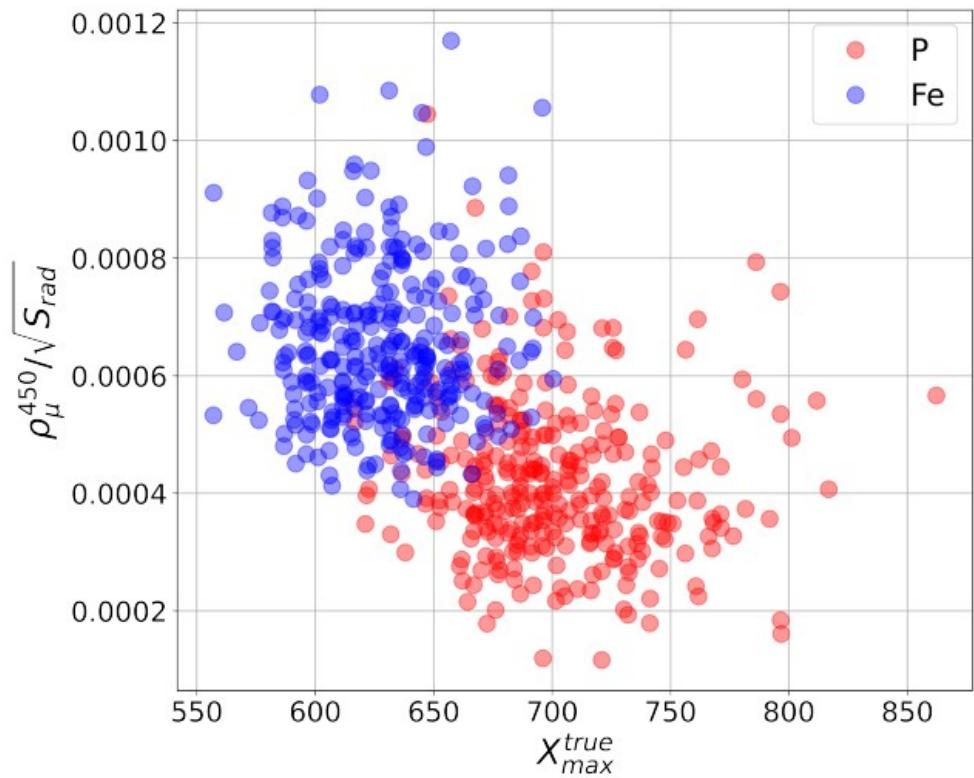
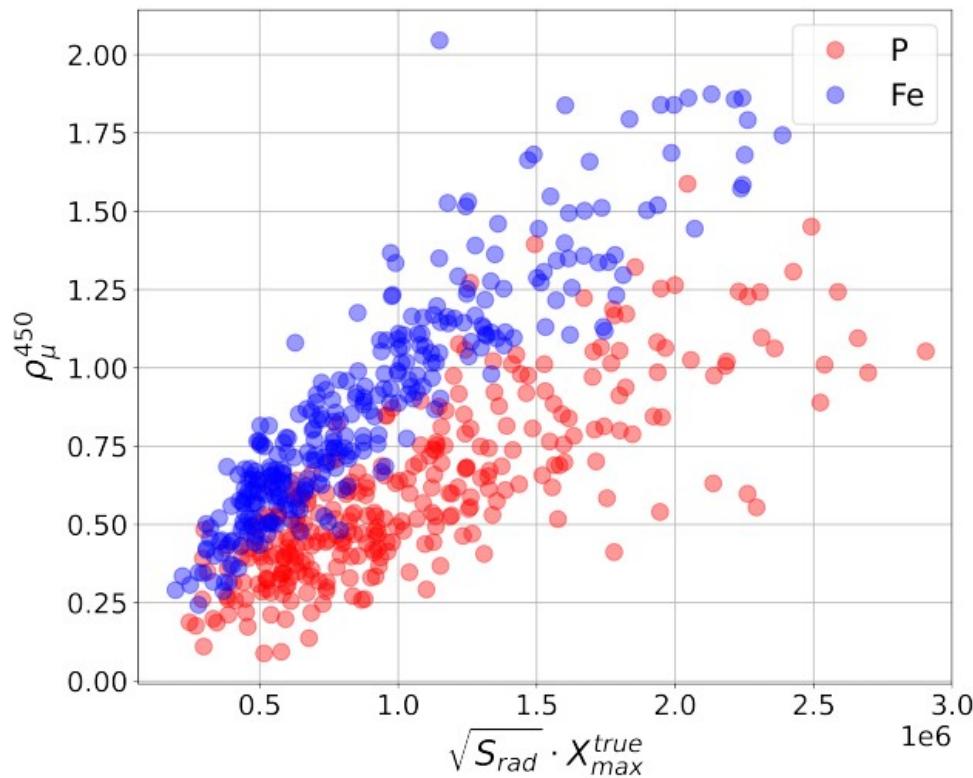


Componente muonica

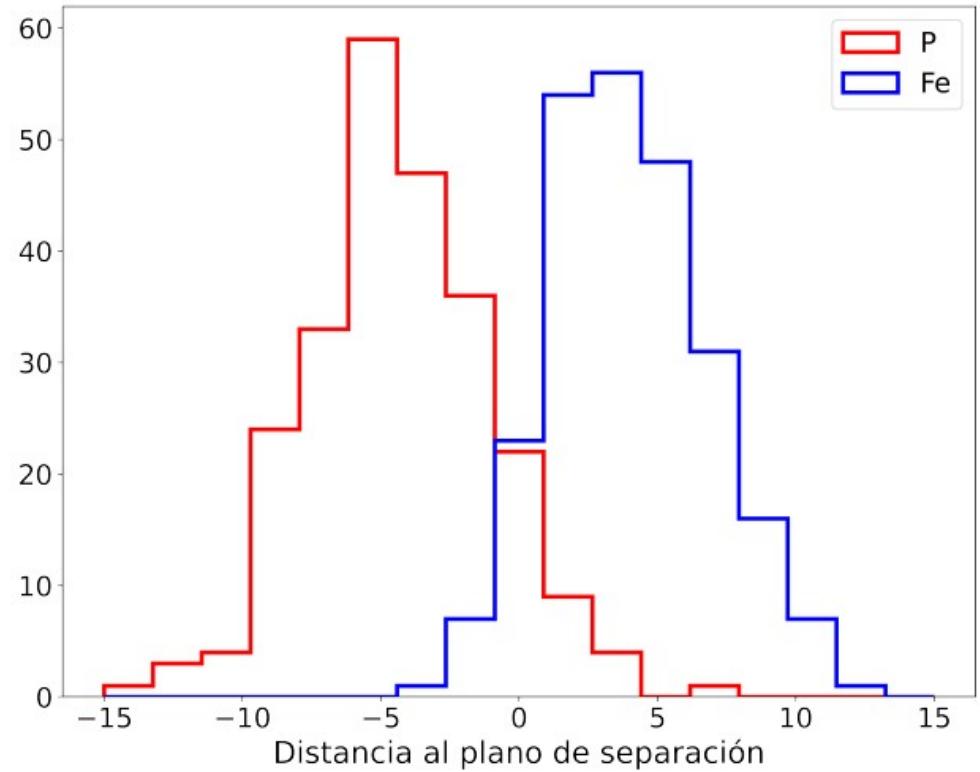
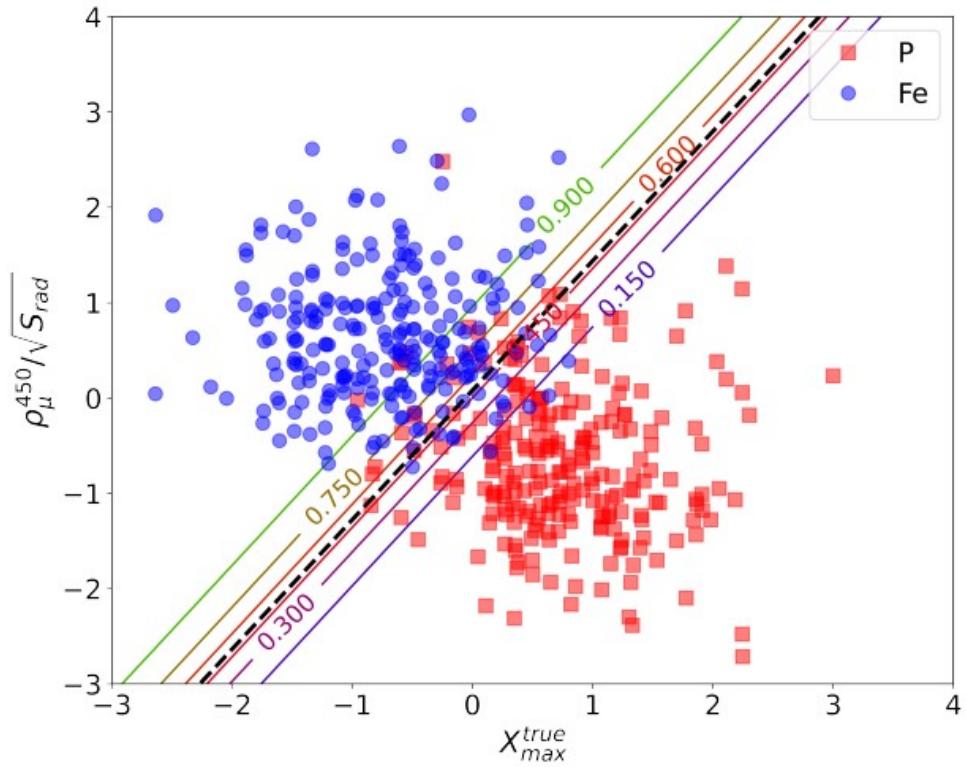


Componente electromagnética

# Separación hierro-protón

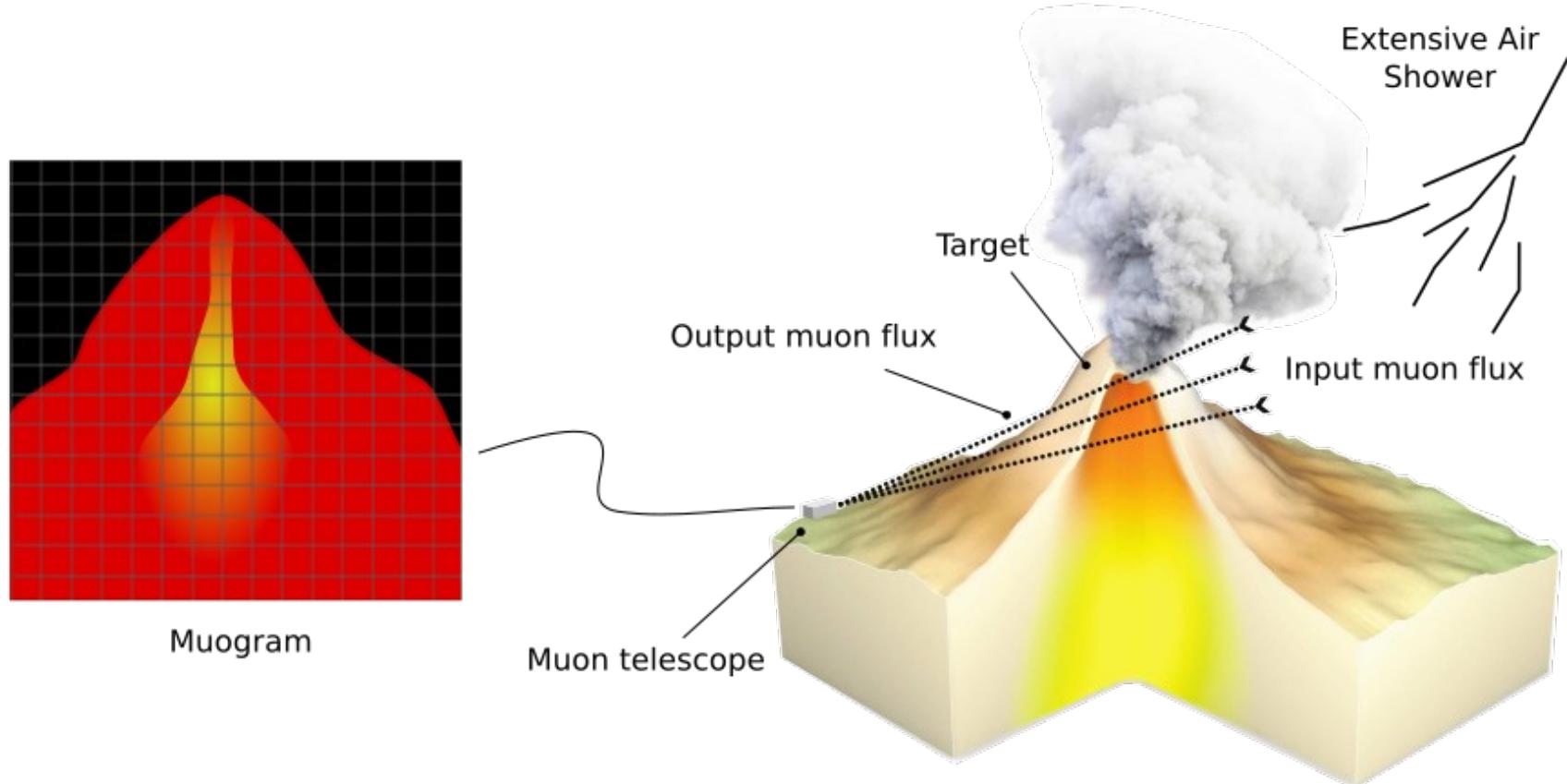


# Separación hierro-protón

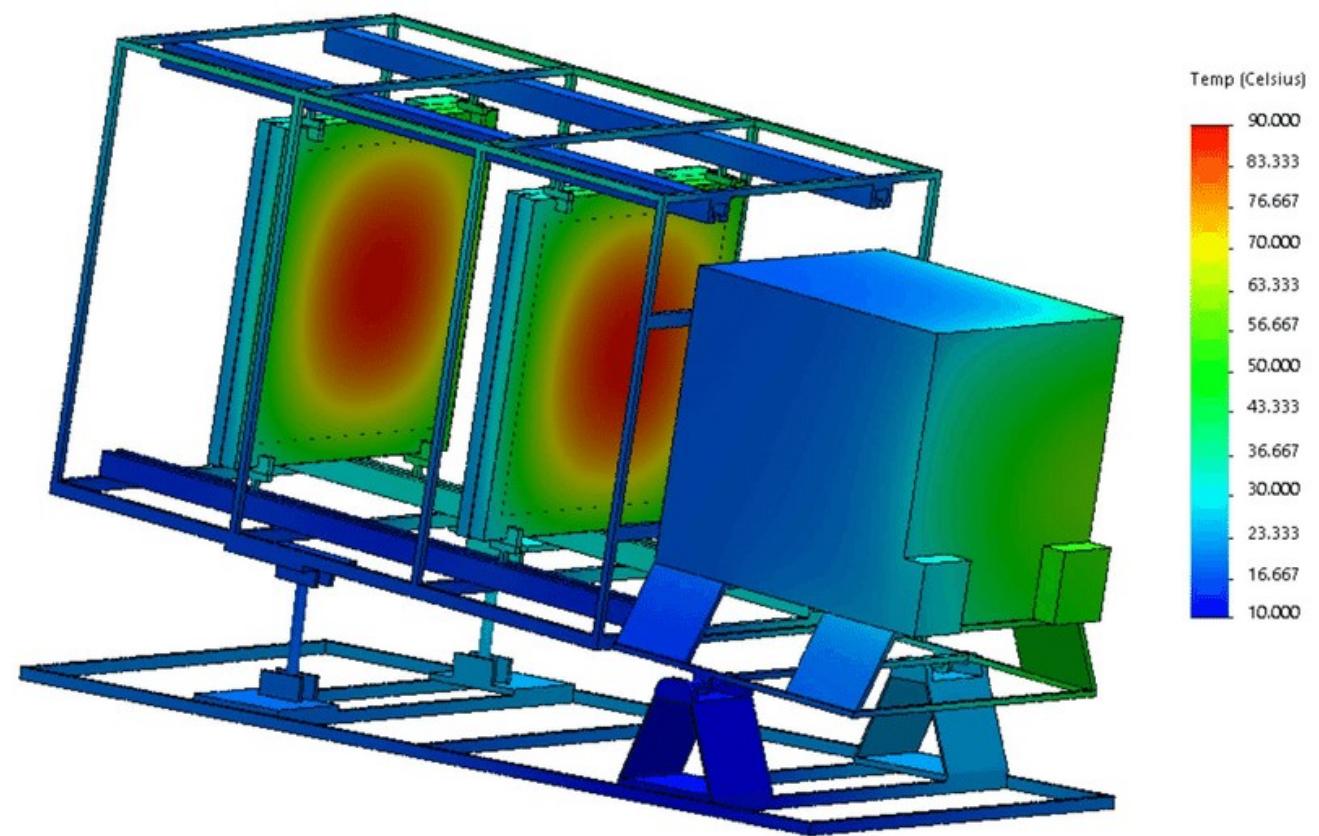


# Aplicaciones de los rayos cósmicos

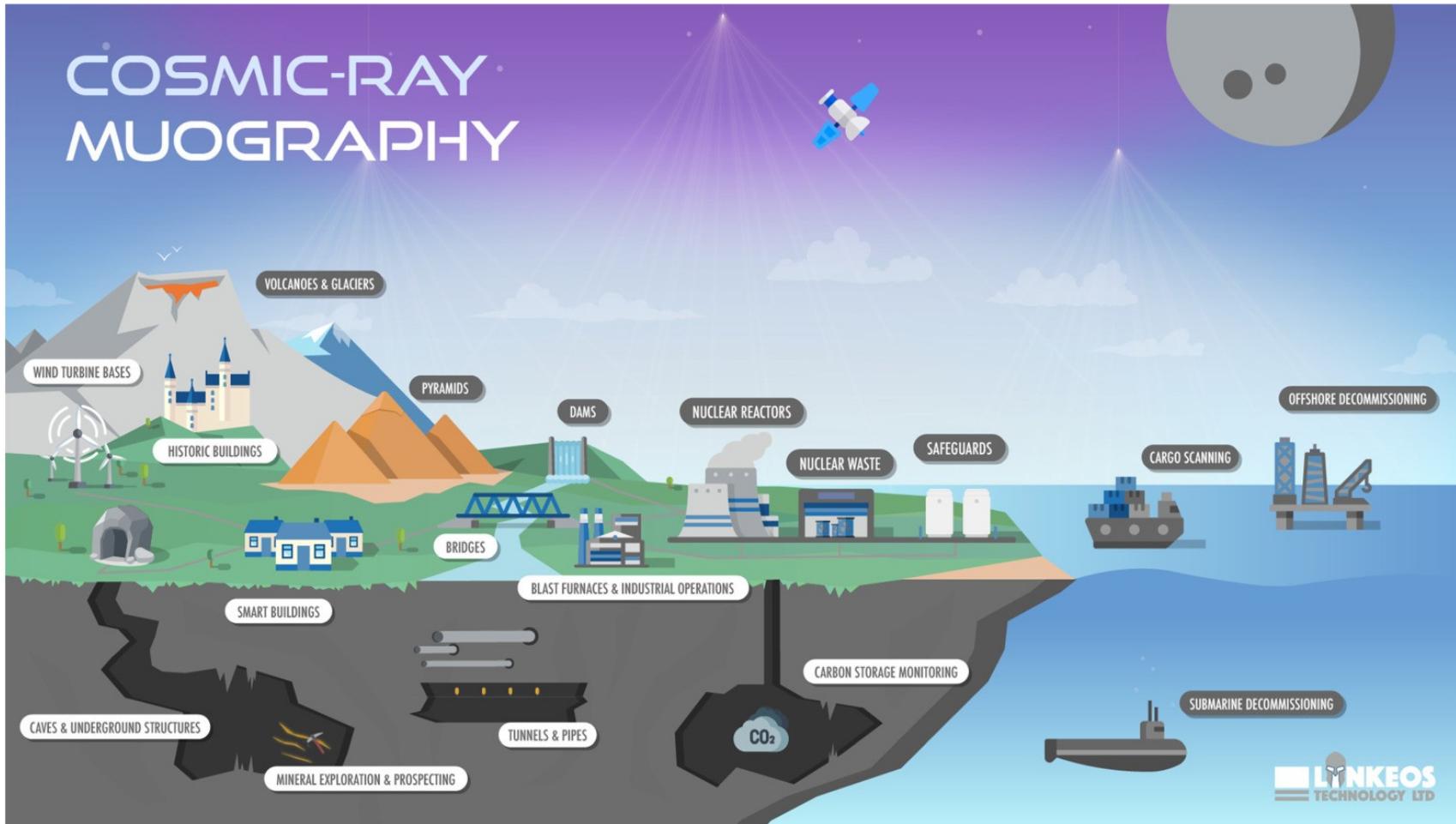
# Muografia



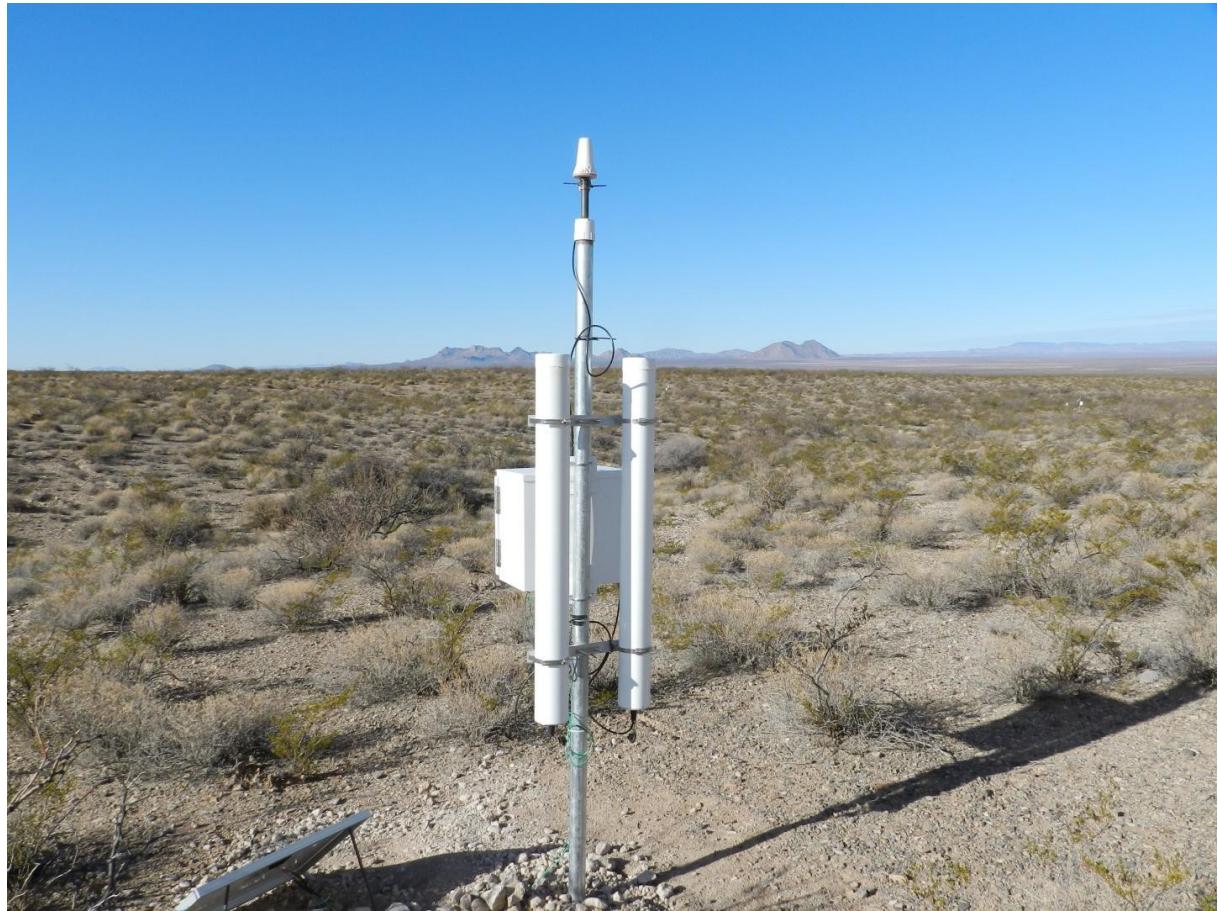
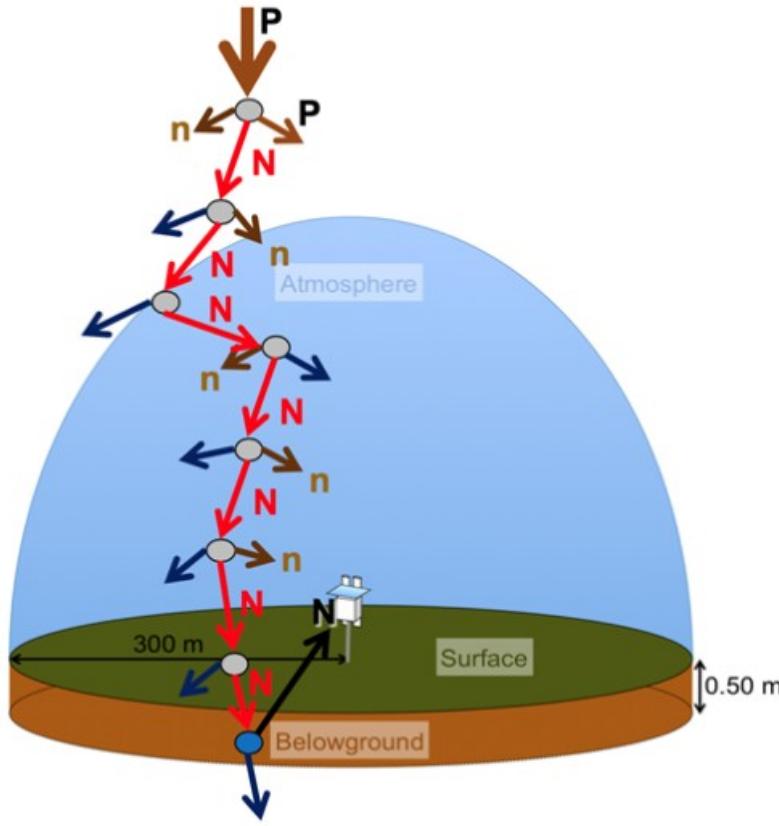
# Muografia



# Muografia



# Neutrones para la agricultura



# Neutrones para la agricultura

