

DDAp - ITeDA+KIT

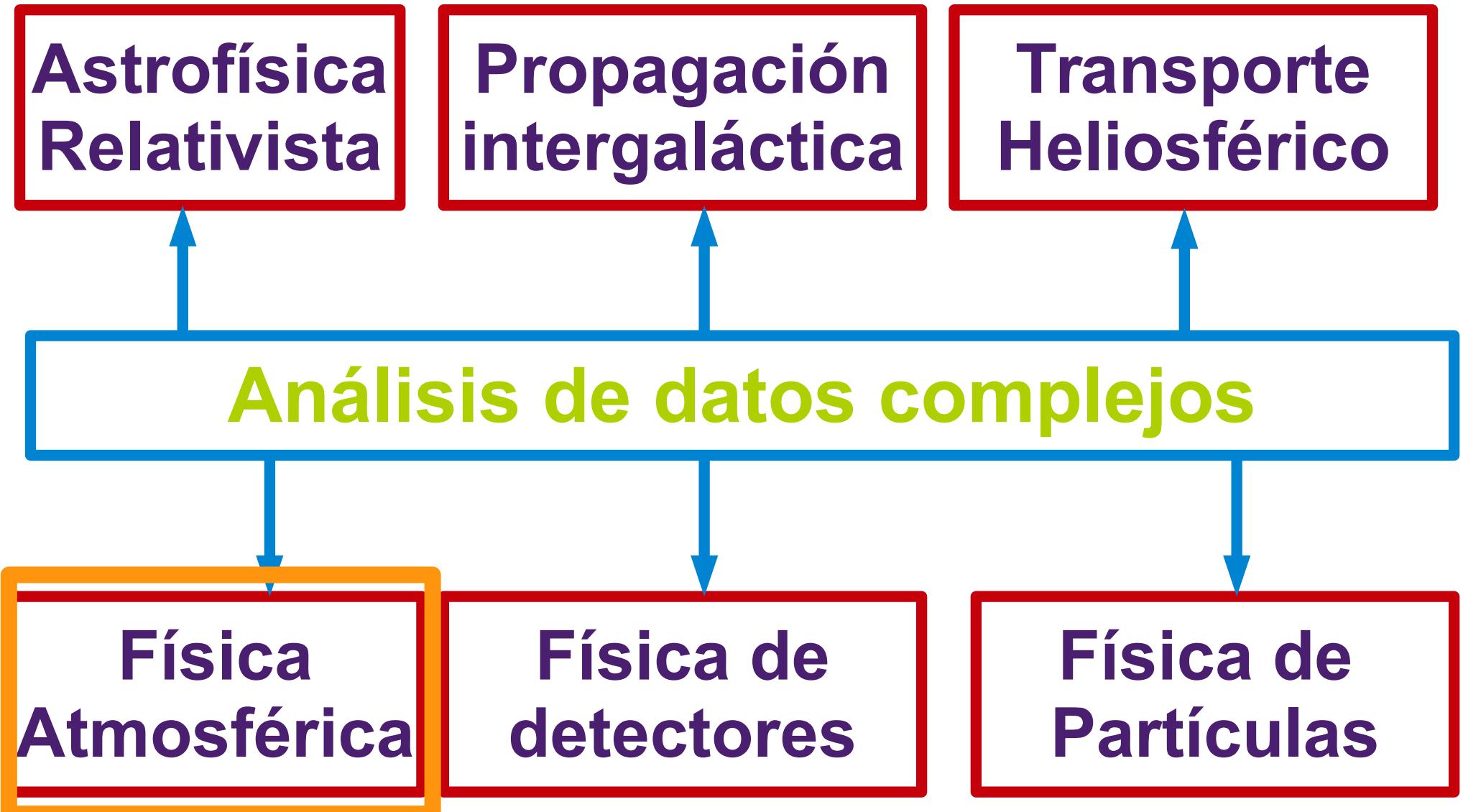
Física de Astropartículas - 2017

- **Unidad** 02 – Lluvias atmosféricas extendidas
- **Clase** UO2
- **Cont** EAS
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <https://github.com/asoreyh/astroparticulas>

- **Unidad 1: Fenomenología de Astropartículas.**
- **Unidad 2: Lluvias Atmosféricas Extendidas (EAS).**
- **Unidad 3: Técnicas de detección de Astropartículas.**
- **Unidad 4: Aplicaciones en LAGO y análisis de datos.**



<https://github.com/asoreyh/astroparticulas>





Poder de frenado ver p. ej., Knoll Cap 2.

- Es igual a la **energía perdida (por partículas cargadas) por unidad de camino recorrido** en el medio

$$S(E) = -\frac{dE}{dL}, \quad S(E) > 0, \text{ y } [S] = \text{MeV cm}^{-1}$$

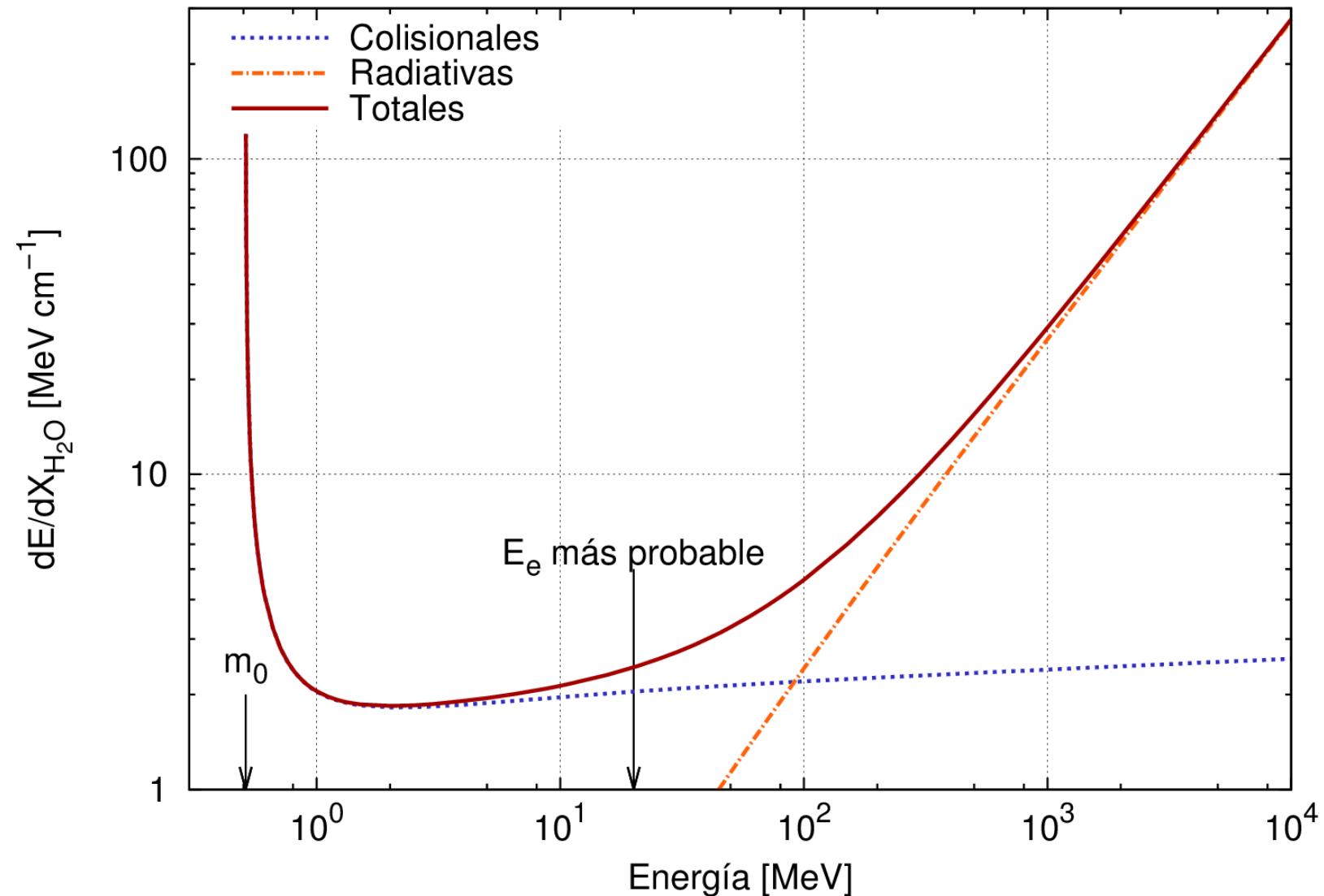
- Luego el **rango** recorrido depende de la energía inicial E_0 (CSDA: continuous slowing down approximation)

$$R(E) = \int_0^{E_0} \frac{dE}{S(E)}$$

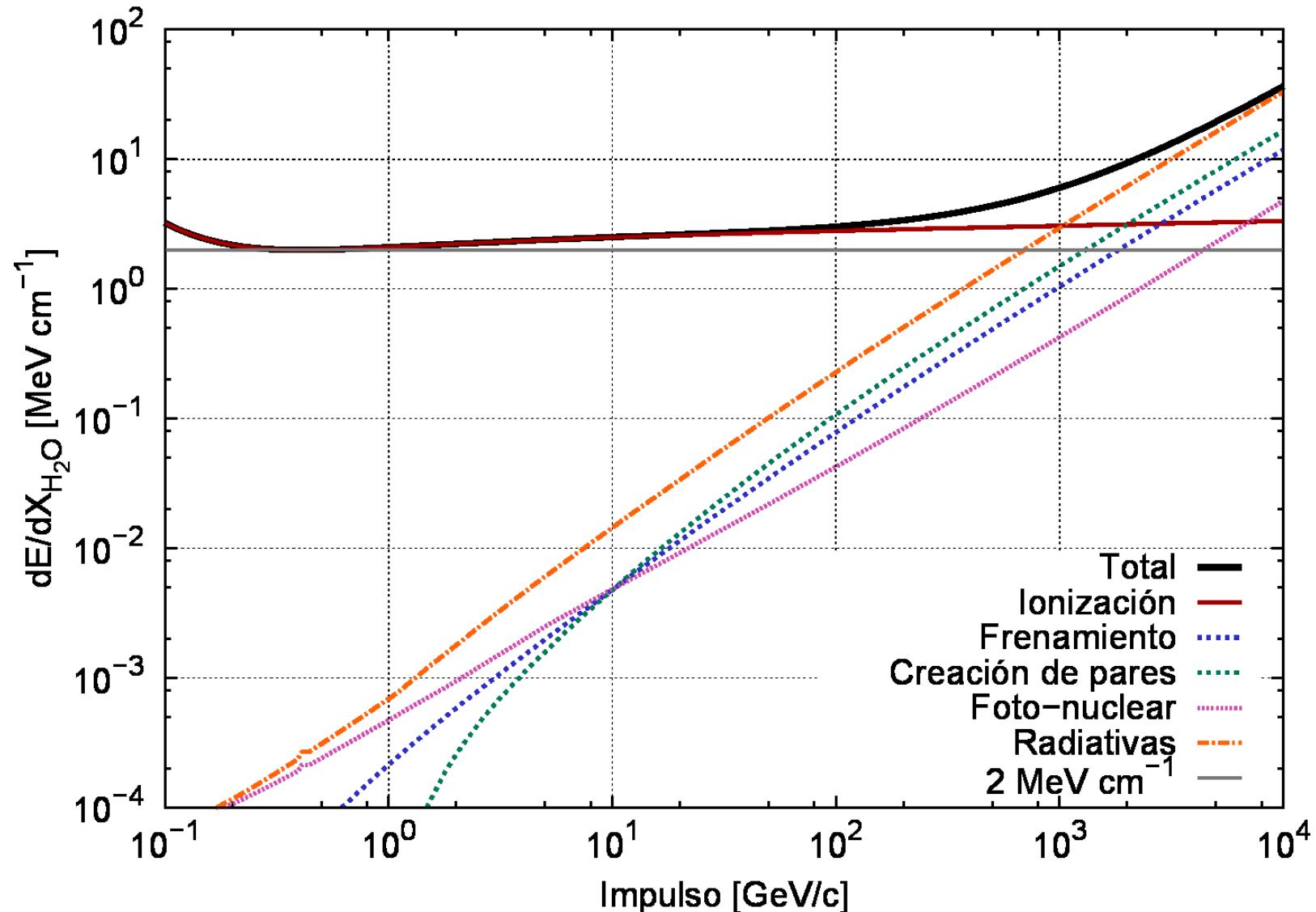
- X:

$$X = \int_0^L \rho(l) dl, \text{ si } \rho \text{ cte, } X = \rho L \quad [X] = g \text{ cm}^{-2}$$

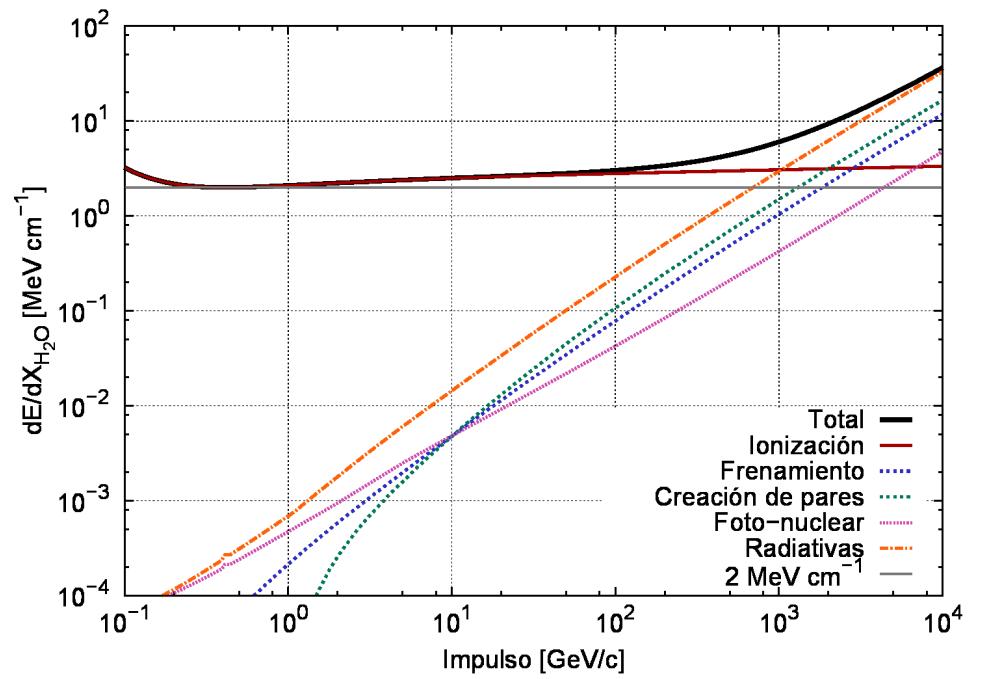
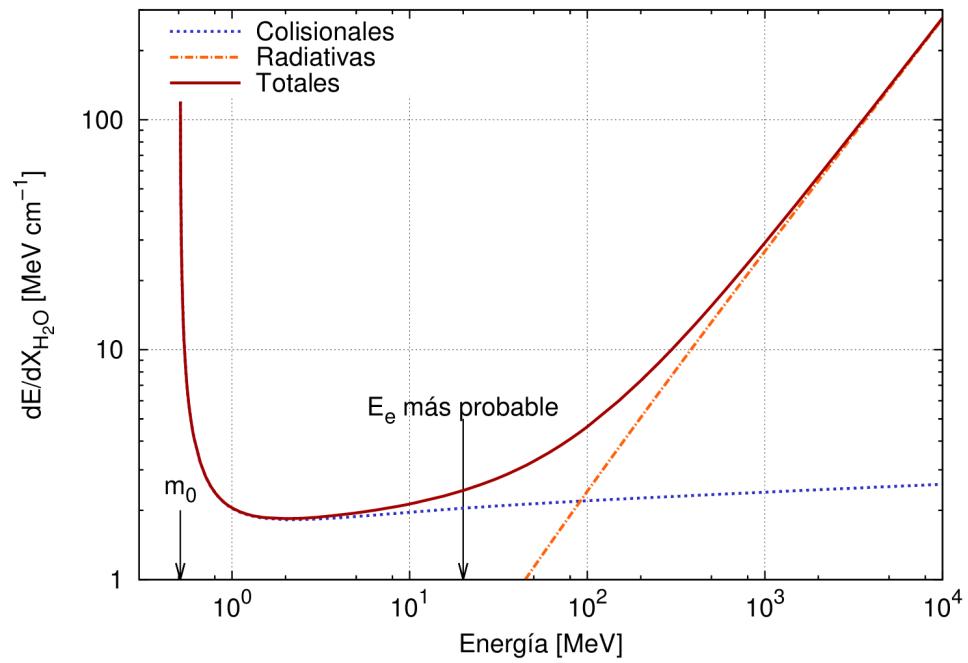
dE/dX electrones en agua

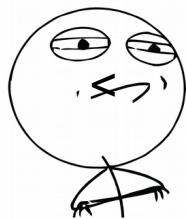


dE/dX muones en agua

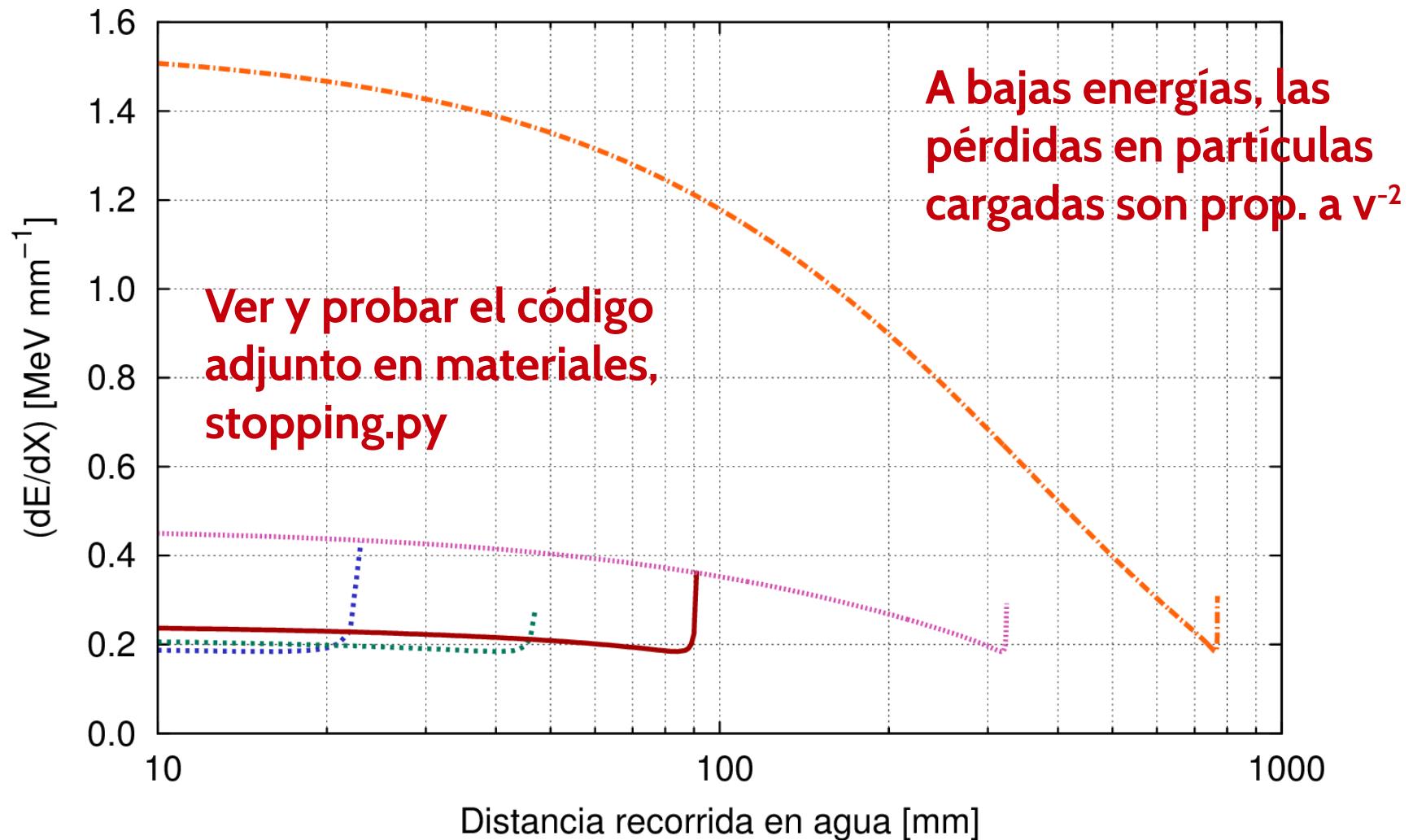


dE/dX electrones vs muones en agua

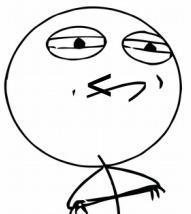




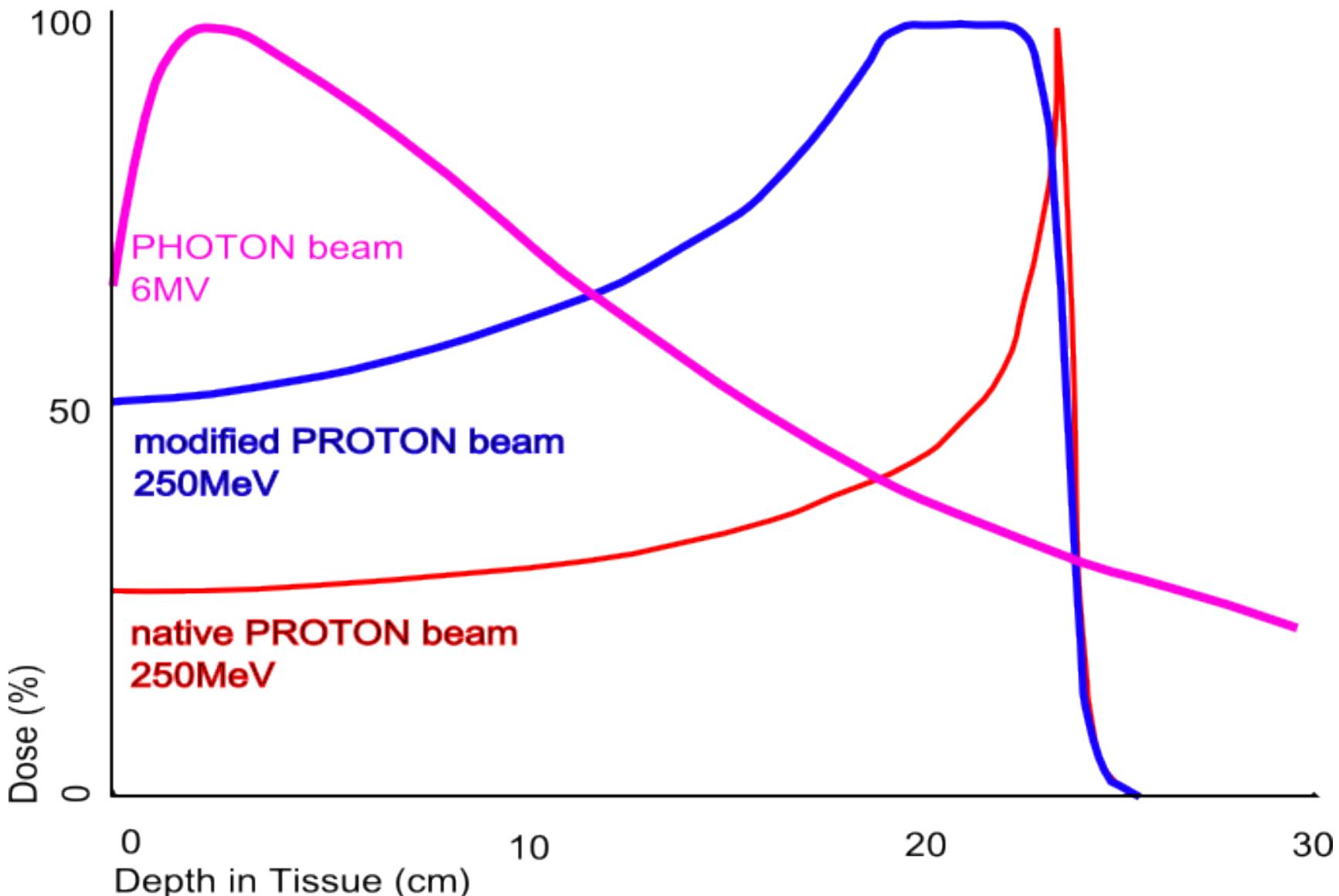
5 MeV 10 MeV 20 MeV — 100 MeV 500 MeV -·-



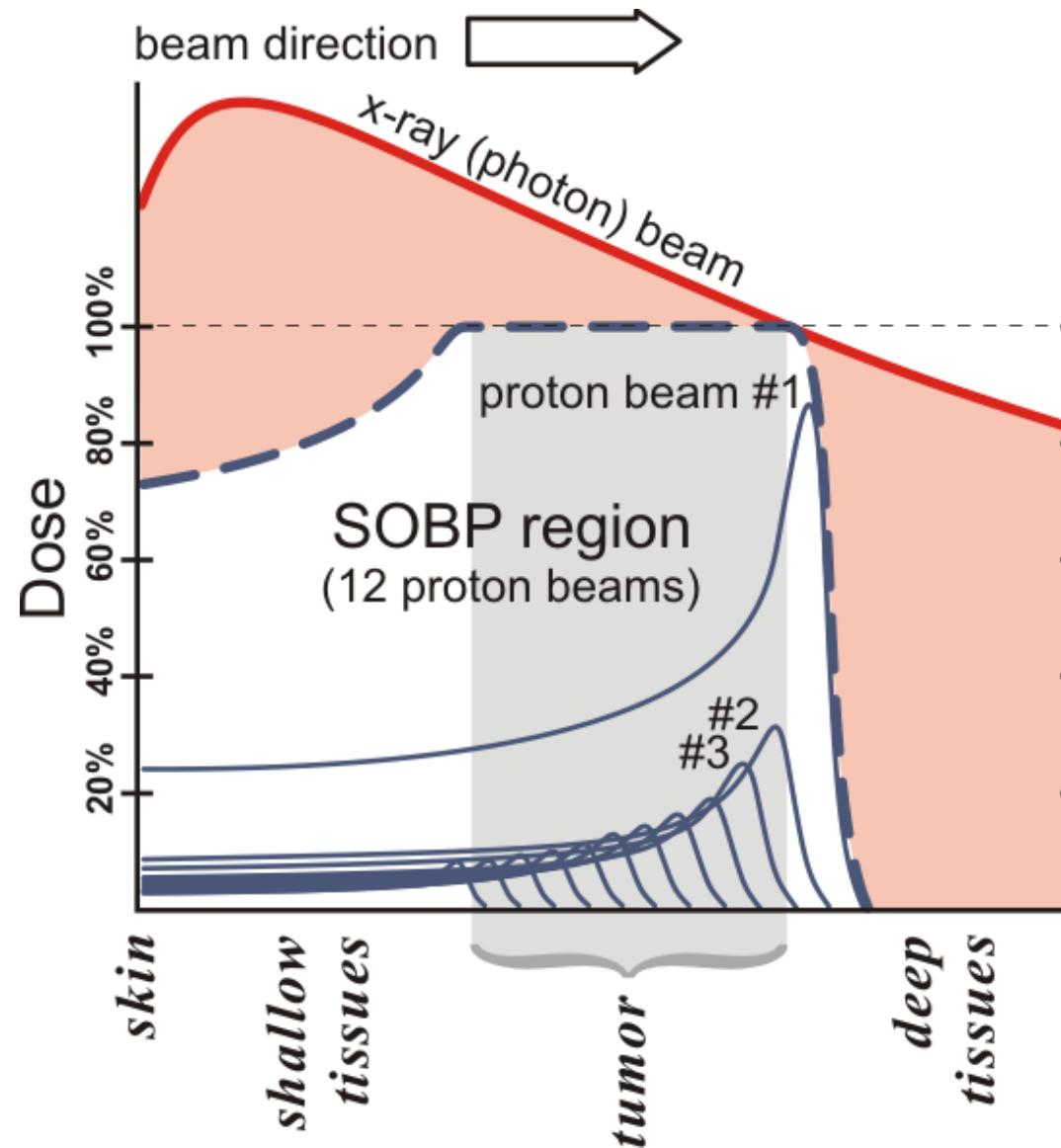
CHALLENGE ACCEPTED



Pico de Bragg



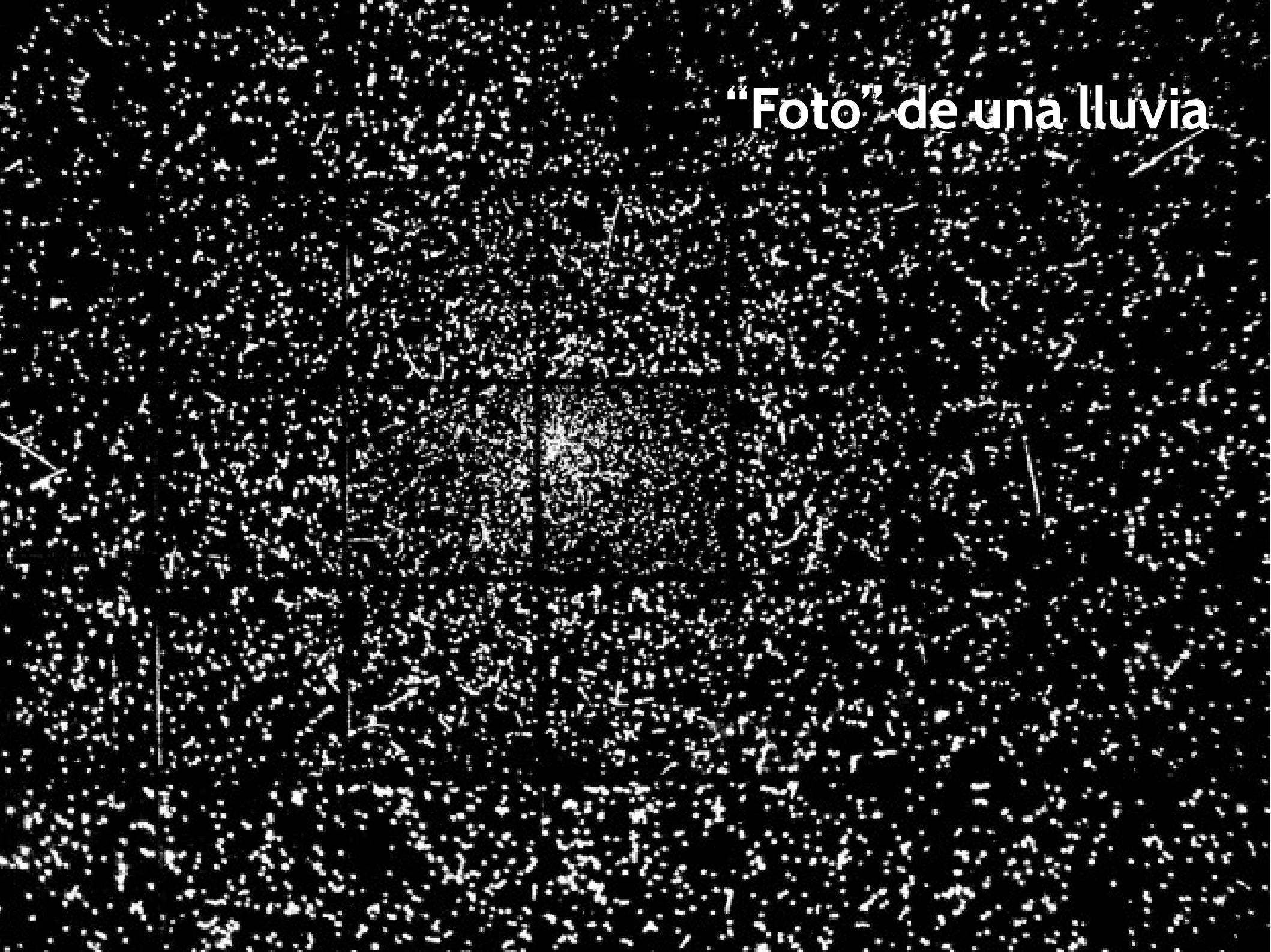
Pico de Bragg, haces múltiples



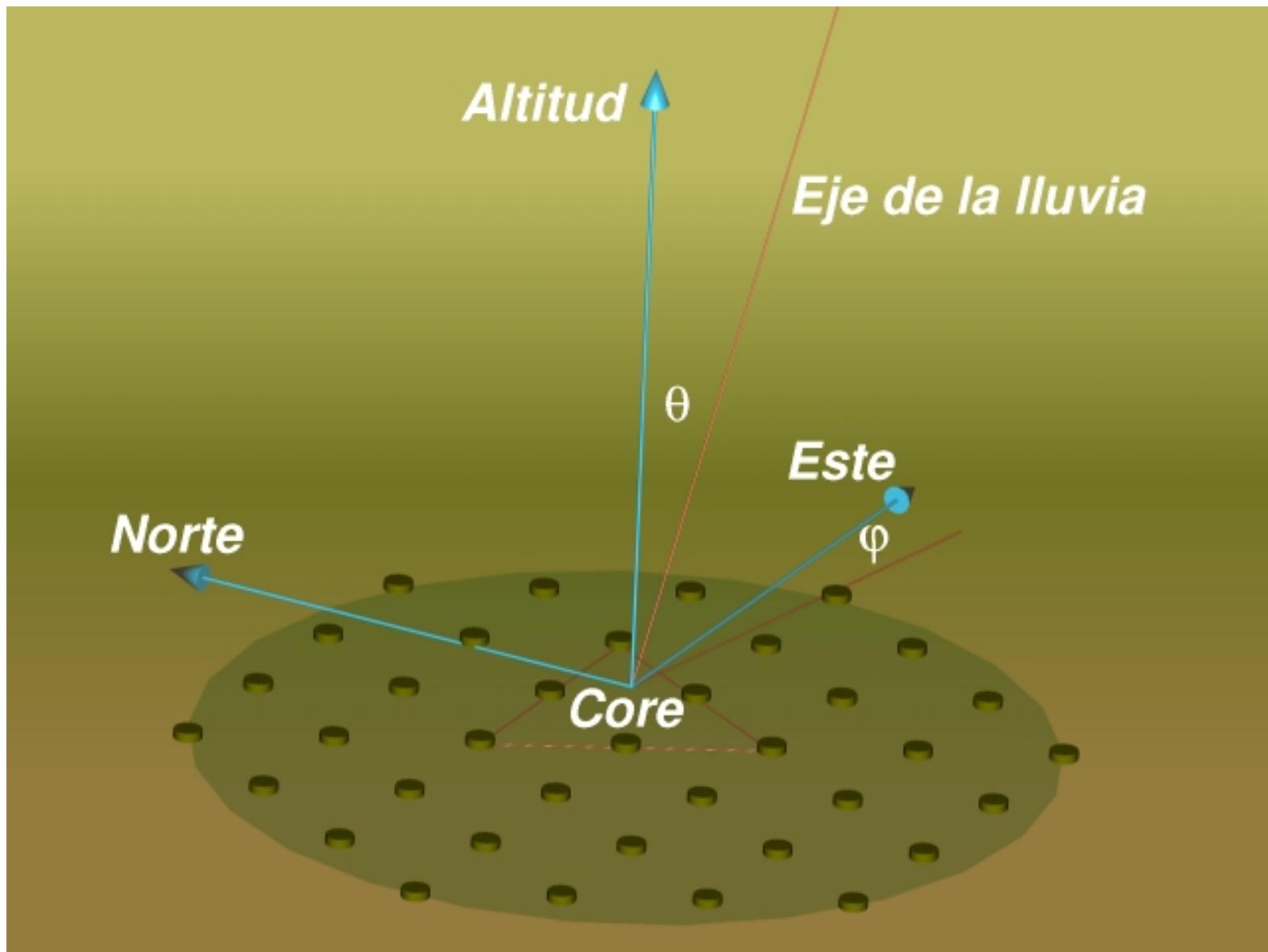
Interacción con la atmósfera



“Foto” de una lluvia



Algunas definiciones útiles



Blindaje atmosférico

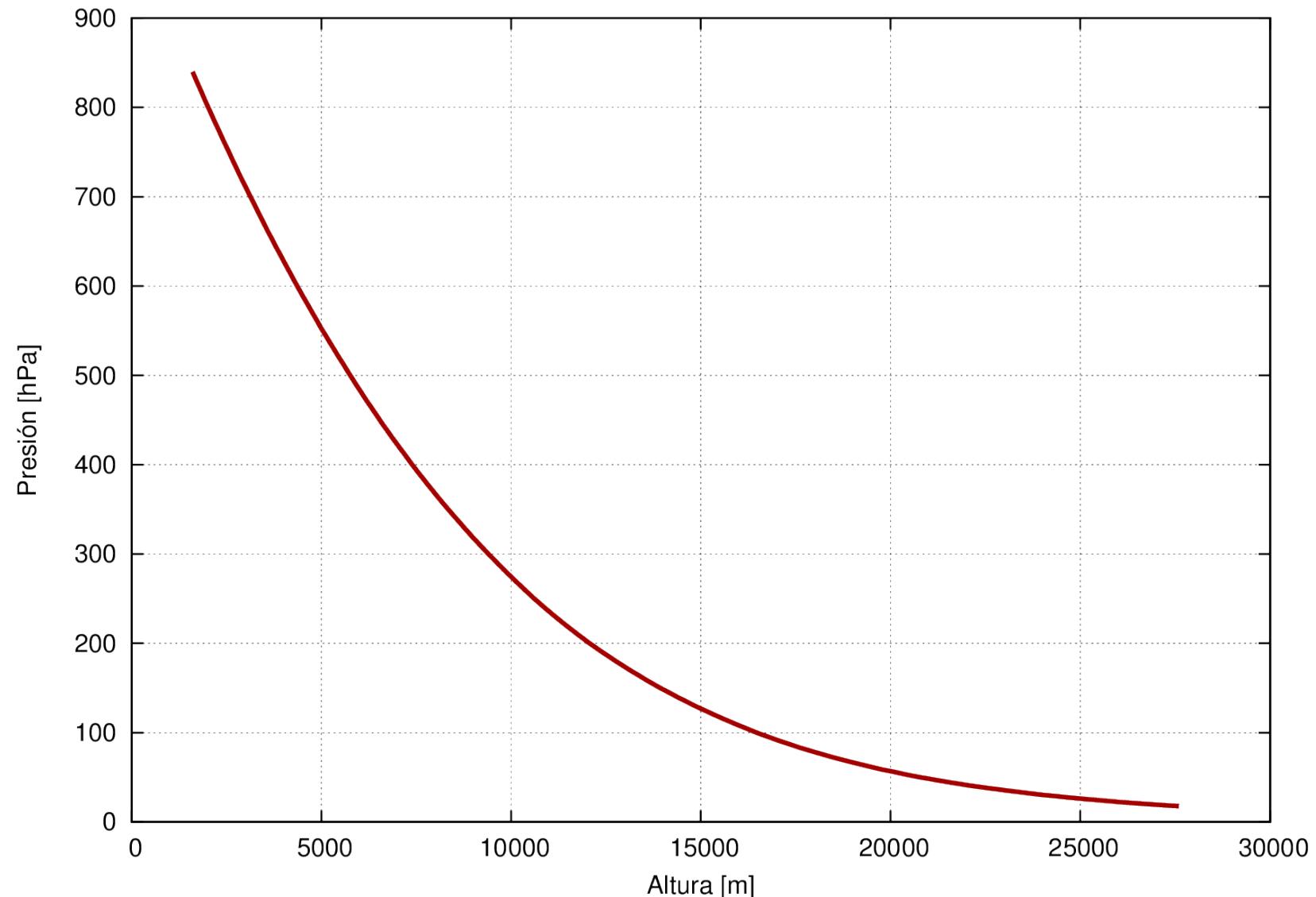


$$1 \text{ atm} = 1033 \text{ g/cm}^2 = 91 \text{ cm Pb}$$

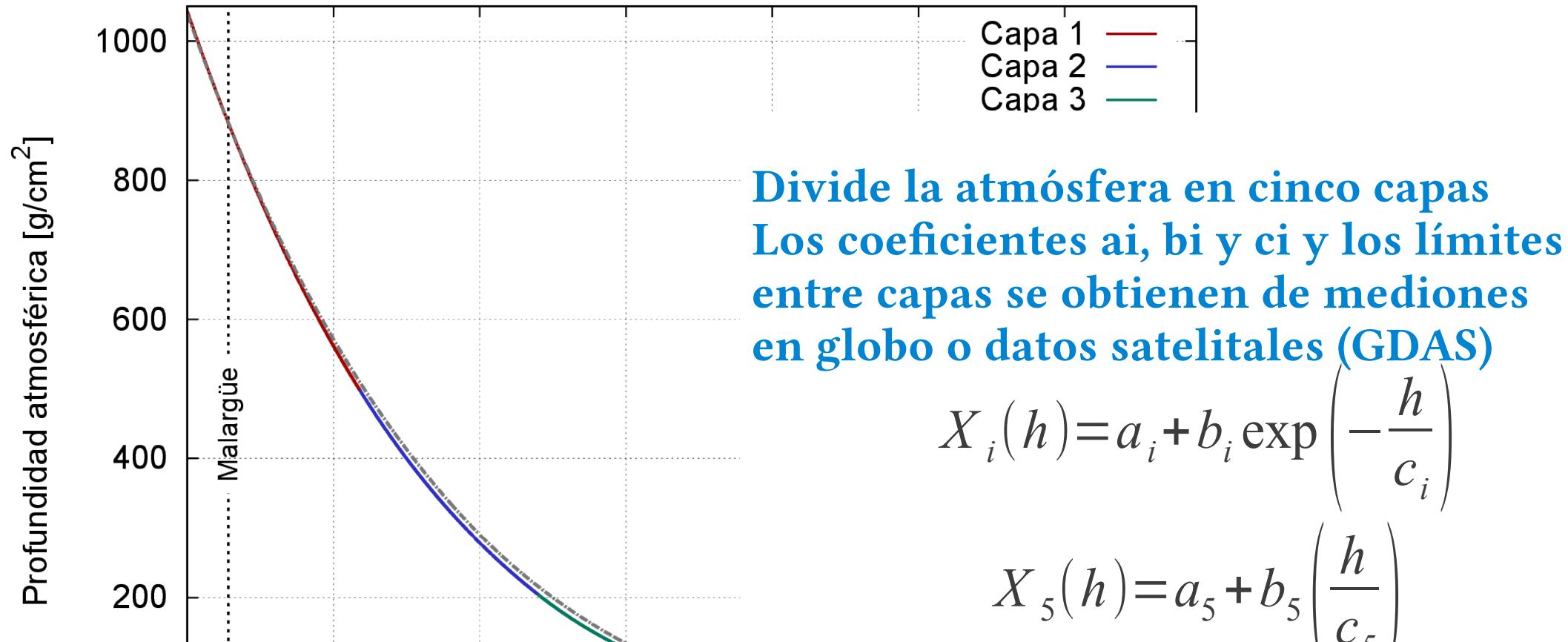
Profundidad atmosférica X:
Cantidad de masa atravesada en la dirección transversal para una partícula entrando a la atm.

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

Presión vs altura (datos)



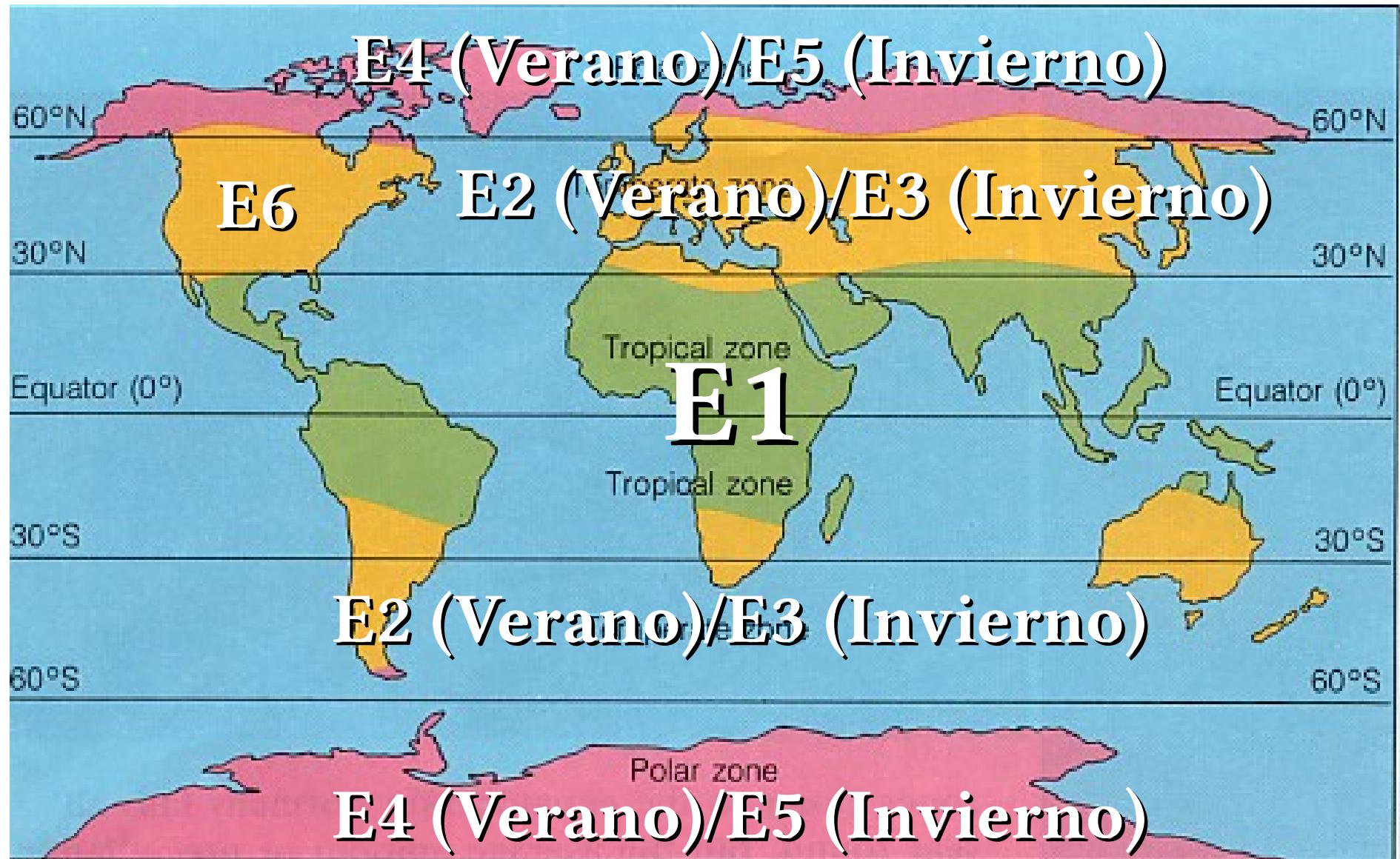
Modelo atmosférico de Linsley

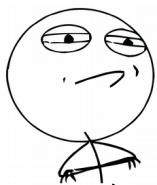


Capa	h [km]	a_i [g cm^{-2}]	b_i [g cm^{-2}]	c_i [cm]
1	0,0...5,9	-159,683519	1202,8804	977139,52
2	5,9...12,0	-79,5570480	1148,6275	858087,01
3	12,0...34,5	0,8914795	1432,0312	614451,60
4	34,5...100,0	$4,8719129 \times 10^{-4}$	696,42788	730875,73
5	> 100,0	0,01128292	1	10^9

30

MODTRAN Models (atmprof1-6)





La Tierra es c



- La cantidad de aire recorrida depende de la dirección de movimiento del RC

- Primera aproximación

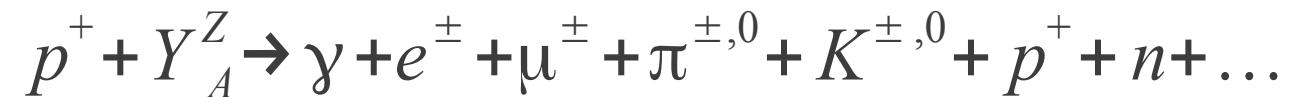
$$h(l) \approx l \cos(\theta) + \frac{1}{2} \frac{l^2}{R_E} \sin^2(\theta)$$

- Función de Chapman

- Si $\theta \rightarrow 90^\circ$,

$$Ch(h) = \left(\frac{\pi}{2} \frac{R_E + h}{h_s} \right)^{1/2} \approx 40$$

Lluvias Atmosféricas Extendidas





Photon EAS

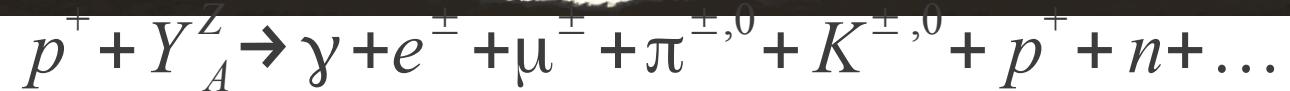


Gamma, Proton, Carbon-13

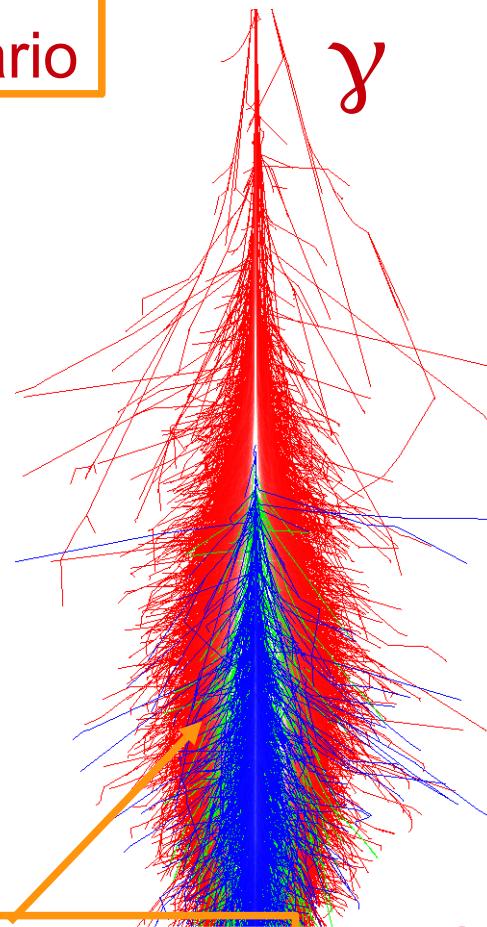


Lluvias Atmosféricas Extendidas

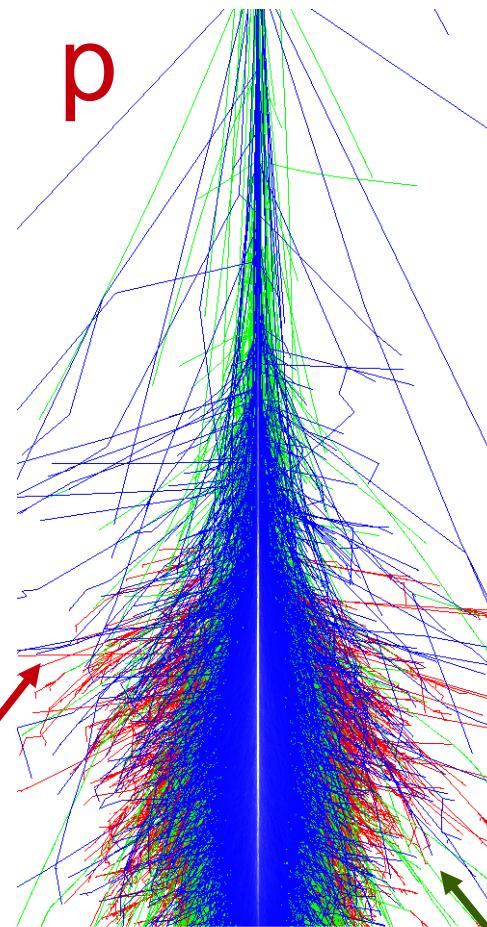
$E=5 \times 10^{14}$ eV



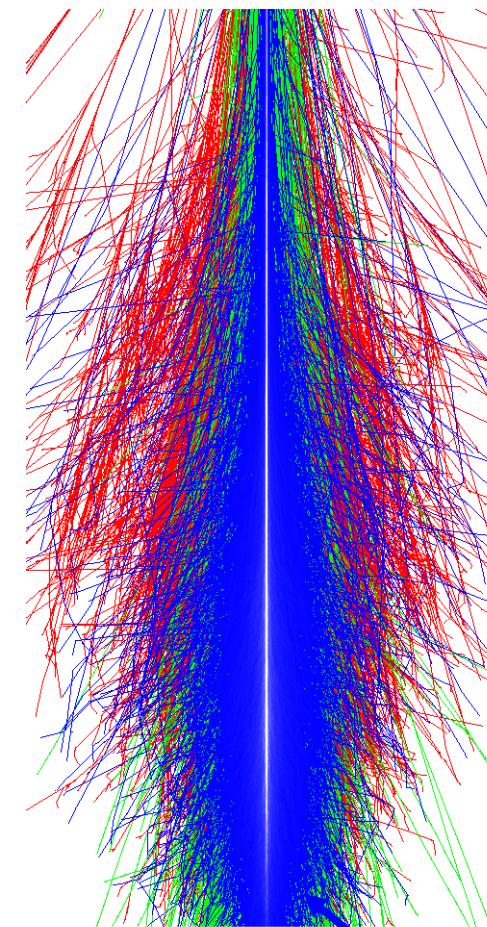
Primario



Secundarios



em



mu

hd

Desarrollo dependiente de la composición del primario

Lluvias Atmosféricas Extendidas

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

EM

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

Muónica

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

Hadrónica

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

Poder de frenado

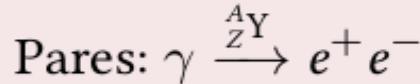
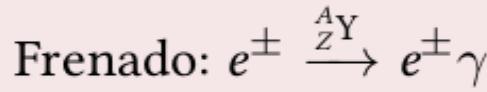
EM

- Decaimiento de π^0 :

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$$

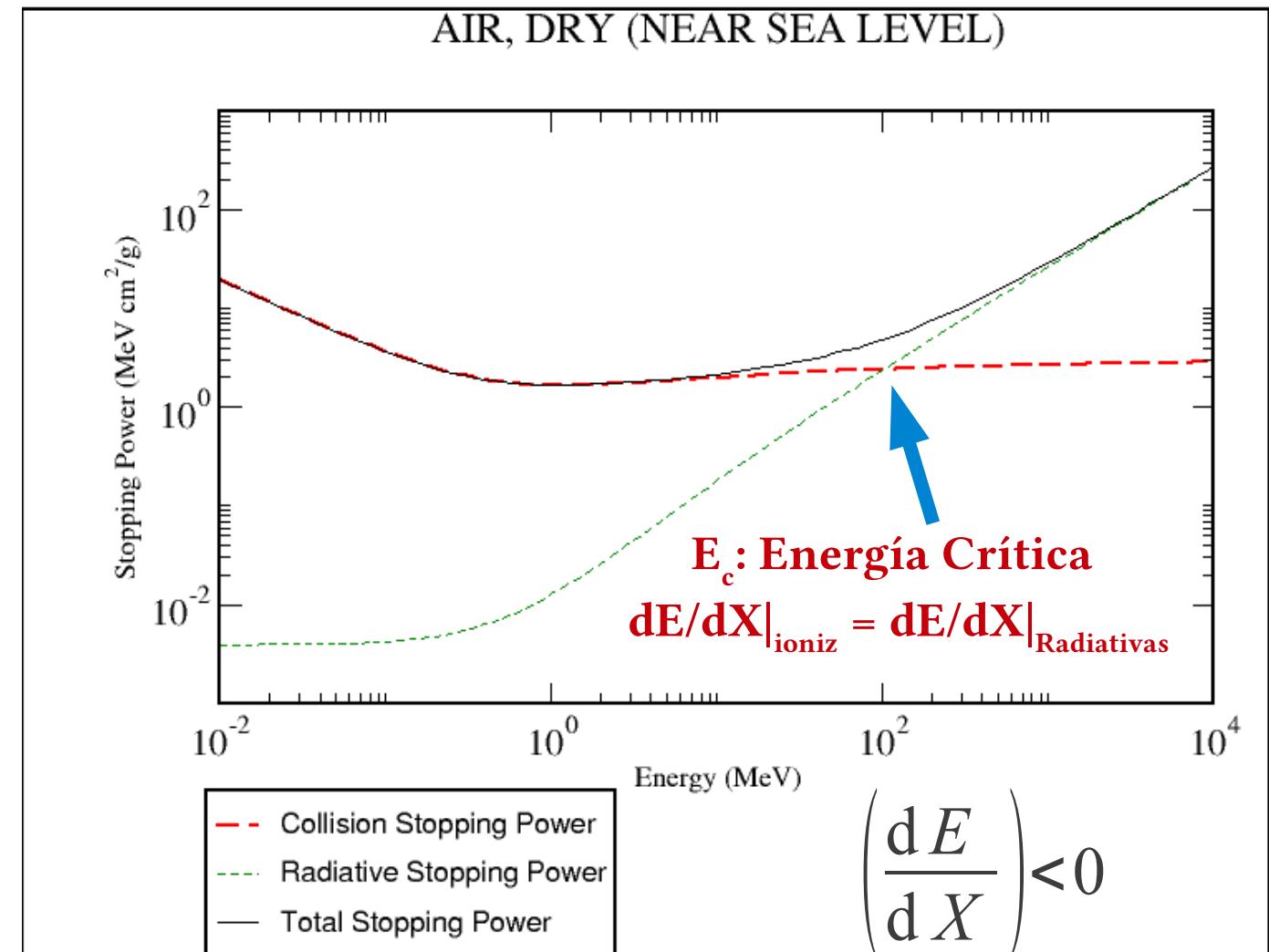
- Bethe-Heitler:



- Domina $N_{\text{máx}} \rightarrow X_{\text{máx}}$

- $E_{\text{EM}} = (80\% - 90\%) E_p$

CHALLENGE ACCEPTED



Si $E > E_c \rightarrow$ Nuevas partículas

Si $E < E_c \rightarrow$ Absorción en la atmósfera

ITeDA 2017

Asorey - AP - UO2

$$E_c^{EM} \approx \frac{710 \text{ MeV}}{Z + 0.92} = 86 \text{ MeV}$$

estar/pstar/astar, NIST (2012)



Longitud de interacción X_{EM}

- A medida que la partícula avanza, pierde energía
 - Ionización → Colisiones
 - Radiativas → Producción de nuevas partículas
- En general, se define:

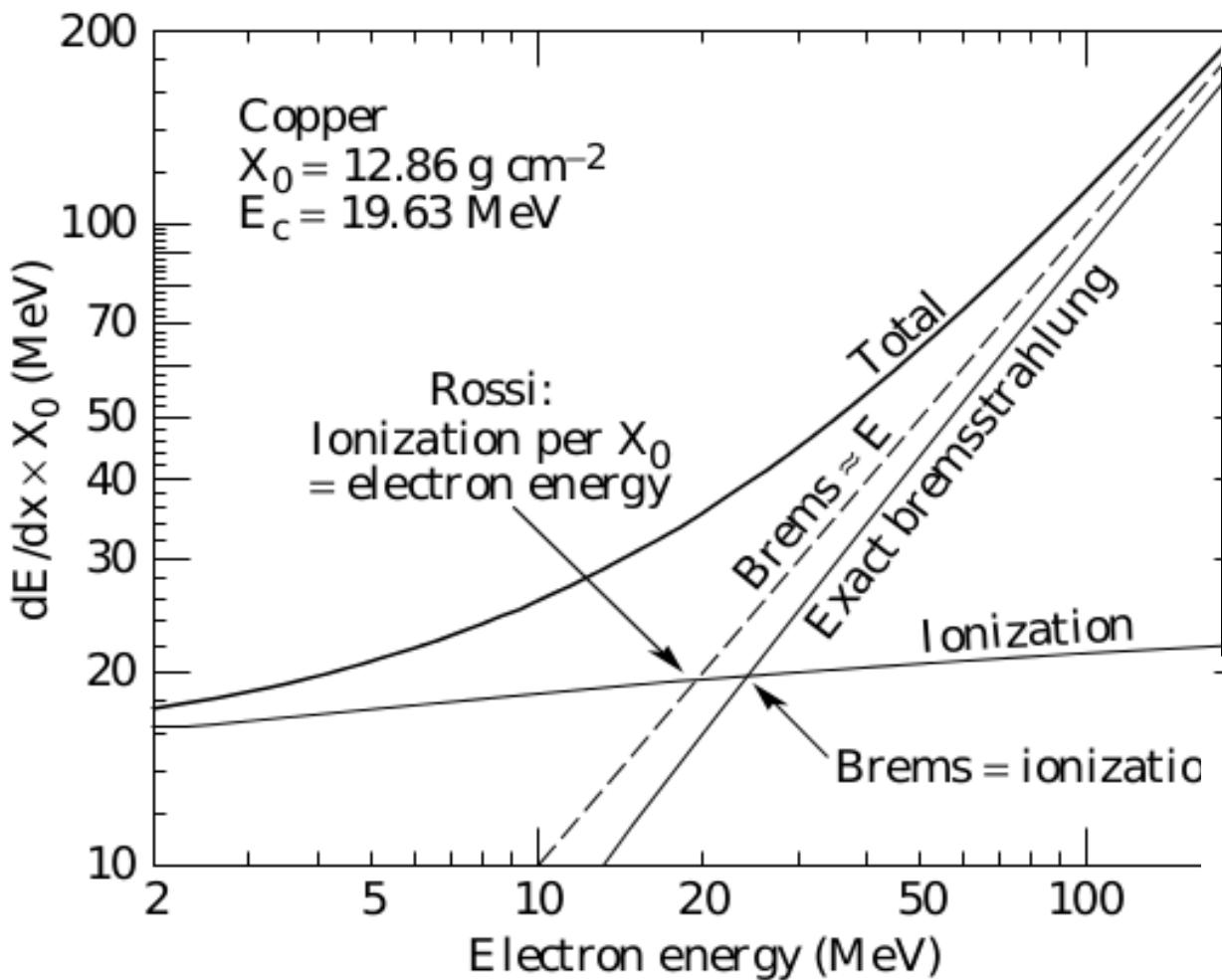
“Longitud interacción de electromagnética X_{EM} ”

- Cantidad de aire atravesada (en g/cm²) cuando un electrón pierde una fracción $1-e^{-1}$ (~63%) de su energía original
- 7/9 del camino libre medio de producción de pares para un fotón

“PDG” → <http://pdg.lbl.gov>

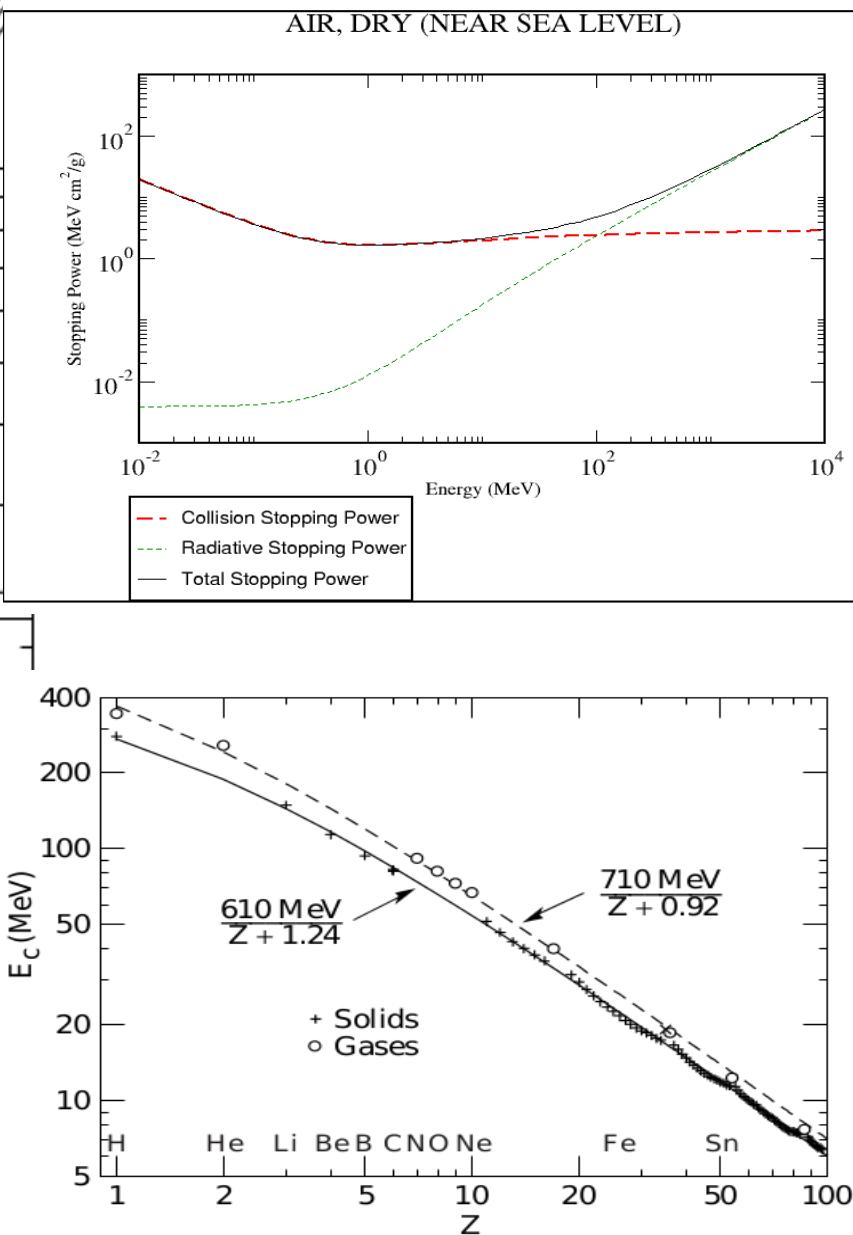
- Energía crítica es la energía a la cuál las pérdidas por ionización luego de recorrer una longitud de interacción son iguales a la energía del electrón
ó
- Energía a la cuál las pérdidas por frenado se igualan a las pérdidas por ionización

Energía crítica para electrones (ver p. ej- RPP-PDG cap 32)



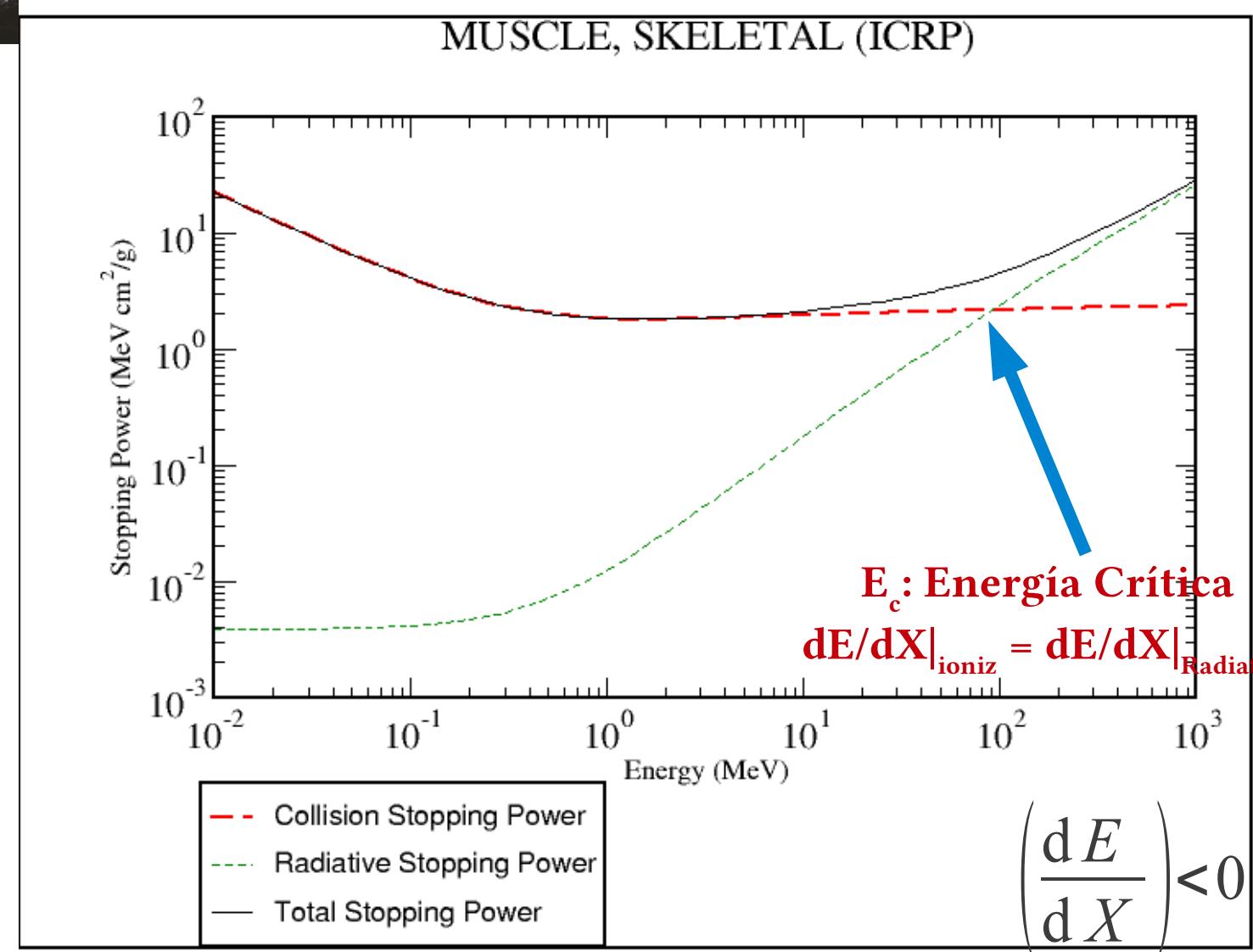
$$E_c^{\text{Sólidos}} = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1.24}$$

$$E_c^{\text{Gases}} = \frac{710 \text{ MeV}}{Z + 0.92}$$



Otros medios

CHALLENGE ACCEPTED



Si $E > E_c \rightarrow$ Nuevas partículas

Si $E < E_c \rightarrow$ Absorción en el medio



The ESTAR program calculates stopping power, density effect parameters, range, and radiation yield tables for electrons in various materials. Select a material and enter the desired energies or use the default energies. Energies are specified in MeV, and must be in the range from 0.001 MeV to 10000 MeV.

[Help](#) [Text version](#) [Material composition data](#)

Select a common material:

Muscle, Skeletal
or enter a [unique material](#)

Graph stopping power:
 Total Stopping Power
 Collision Stopping Power
 Radiative Stopping Power

Graph density effect parameter

Graph CSDA range

Graph radiation yield

No graph

Additional Energies (optional):
Use energies from a file*
 No file chosen

or

Use energies entered below (one per line)

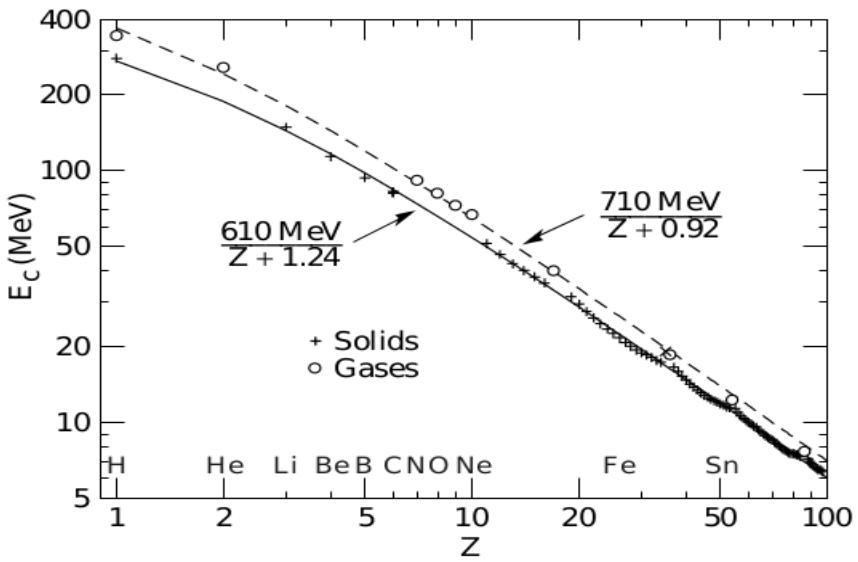
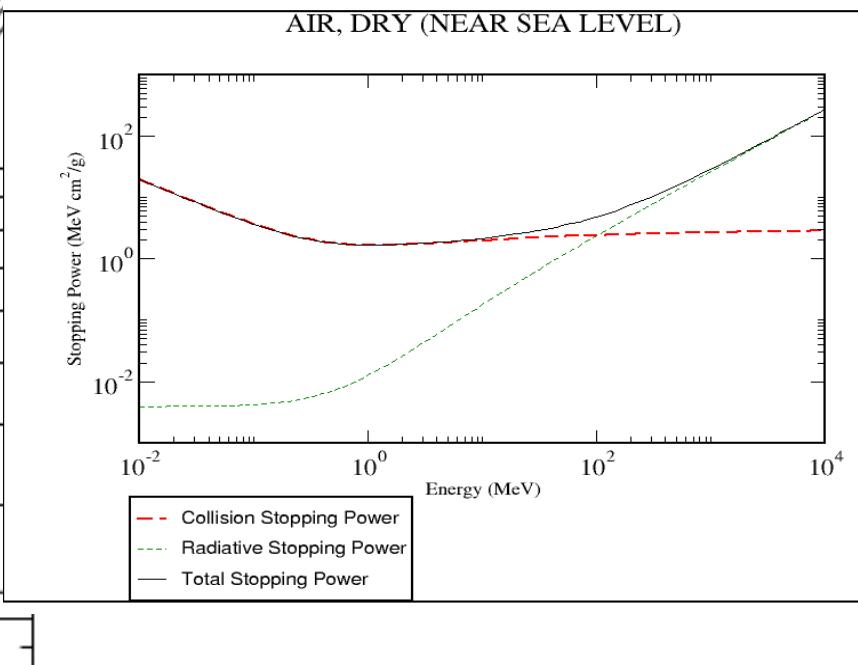
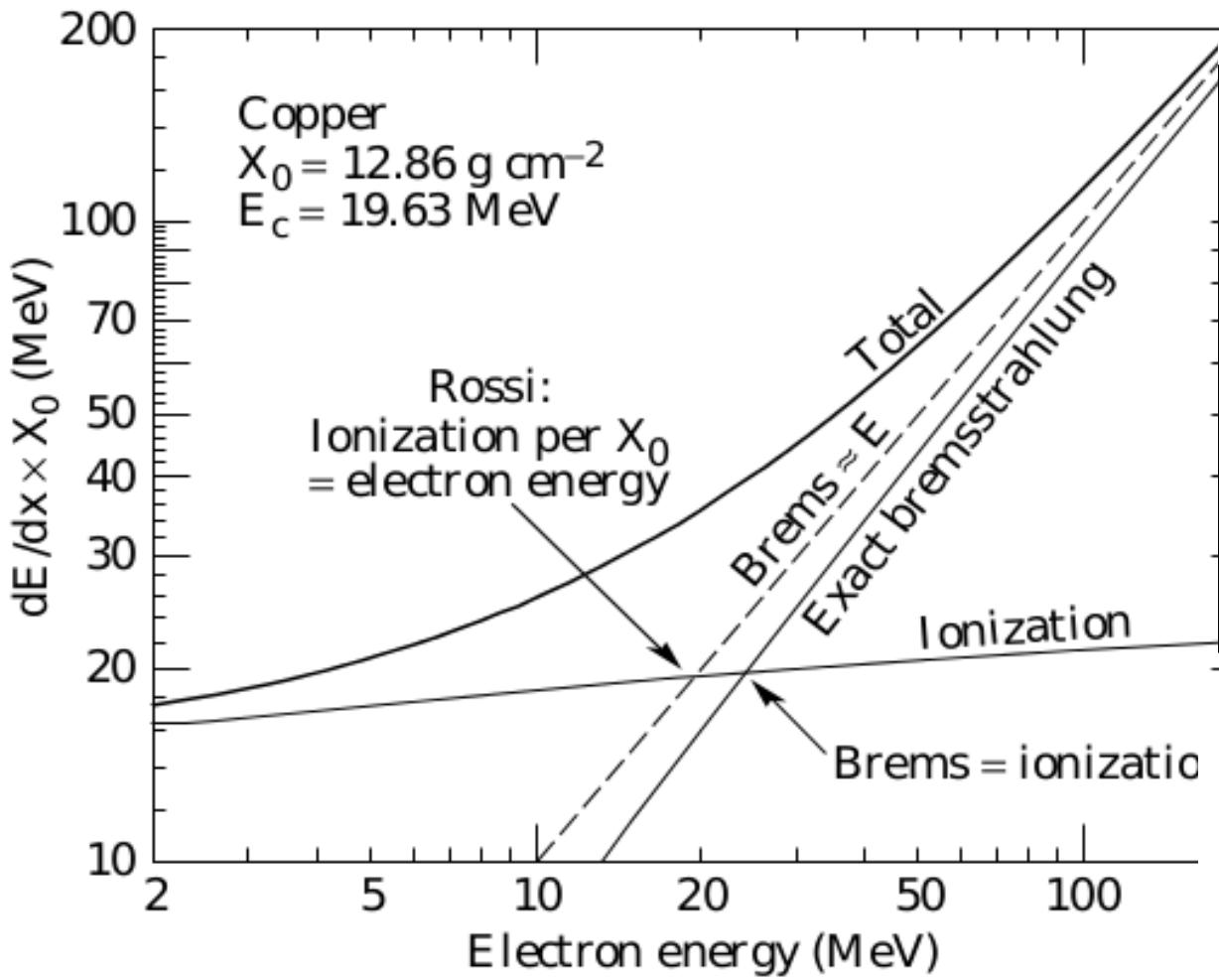
Include default energies

Note: Only stopping powers and the density effect parameter will be calculated if additional energies are used.

* Your browser must be file-upload compatible.

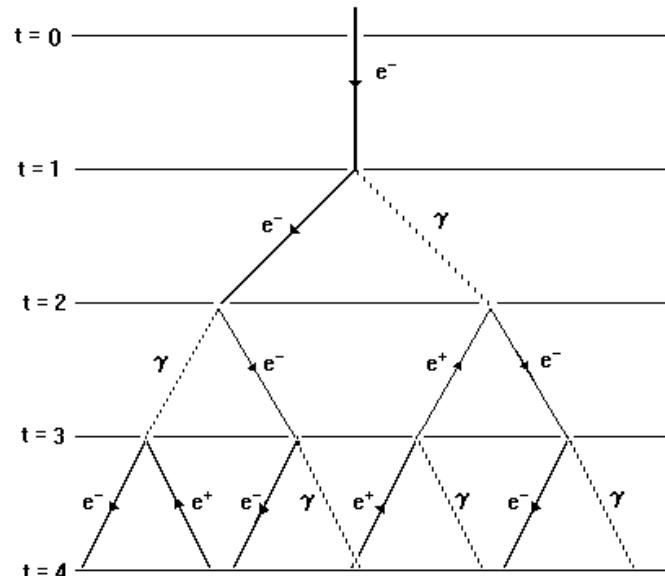
<https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>

Energía crítica para electrones



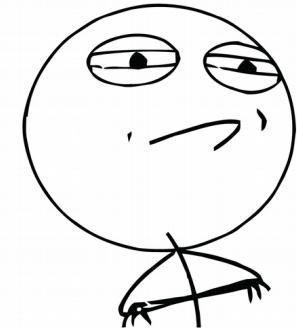
Modelo ultra-simplificado

- 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:



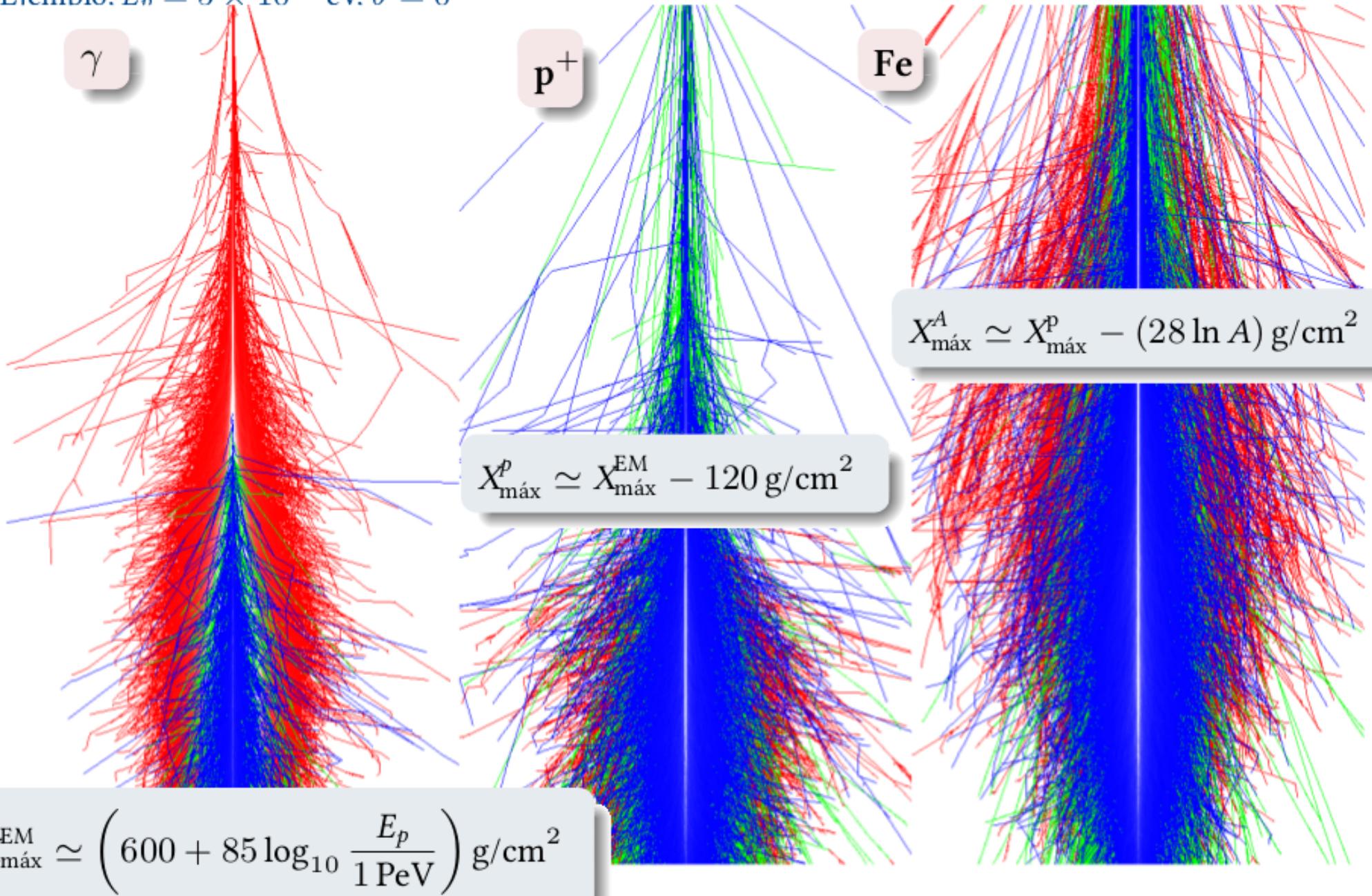
$$N_{\max} \sim \frac{E_p}{E_c}$$
$$X_{\max} \sim \log\left(\frac{E_p}{E_c}\right)$$

CHALLENGE ACCEPTED



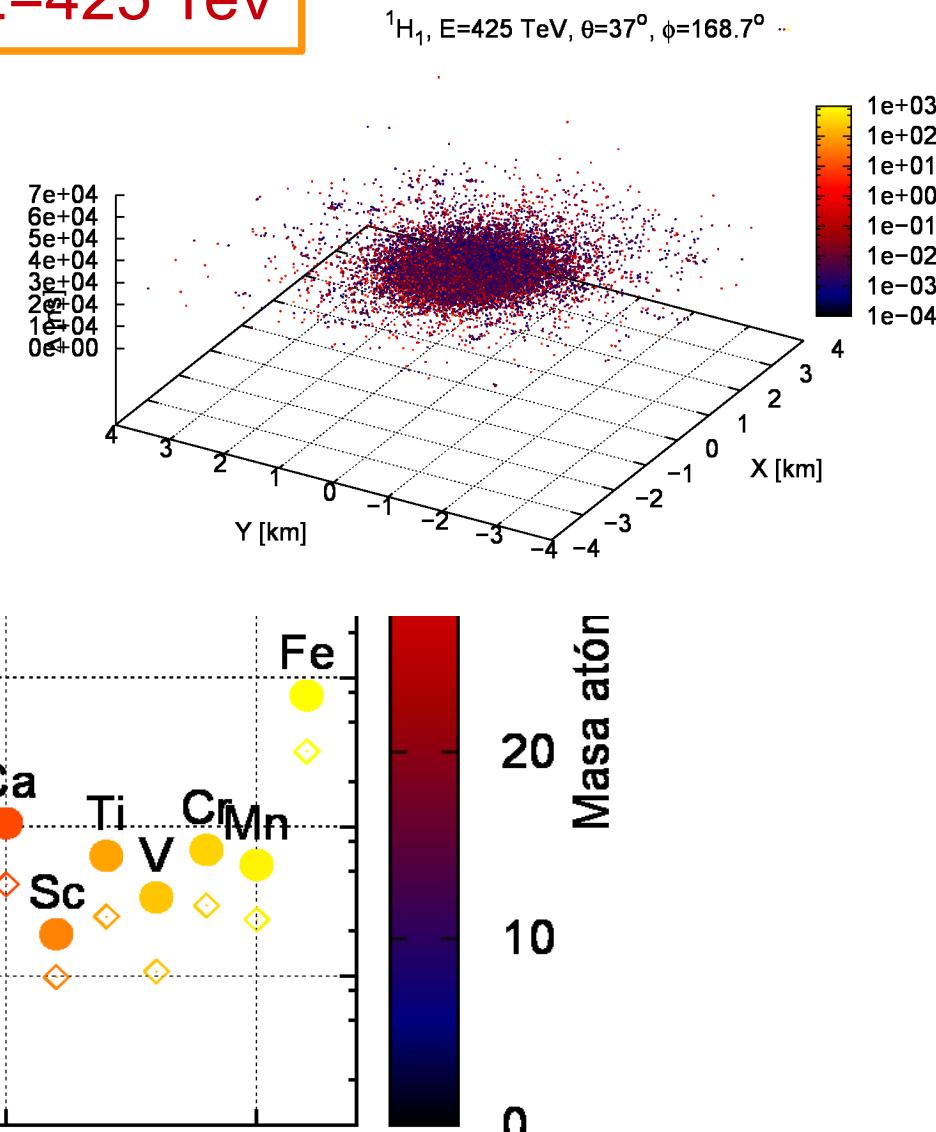
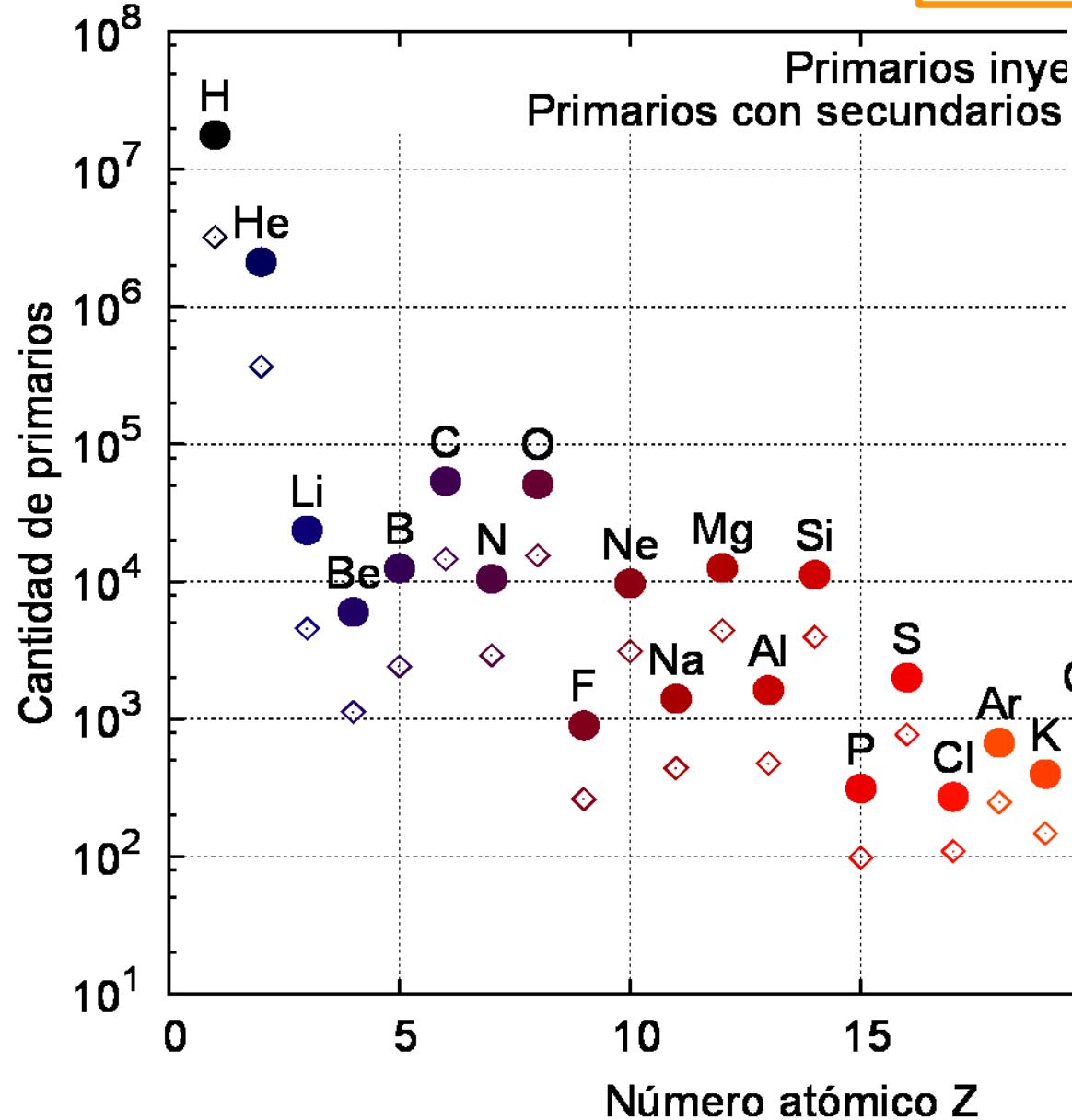
Cascadas atmosféricas

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

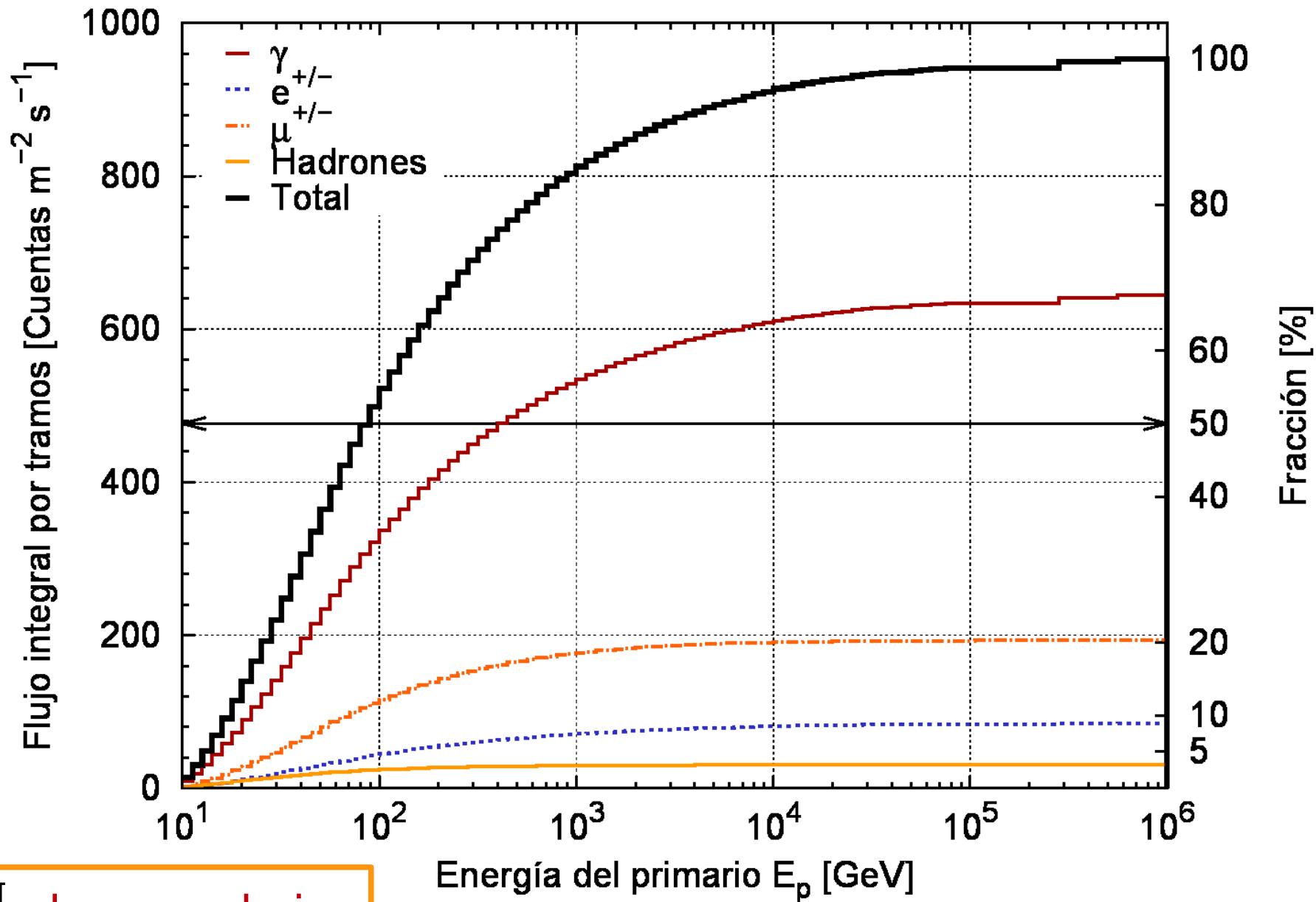


Primarios y secundarios

${}^1\text{H}_1$, E=425 TeV

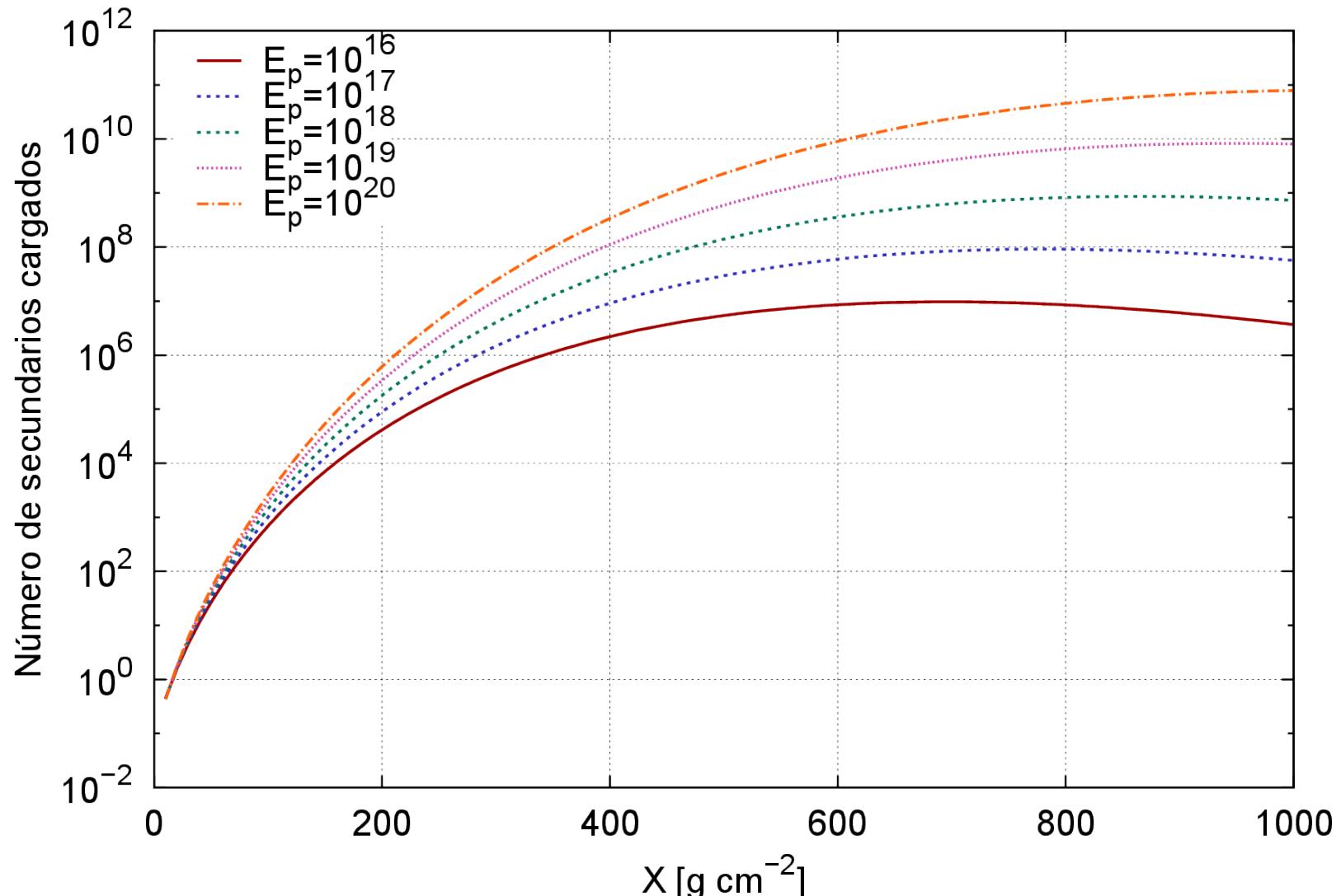


Primarios y secundarios

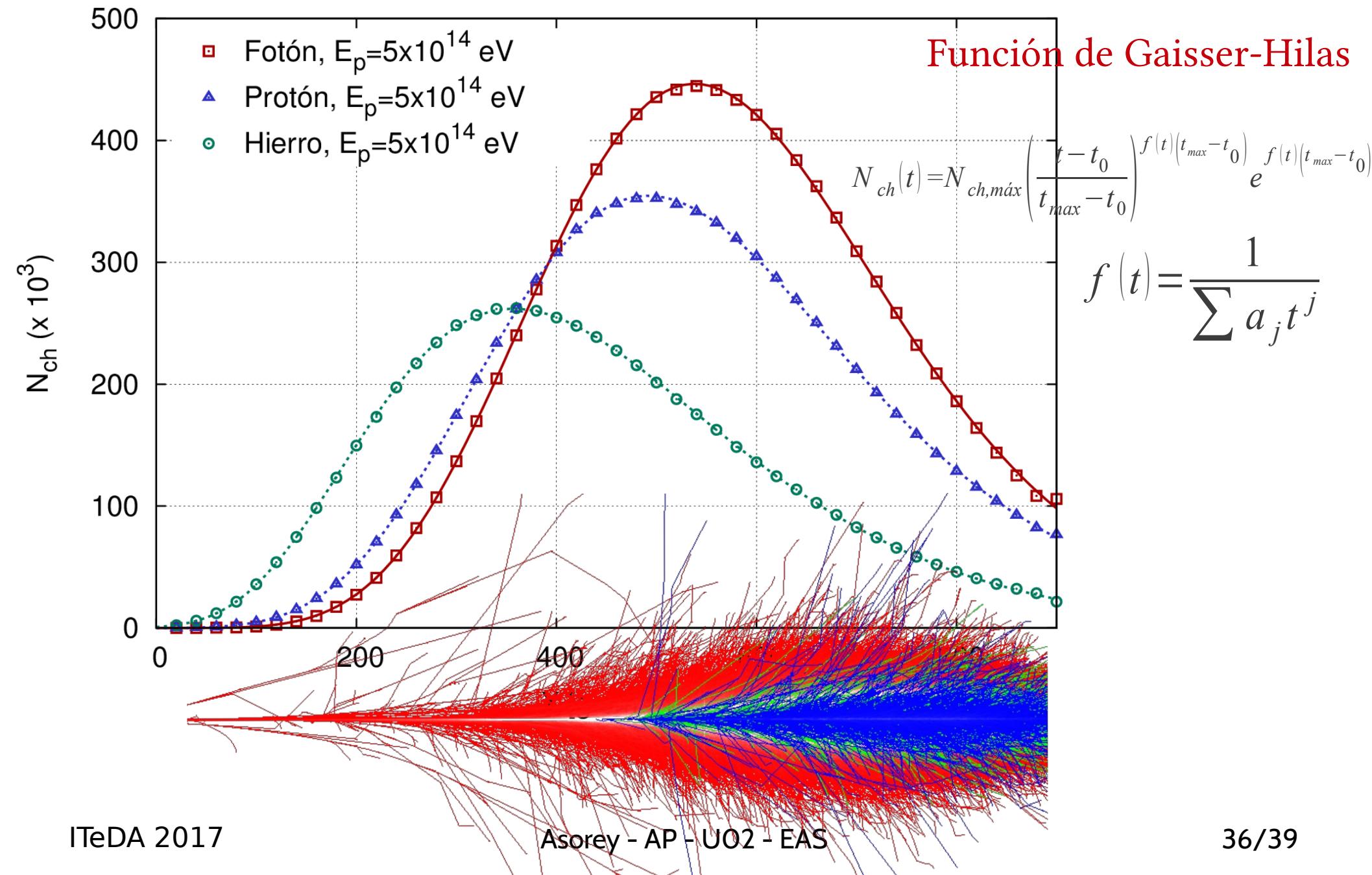


Flujo de secundarios

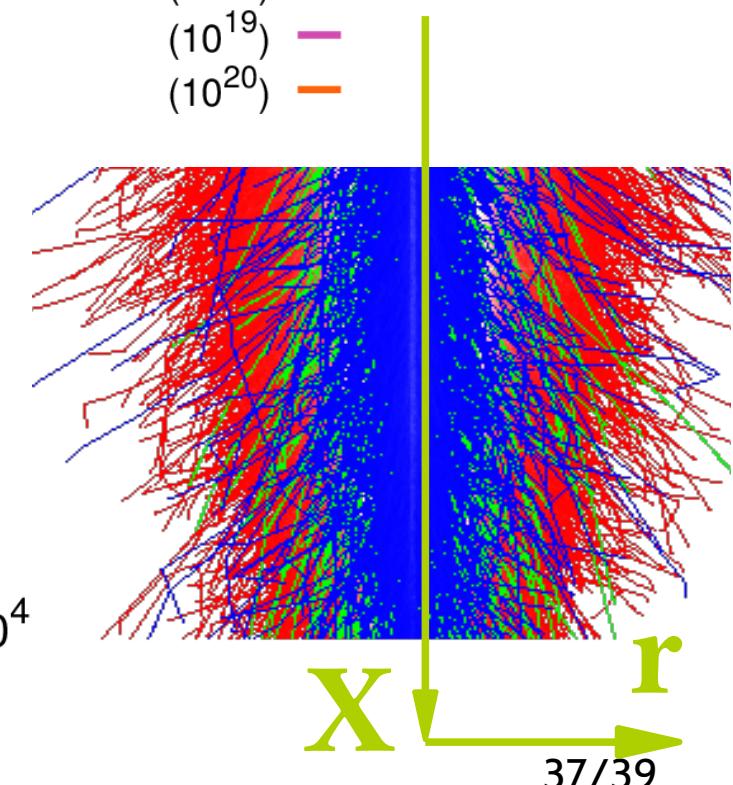
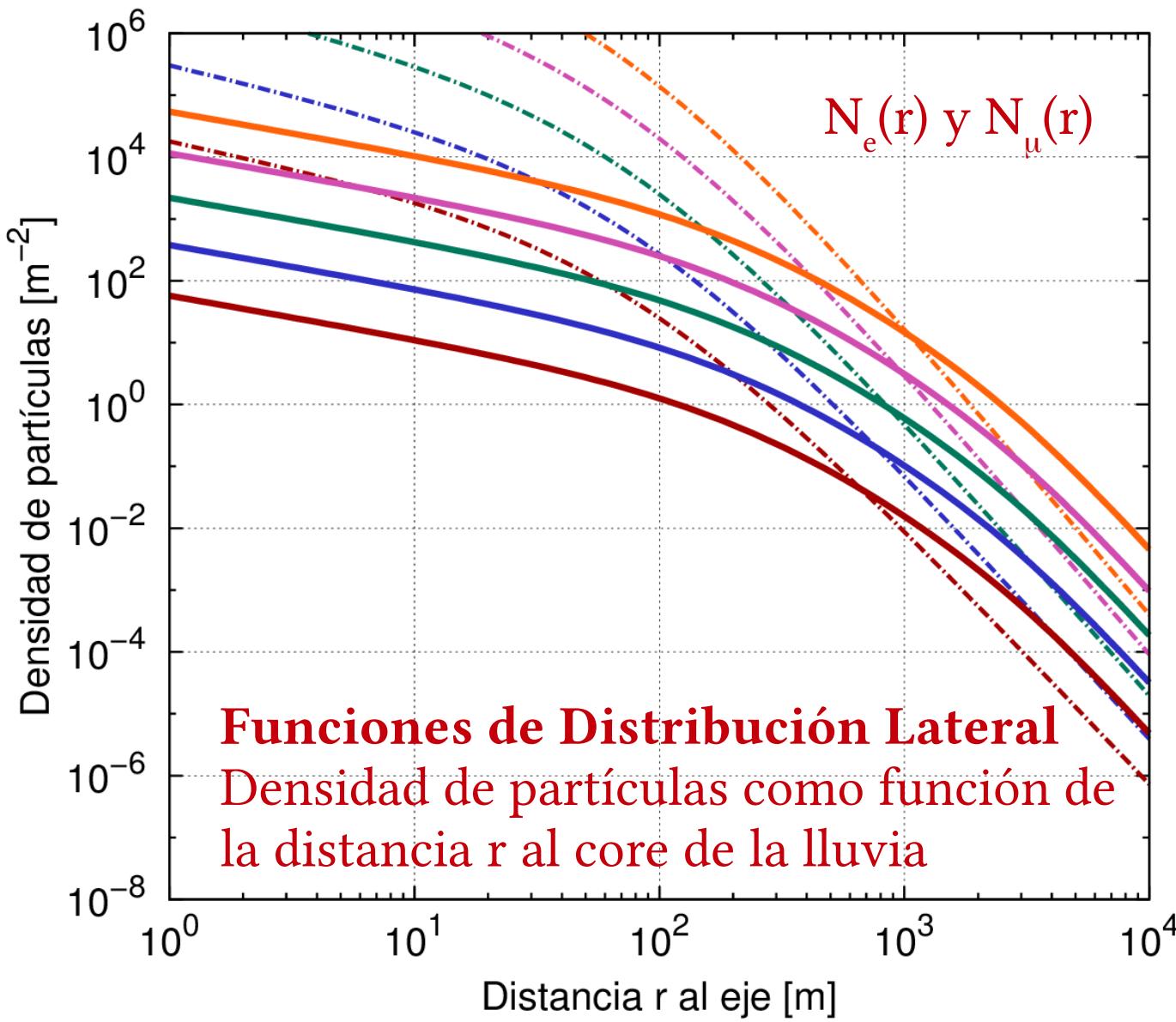
Número de partículas cargadas (EM)



Desarrollo longitudinal ($t=X/X_{EM}$)



LDF: Desarrollo transversal

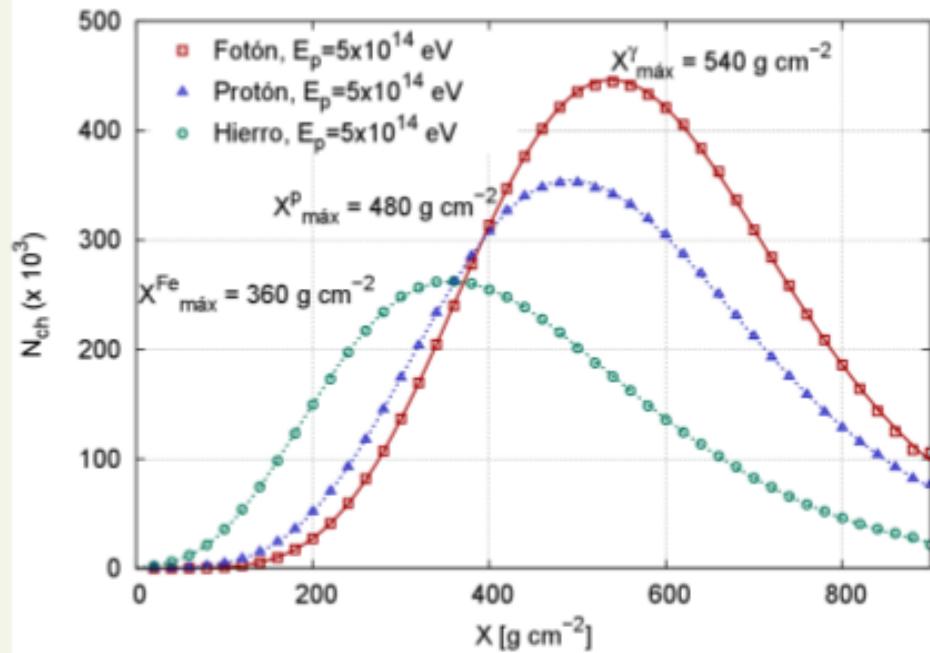


$$E_d^{\text{atm}} + E_d^{\text{suelo}} = E_p$$

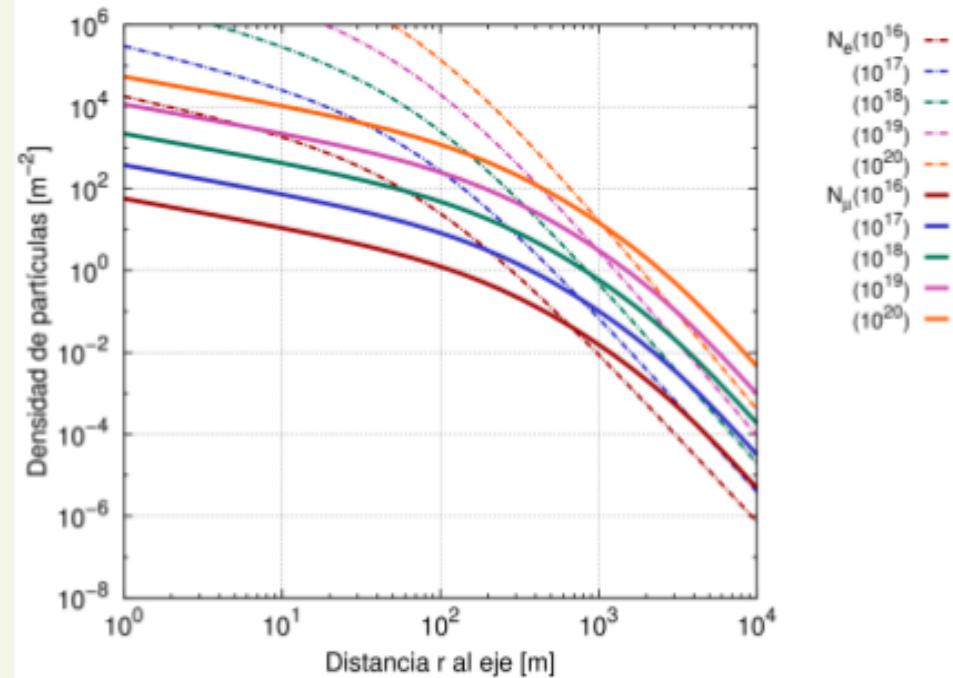
Desarrollo Longitudinal y Transversal

La energía se conserva

$E_d^{\text{atm}} \rightarrow$ Gaisser-Hillas

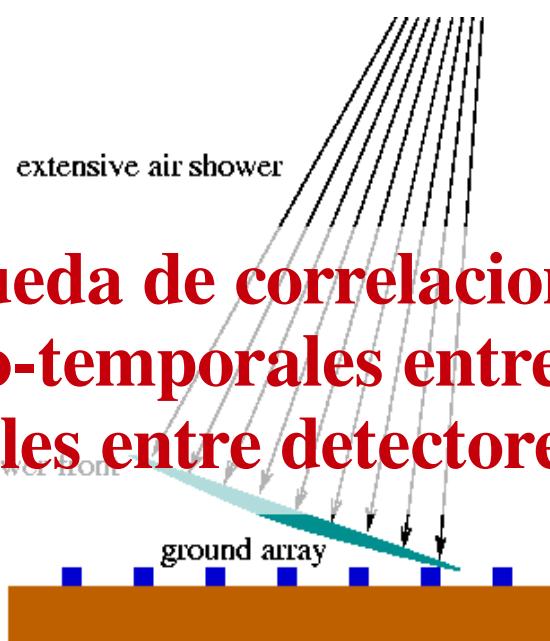


$E_d^{\text{suelo}} \rightarrow$ LDF: $\rho_e(r)$ y $\rho_{\mu}(r)$



- Desarrollo longitudinal
- Desarrollo transversal
- $N_c h(X) \propto E_d(X)$
- Función Distribución Lateral
- $\rho(r) = \sum_{\mu, e, \gamma, \text{hd}} \rho_i(r) \xrightarrow{\text{Detector}} S_m(r)$

Técnicas de detección en Superficie



**Búsqueda de correlaciones
espacio-temporales entre las
señales entre detectores**



**Cálculo del flujo de
secundarios y estudio de las
variaciones intrínsecas**

- Detectores de partículas (WCD y/o centelladores)
- Detección de señales por encima de umbrales
- Intensivo análisis de datos