

- **Unidad**      02 – Lluvias atmosféricas extendidas
- **Clase**        U02
- **Cont**         EAS
- **Cátedra**     Asorey
- **Web**

<https://gitlab.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>

**Astrofísica  
Relativista**

**Propagación  
intergaláctica**

**Transporte  
Heliosférico**

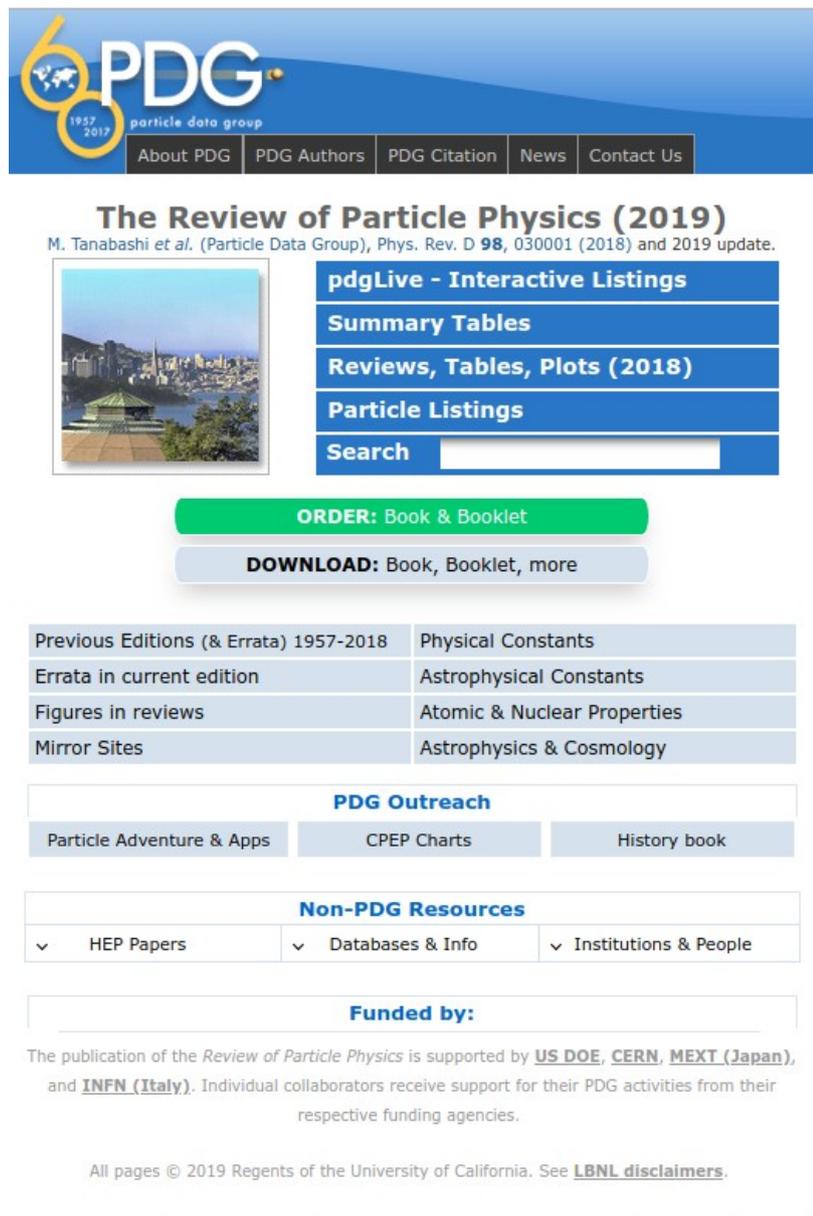
**Análisis de datos complejos**

**Física  
Atmosférica**

**Física de  
detectores**

**Física de  
Partículas**

# PDG: particle data group



The screenshot shows the PDG website interface. At the top is the PDG logo with the text '1957 2017 particle data group' and a navigation menu with 'About PDG', 'PDG Authors', 'PDG Citation', 'News', and 'Contact Us'. The main heading is 'The Review of Particle Physics (2019)' by M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 98, 030001 (2018) and 2019 update. Below this is a navigation menu with 'pdgLive - Interactive Listings', 'Summary Tables', 'Reviews, Tables, Plots (2018)', 'Particle Listings', and a search bar. There are two buttons: 'ORDER: Book & Booklet' (green) and 'DOWNLOAD: Book, Booklet, more' (grey). A table lists links for 'Previous Editions (& Errata) 1957-2018', 'Errata in current edition', 'Figures in reviews', and 'Mirror Sites'. Below that is a 'PDG Outreach' section with 'Particle Adventure & Apps', 'CPEP Charts', and 'History book'. A 'Non-PDG Resources' section has dropdown menus for 'HEP Papers', 'Databases & Info', and 'Institutions & People'. A 'Funded by:' section lists 'US DOE, CERN, MEXT (Japan), and INFN (Italy)'. At the bottom, it says 'All pages © 2019 Regents of the University of California. See LBNL disclaimers.'

**The Review of Particle Physics (2019)**  
M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018) and 2019 update.

**pdgLive - Interactive Listings**  
Summary Tables  
Reviews, Tables, Plots (2018)  
Particle Listings  
Search

**ORDER: Book & Booklet**  
**DOWNLOAD: Book, Booklet, more**

Previous Editions (& Errata) 1957-2018	Physical Constants
Errata in current edition	Astrophysical Constants
Figures in reviews	Atomic & Nuclear Properties
Mirror Sites	Astrophysics & Cosmology

**PDG Outreach**  
Particle Adventure & Apps    CPEP Charts    History book

**Non-PDG Resources**  
▼ HEP Papers    ▼ Databases & Info    ▼ Institutions & People

**Funded by:**  
The publication of the *Review of Particle Physics* is supported by [US DOE](#), [CERN](#), [MEXT \(Japan\)](#), and [INFN \(Italy\)](#). Individual collaborators receive support for their PDG activities from their respective funding agencies.

All pages © 2019 Regents of the University of California. See [LBNL disclaimers](#).

- The review of particle physics  
→ <http://pdg.lbl.gov/>
- Agréguelo ya mismo a su colección de bookmarks útiles
- App desactualizada 2008
- Booklet y libro completo disponibles en “Materiales/referencias”

# Poder de frenado

ver p. ej., Knoll Cap 2, PDG Cap 33

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

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

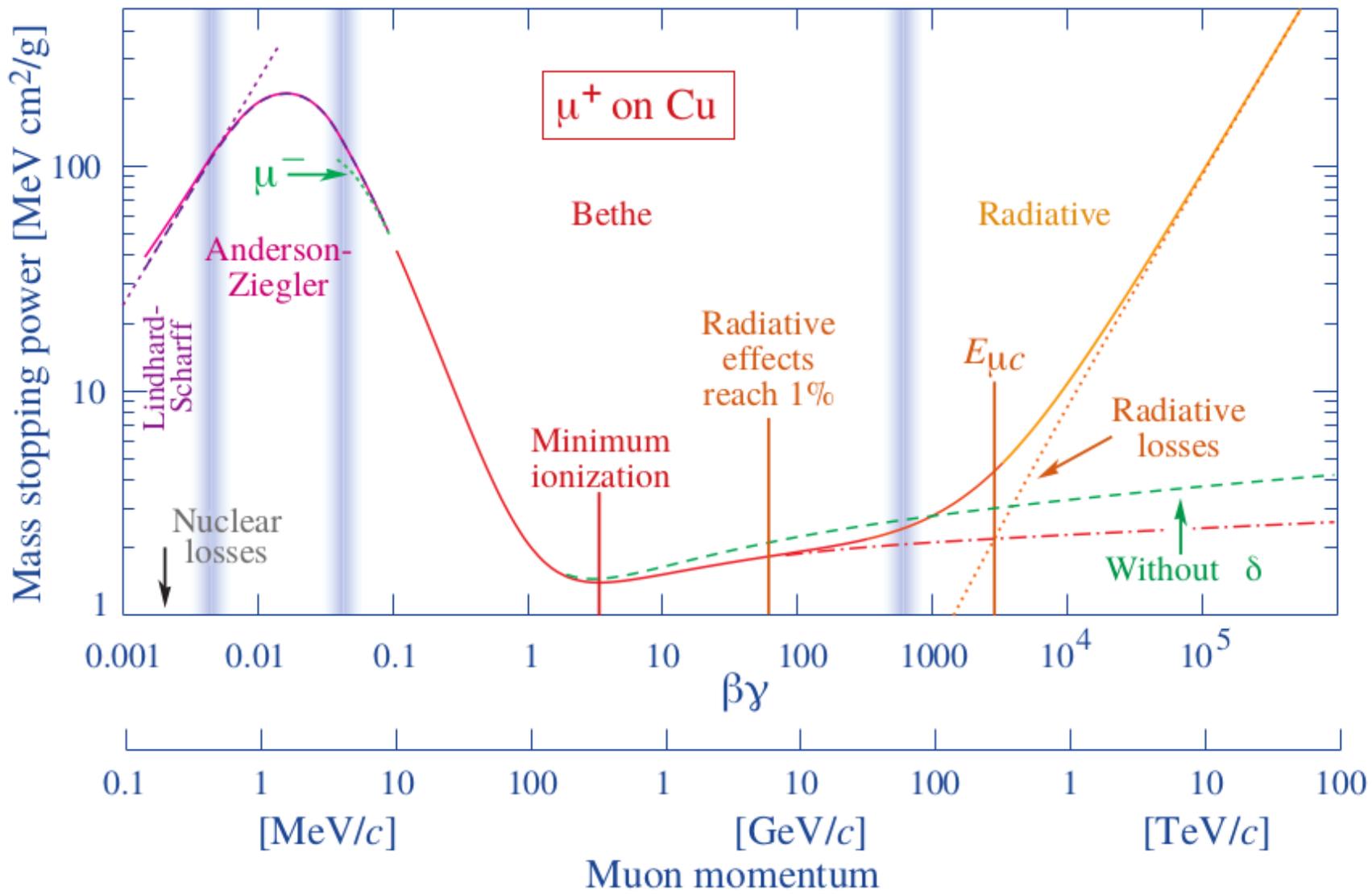
- **X: Mass stopping power (poder de frenado másico)**

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

$$S_X(E) = -\frac{dE}{dL}$$

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

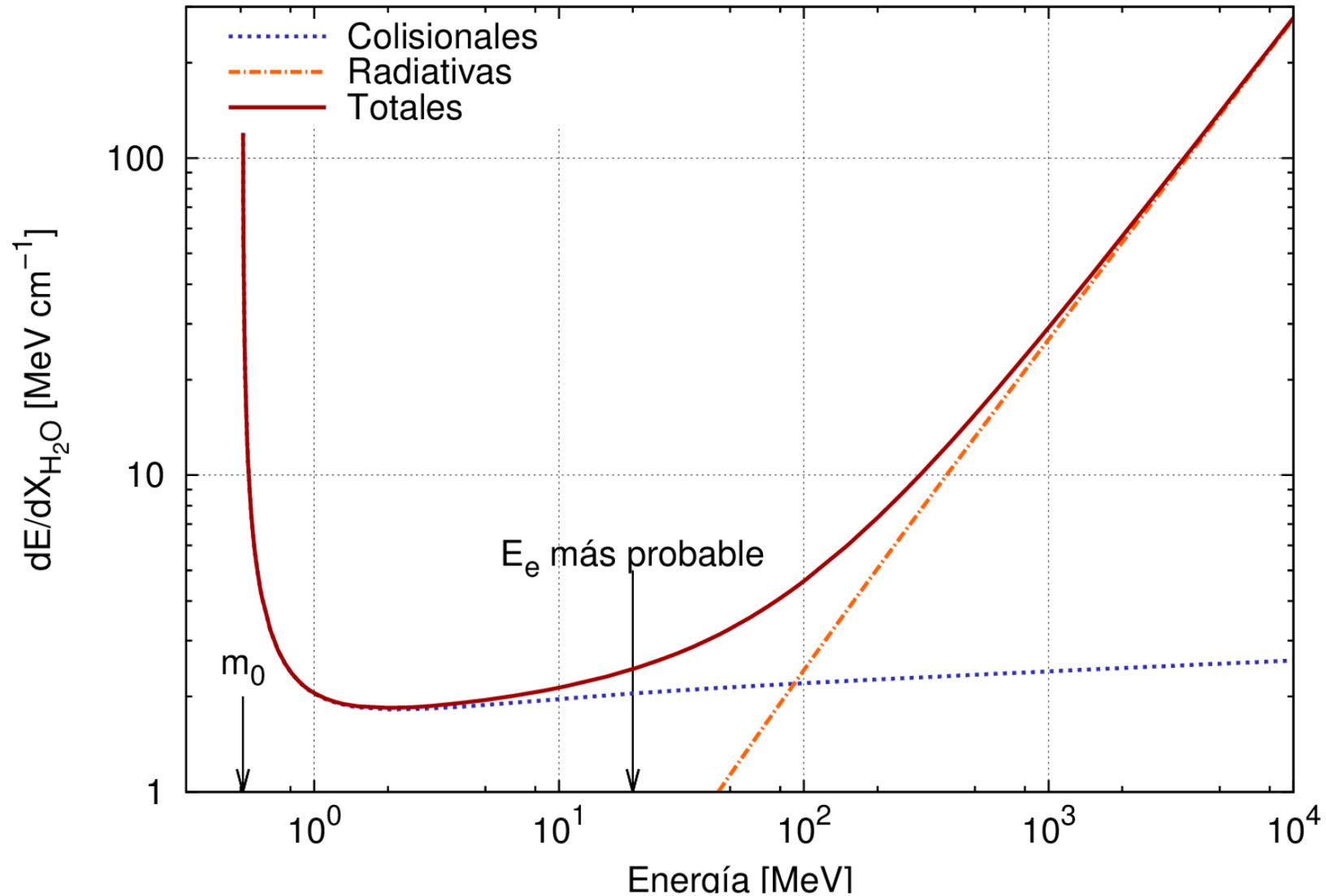
$$R(E) = \int_{E_0}^0 S(E)^{-1} dE$$



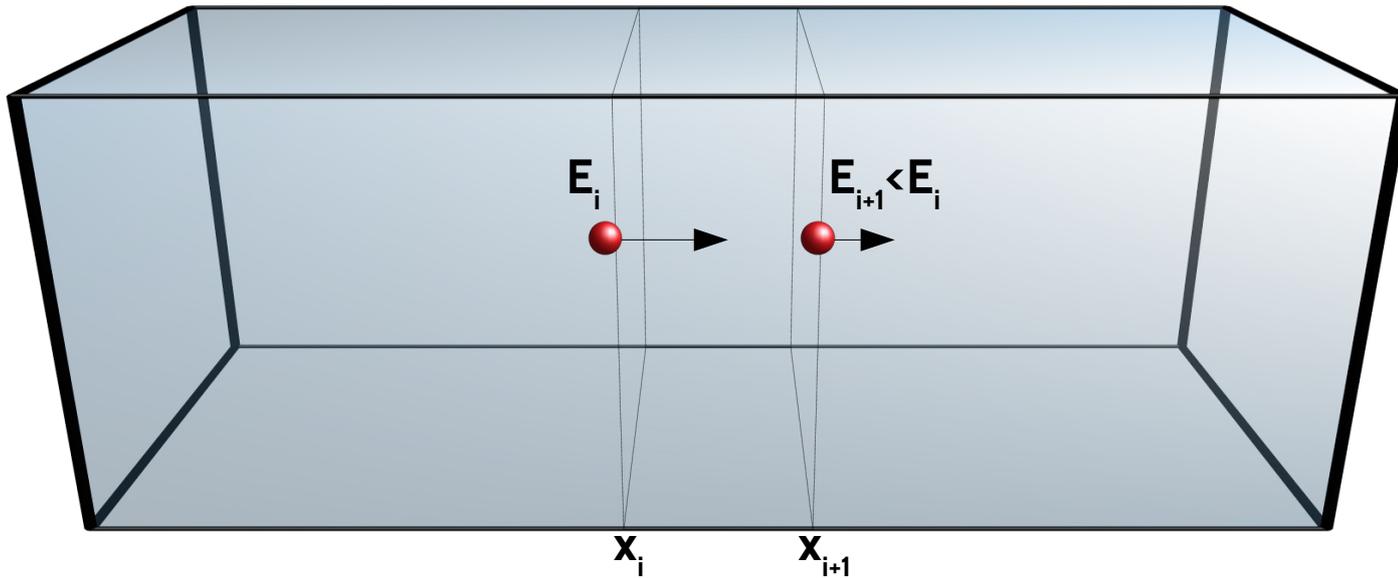
**Fig. 33.1:** Mass stopping power ( $= \langle -dE/dx \rangle$ ) for positive muons in copper as a function of  $\beta\gamma = p/Mc$  over nine orders of magnitude in momentum (12 orders of magnitude in kinetic energy). Solid curves indicate the total stopping power. Data below the break at  $\beta\gamma \approx 0.1$  are taken from ICRU 49 [4], and data at higher energies are from Ref. 5. Vertical bands indicate boundaries between different approximations discussed in the text. The short dotted lines labeled “ $\mu^-$ ” illustrate the “Barkas effect,” the dependence of stopping power on projectile charge at very low energies [6].  $dE/dx$  in the radiative region is not simply a function of  $\beta$ .

# dE/dX electrones en agua

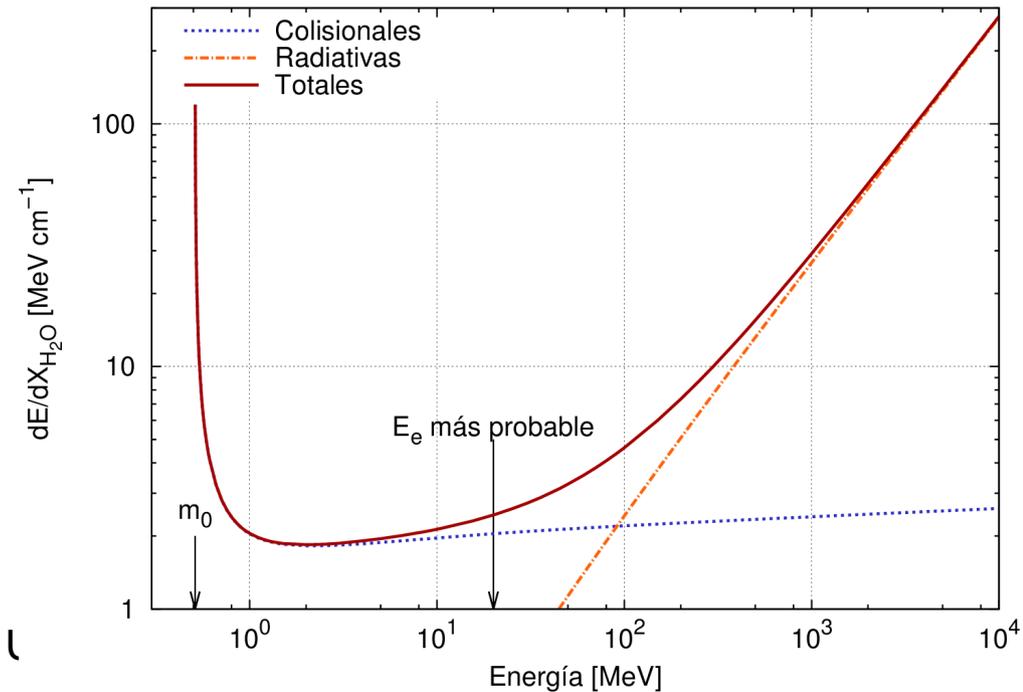
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>



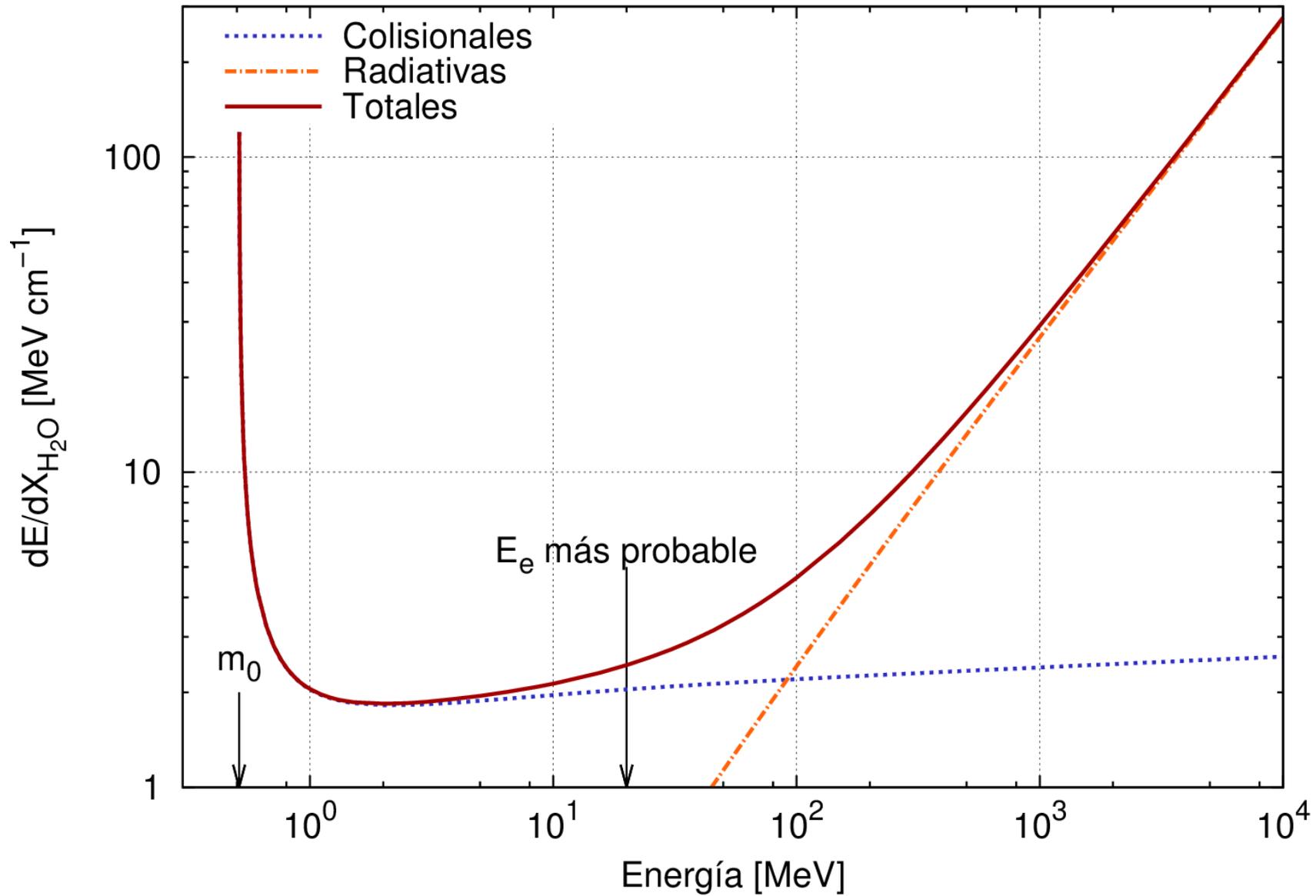
# C.S.D.A. range



$x_0 = 0; L = 0; E = E_0;$   
 while ( $E_{i+1} > 0$ ) {  
      $\Delta l = (x_{i+1} - x_i)$   
      $E_{i+1} = E_i - S(E_i) \Delta l$   
      $L += \Delta l$   
      $i ++$   
 }

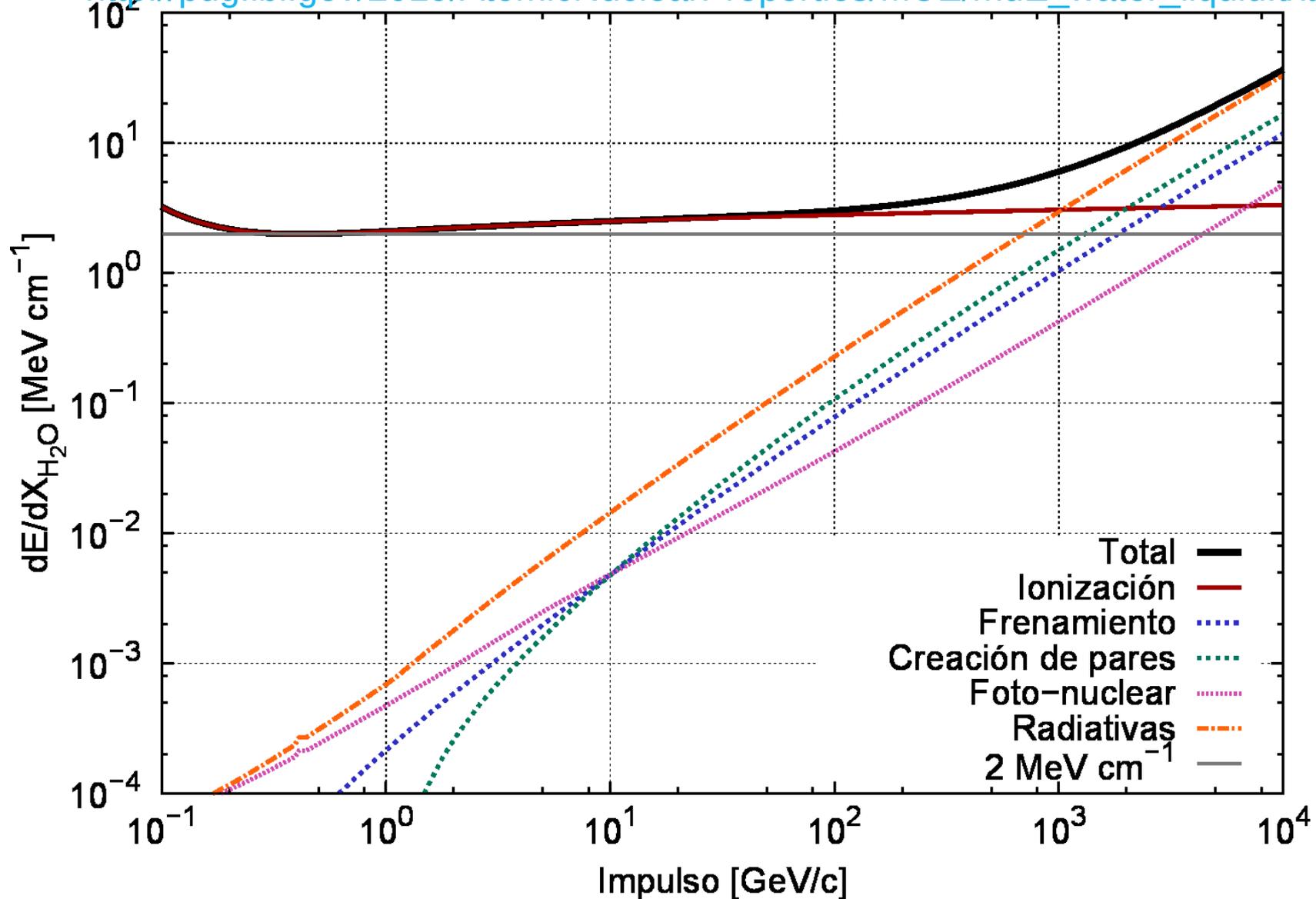


# dE/dX electrones en agua



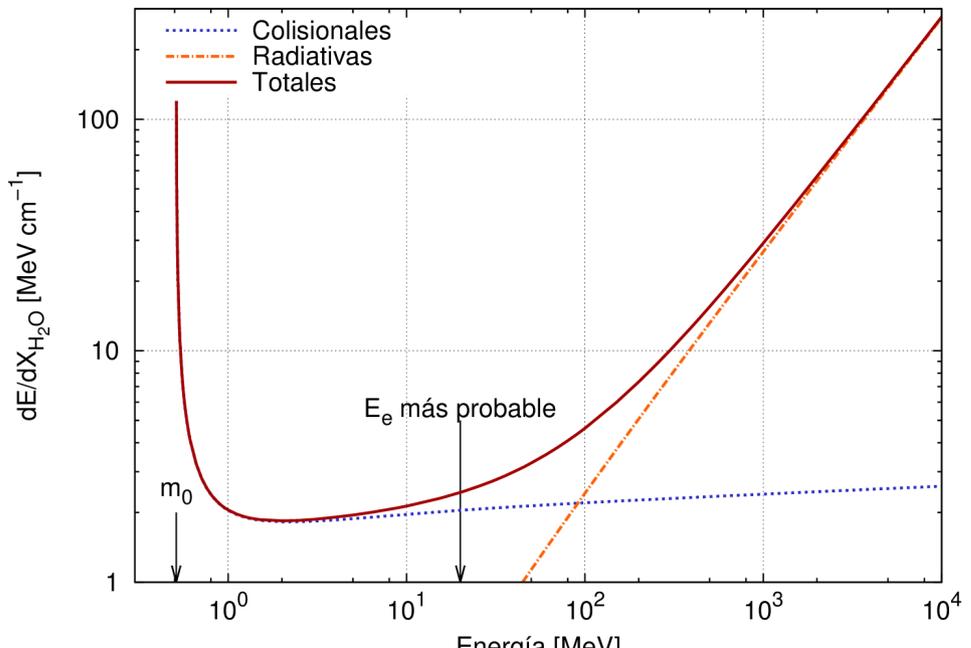
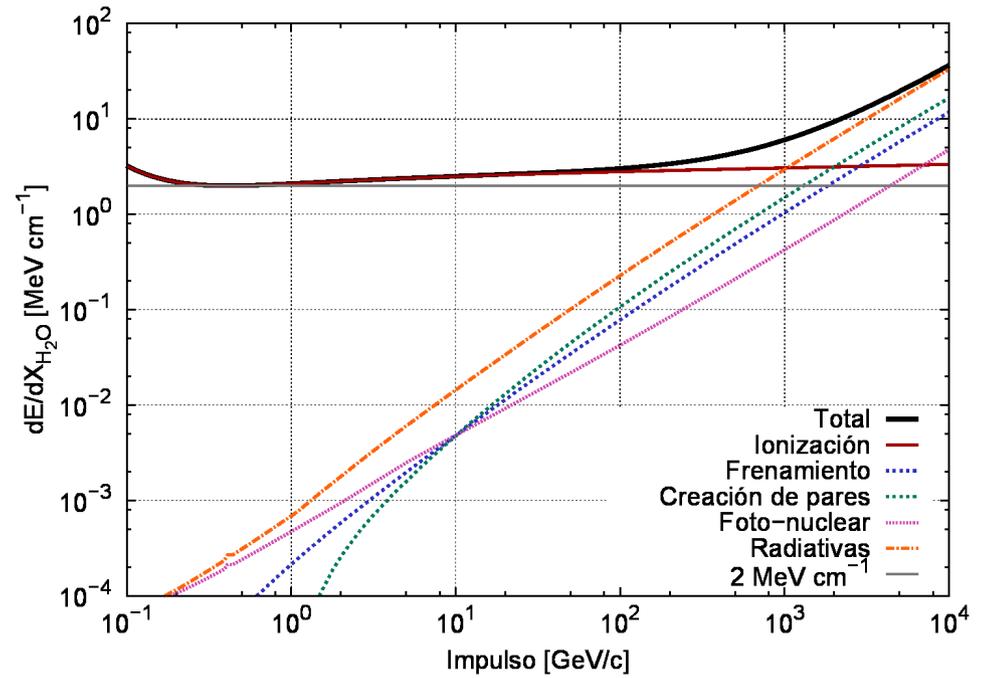
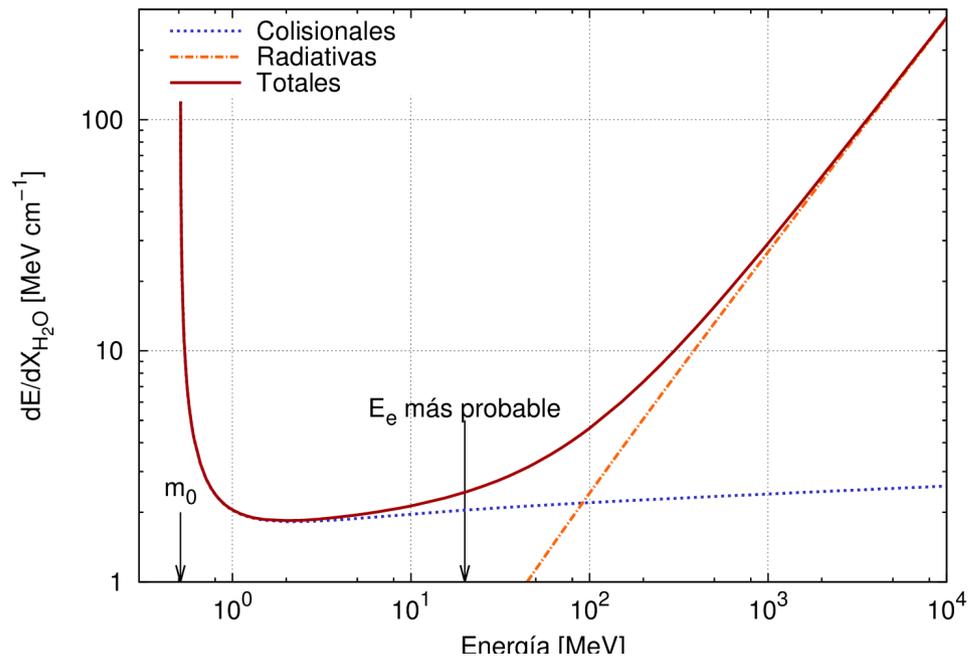
# dE/dX muones en agua

[http://pdg.lbl.gov/2019/AtomicNuclearProperties/MUE/muE\\_water\\_liquid.txt](http://pdg.lbl.gov/2019/AtomicNuclearProperties/MUE/muE_water_liquid.txt)

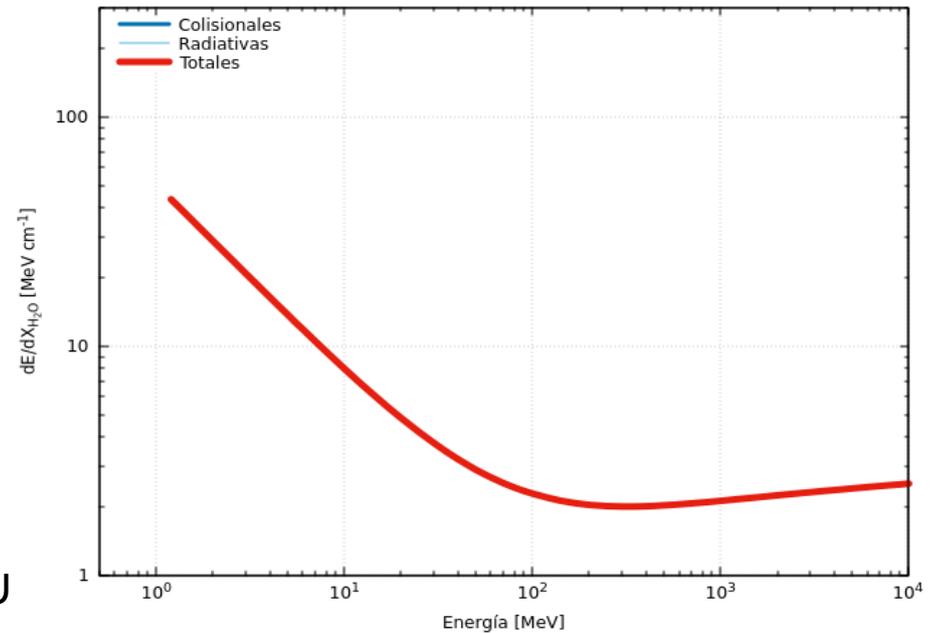


# dE/dX en agua

## electrones vs muones



β - U



# 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 $X_{EM}$ ”

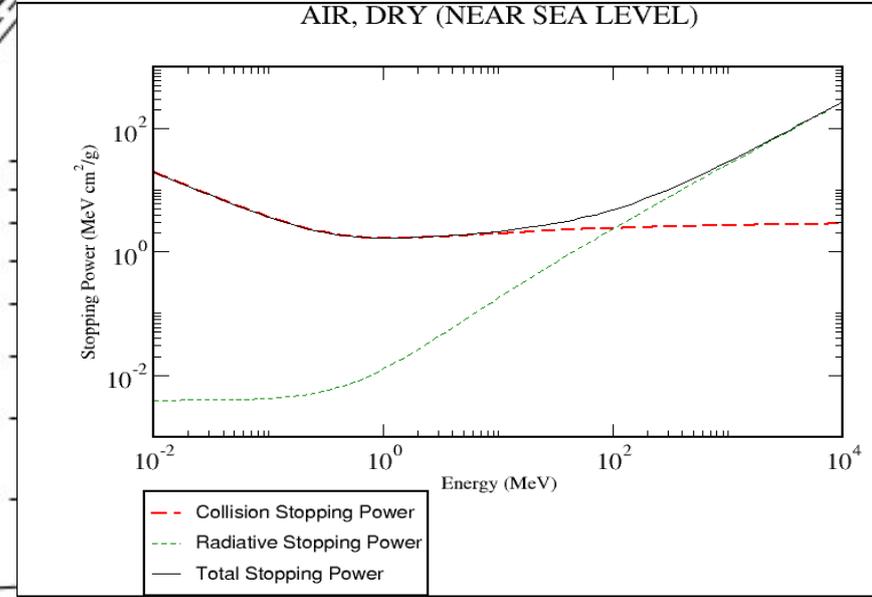
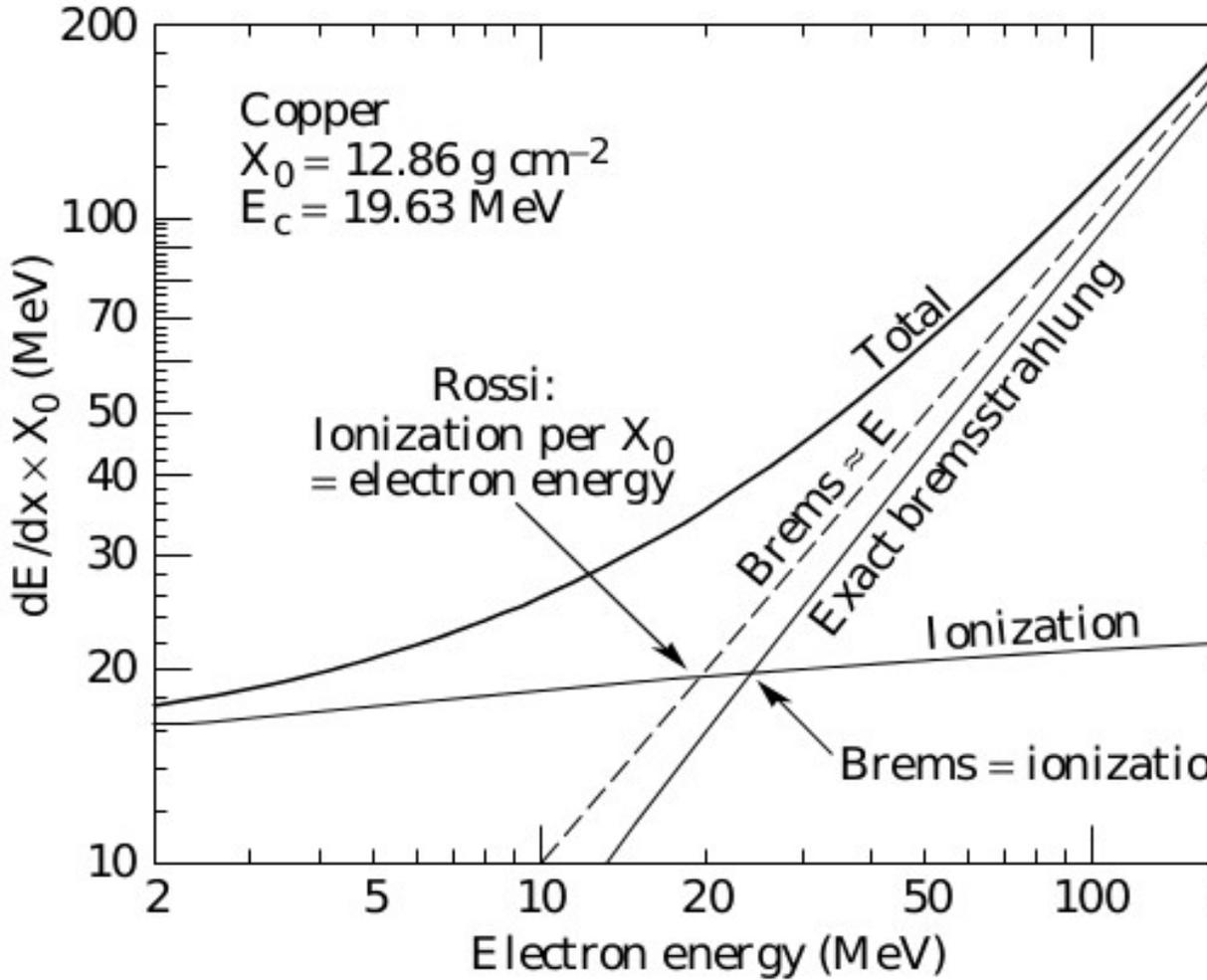
- Cantidad de masa atravesada (en g/cm<sup>2</sup>) cuando un electrón pierde una fracción 1/e (~37%) de su energía original por frenado
- 7/9 del camino libre medio de producción de pares para un fotón (Heitler, 1958)
- Al 2.5% se puede calcular con:

$$X_{EM} = 716,4 \frac{A}{Z(Z+1) \ln\left(\frac{287}{\sqrt{Z}}\right)} \text{ g cm}^{-2}.$$

$$\text{En aire, } X_{EM} = 37.1 \text{ g cm}^{-2}$$

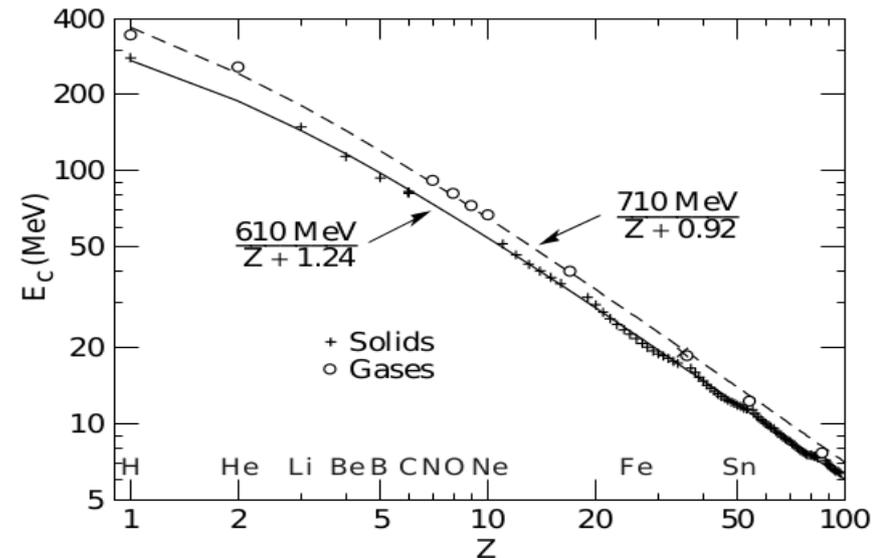
- Energía crítica es la energía a la cuál las pérdidas por ionización luego de recorrer una longitud de interacción son iguales a la energía del electrón  
ó
- Energía a la cuál las pérdidas por frenado se igualan a las pérdidas por ionización

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

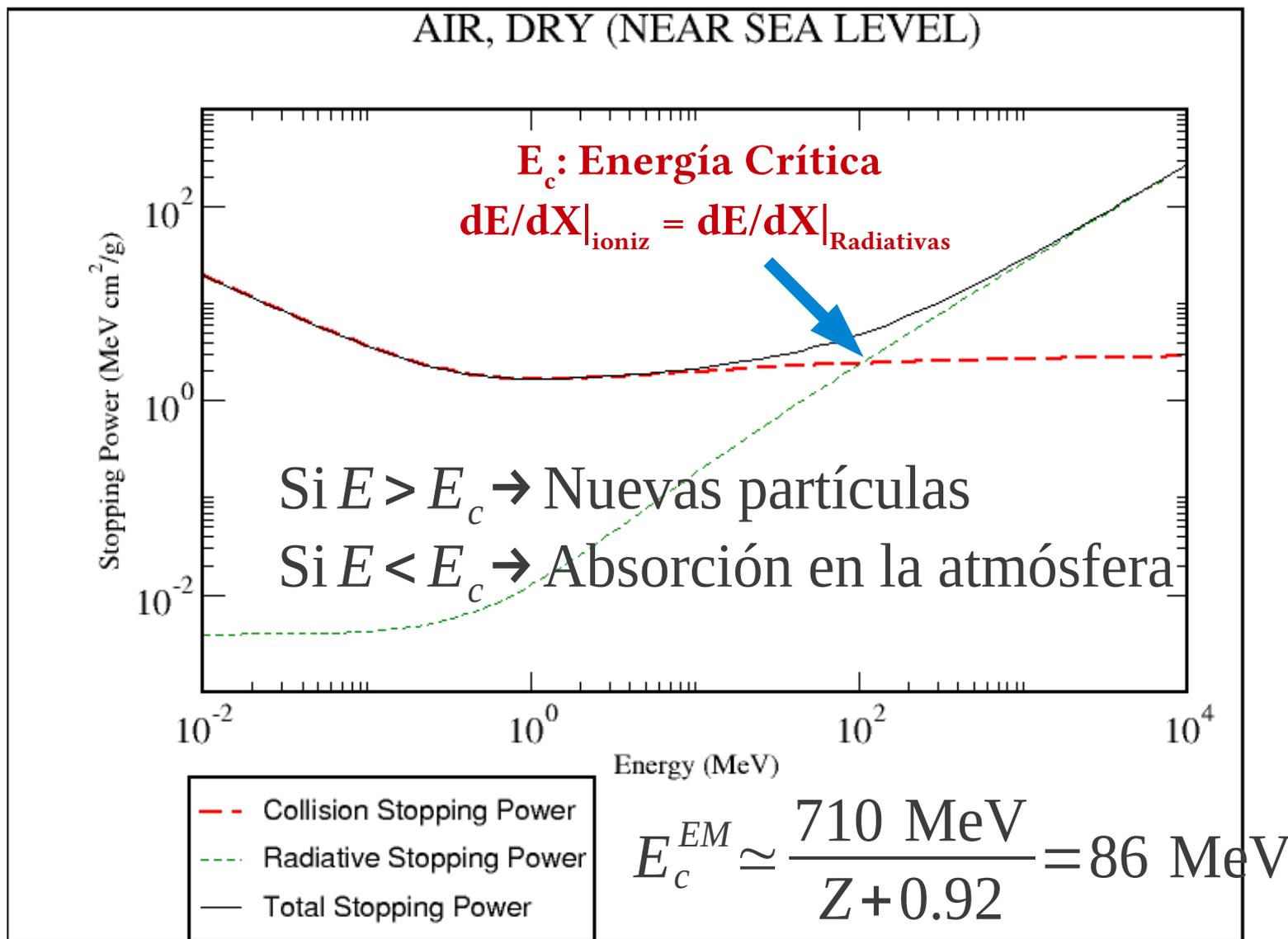


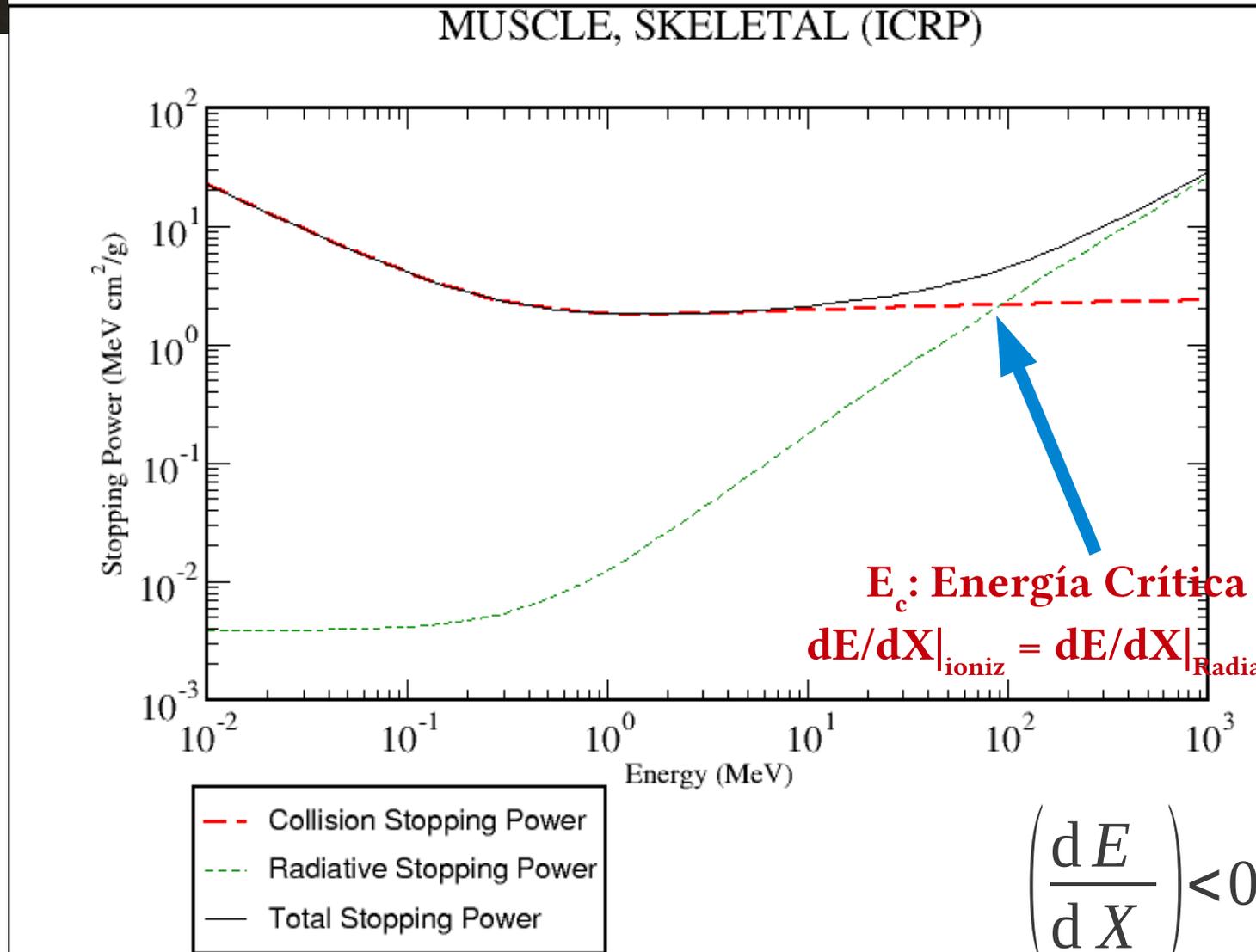
$$E_c^{\text{Sólidos}} = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1.24}$$

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

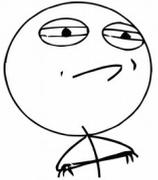


# Poder de frenado





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\*  
Choose 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.

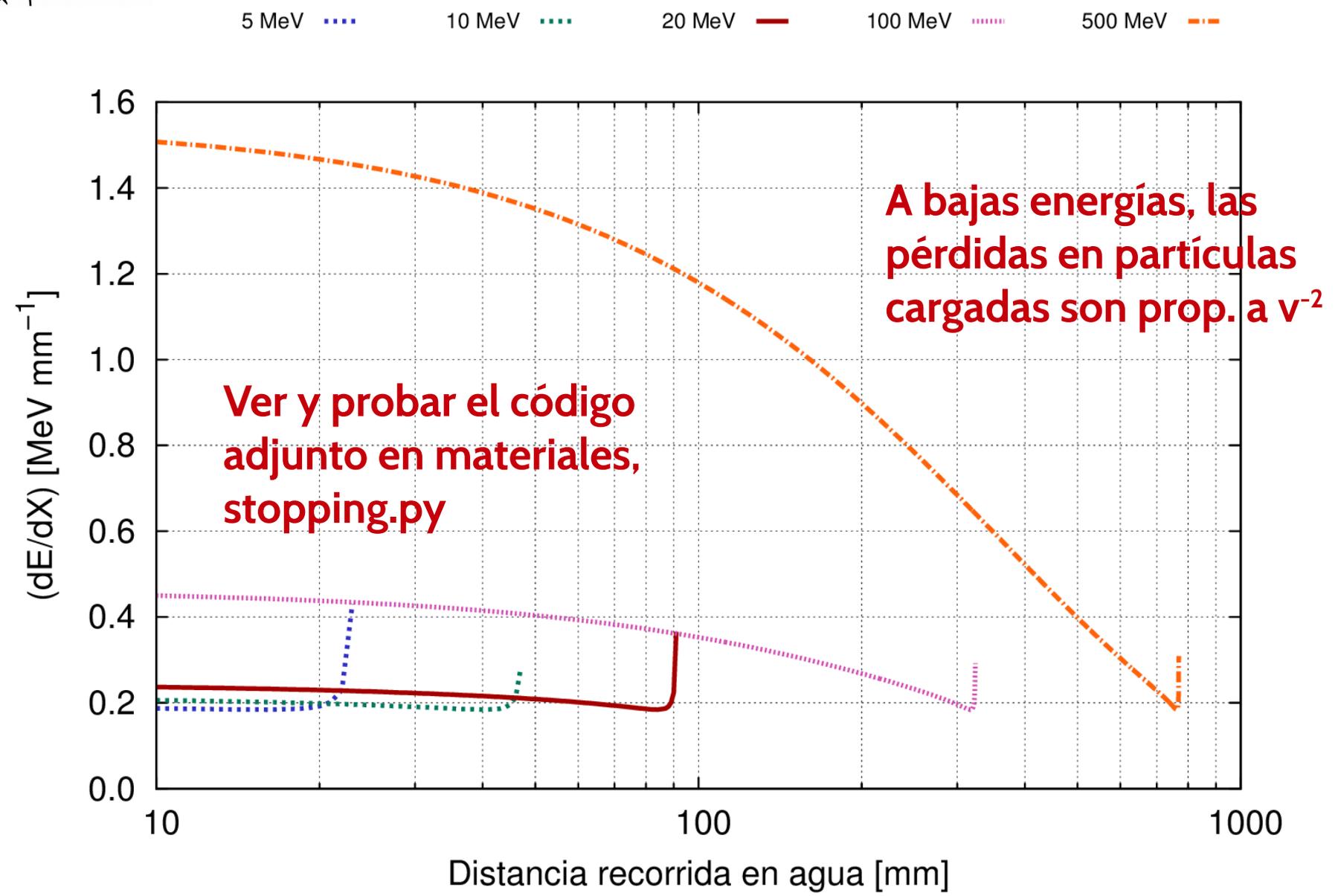
Submit Reset

\* Your browser must be file-upload compatible.

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

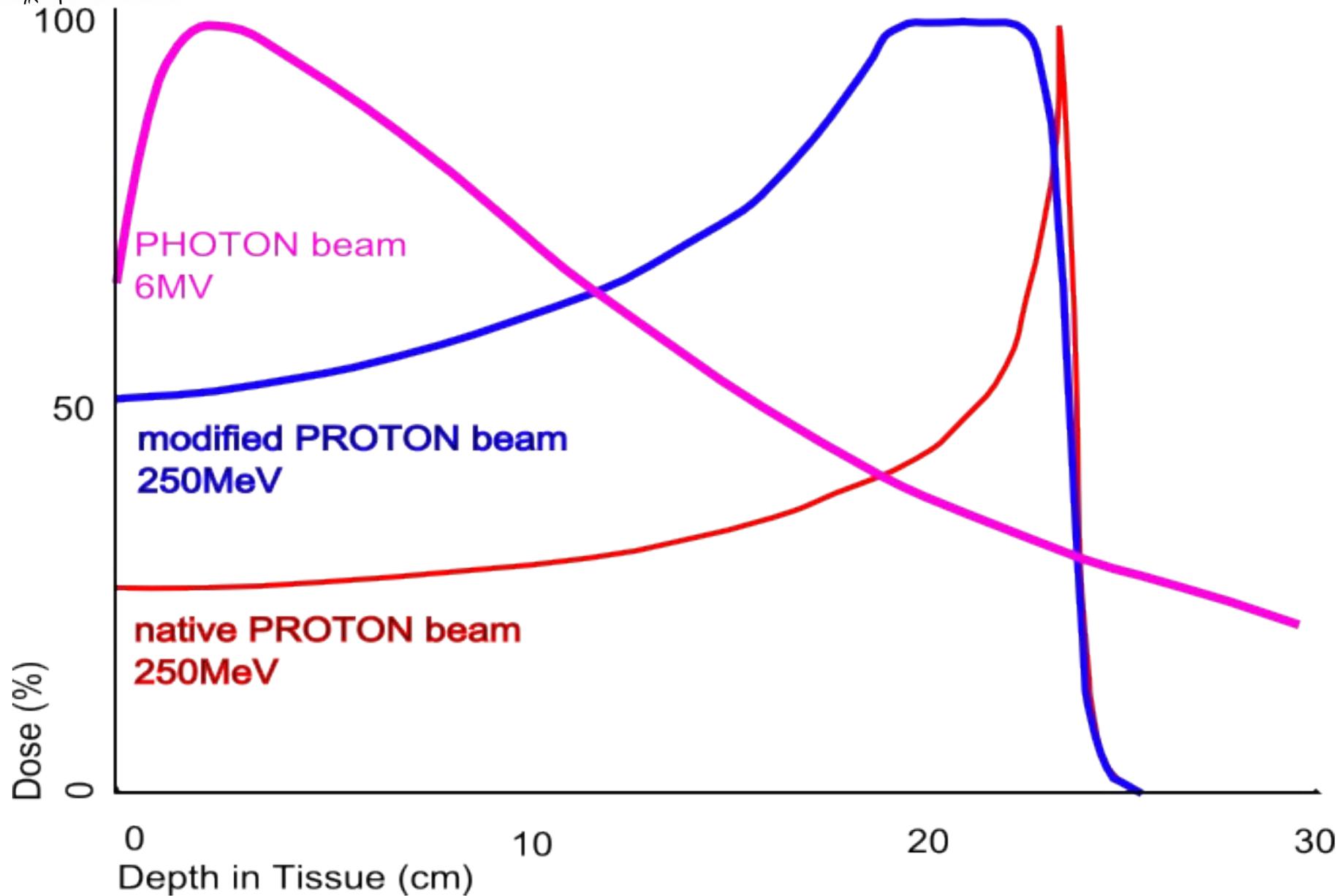


# Aplicación: pico de Bragg

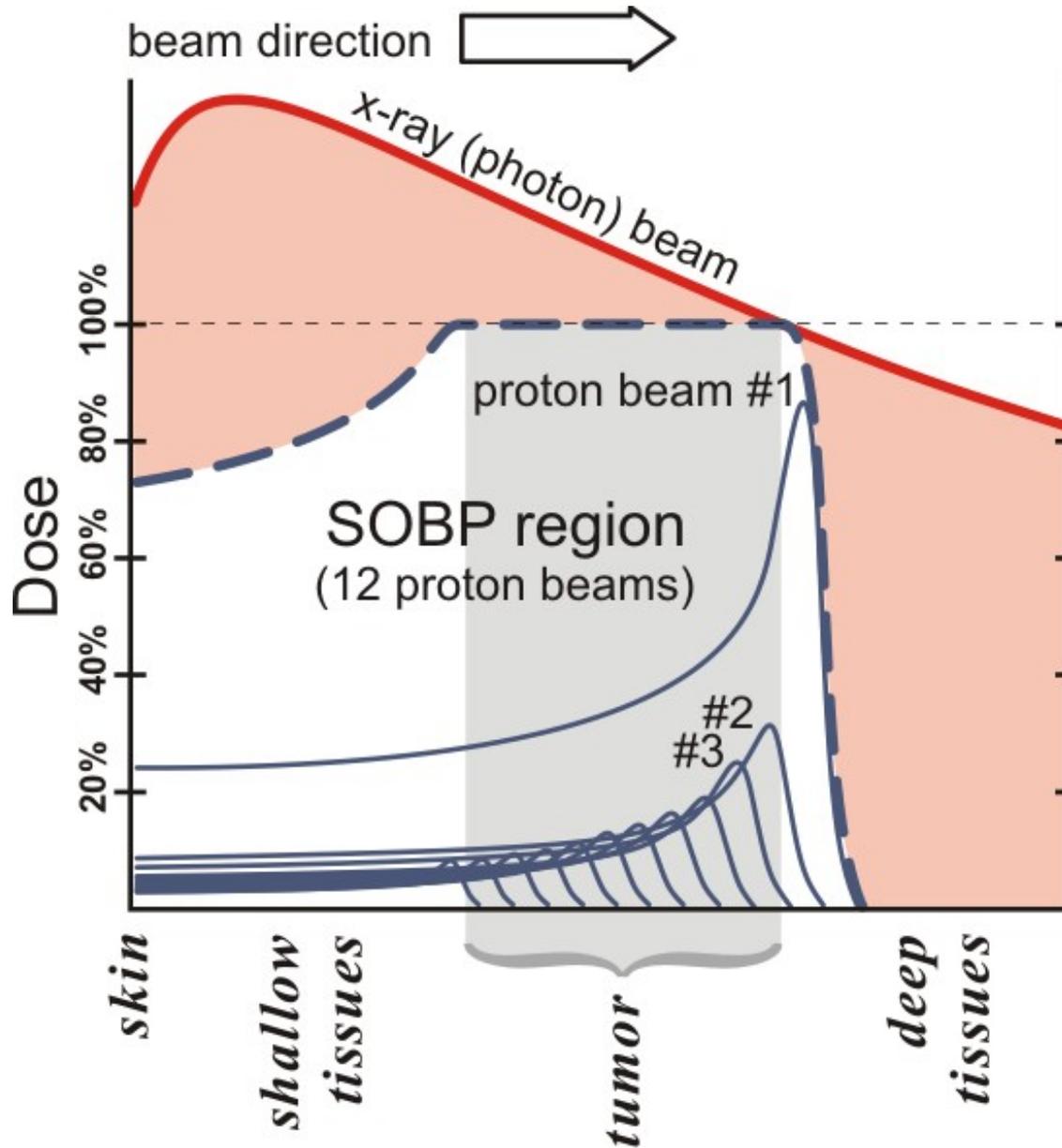




# Aplicación: Pico de Bragg



# Aplicación: Pico de Bragg, haces múltiples



# ¿Qué pasa con los fotones?

ver p. ej. Attix cap. 7, Knoll cap. 2 y NIST/XCOM

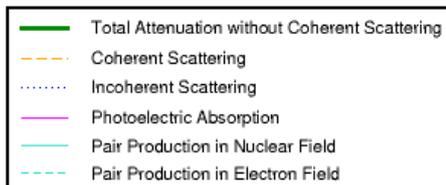
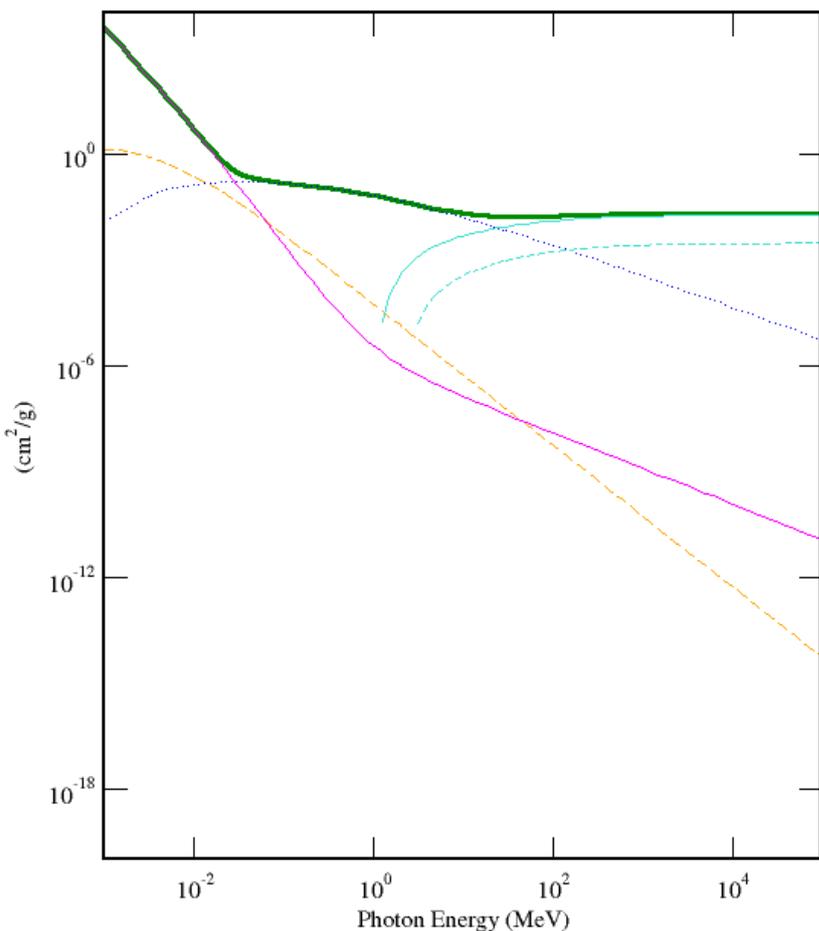
<https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>

WET AIR

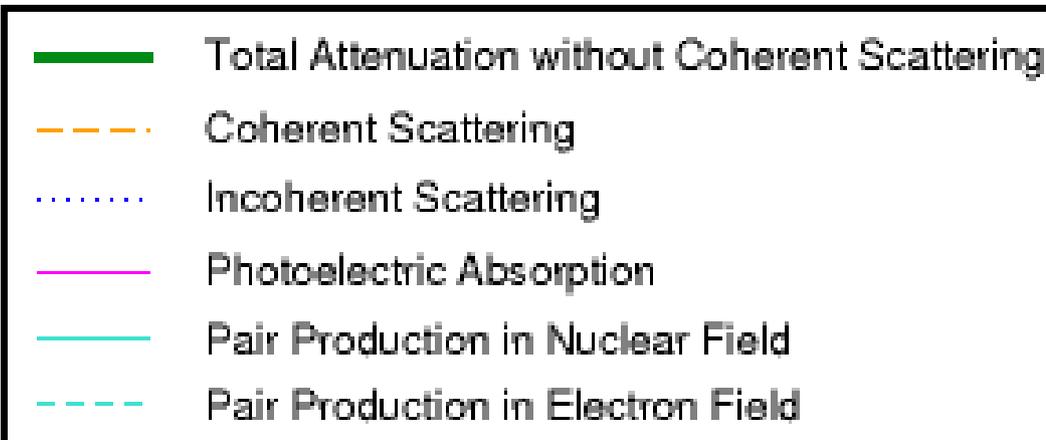
Partículas sin carga

Pero hay tres efectos

- Efecto fotoeléctrico
- Compton
- Producción de pares



<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

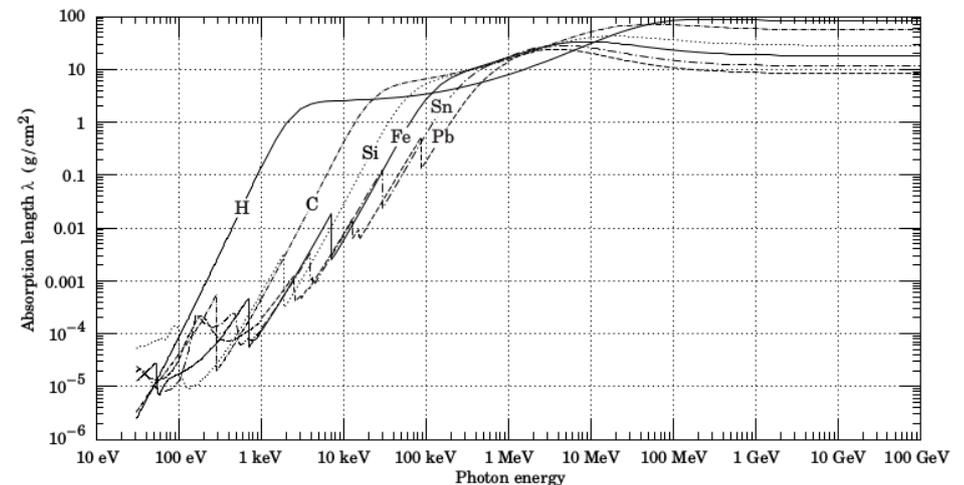
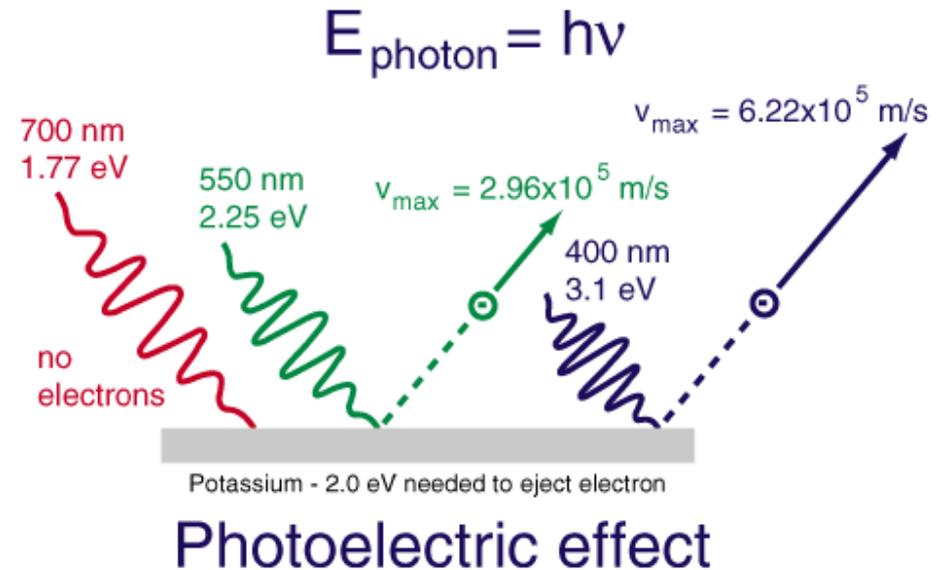


# Efecto fotoeléctrico

- Interacción de baja energía
- La energía máxima del electrón emitido es:

$$K_{\max} = \frac{1}{2} m_e v_{\max}^2 = \frac{hc}{\lambda} - \varphi$$

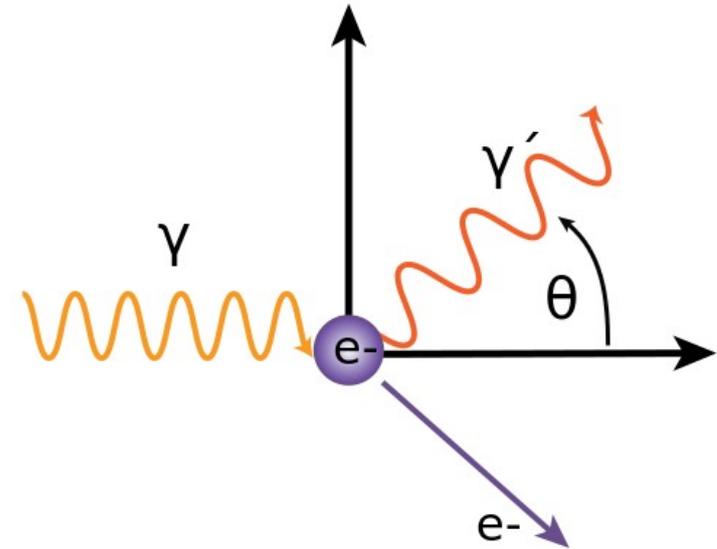
- La función trabajo depende del material
- Es posible identificar la energía de ligadura de las capas atómicas



- **Dispersión inelástica de fotones con partículas cargadas libres** (la dispersión de Thompson es elástica):

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + (1 - \cos \theta) \left( \frac{E_\gamma}{m_e c^2} \right)}$$

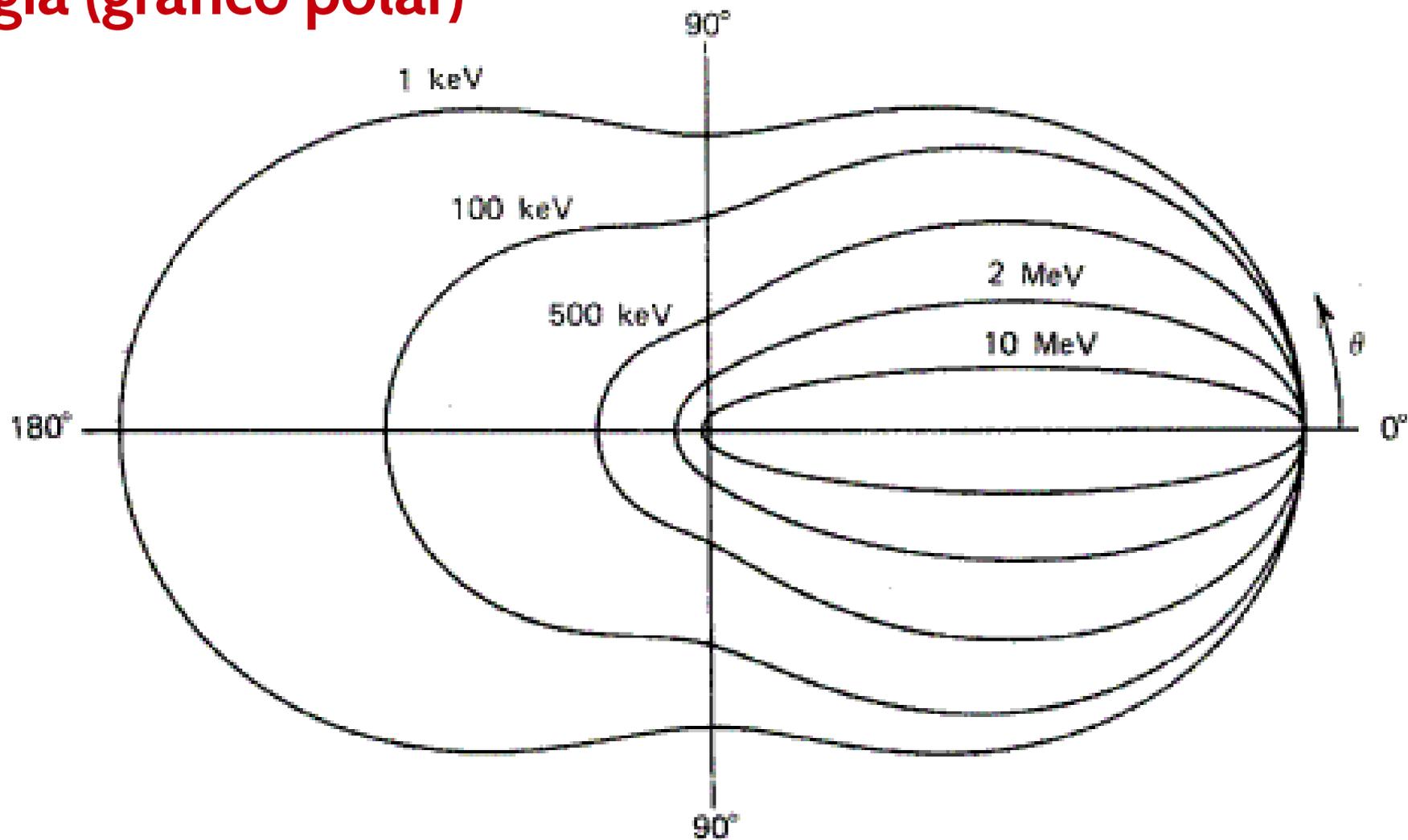


- La energía transferida depende de  $\theta$ , máximo:

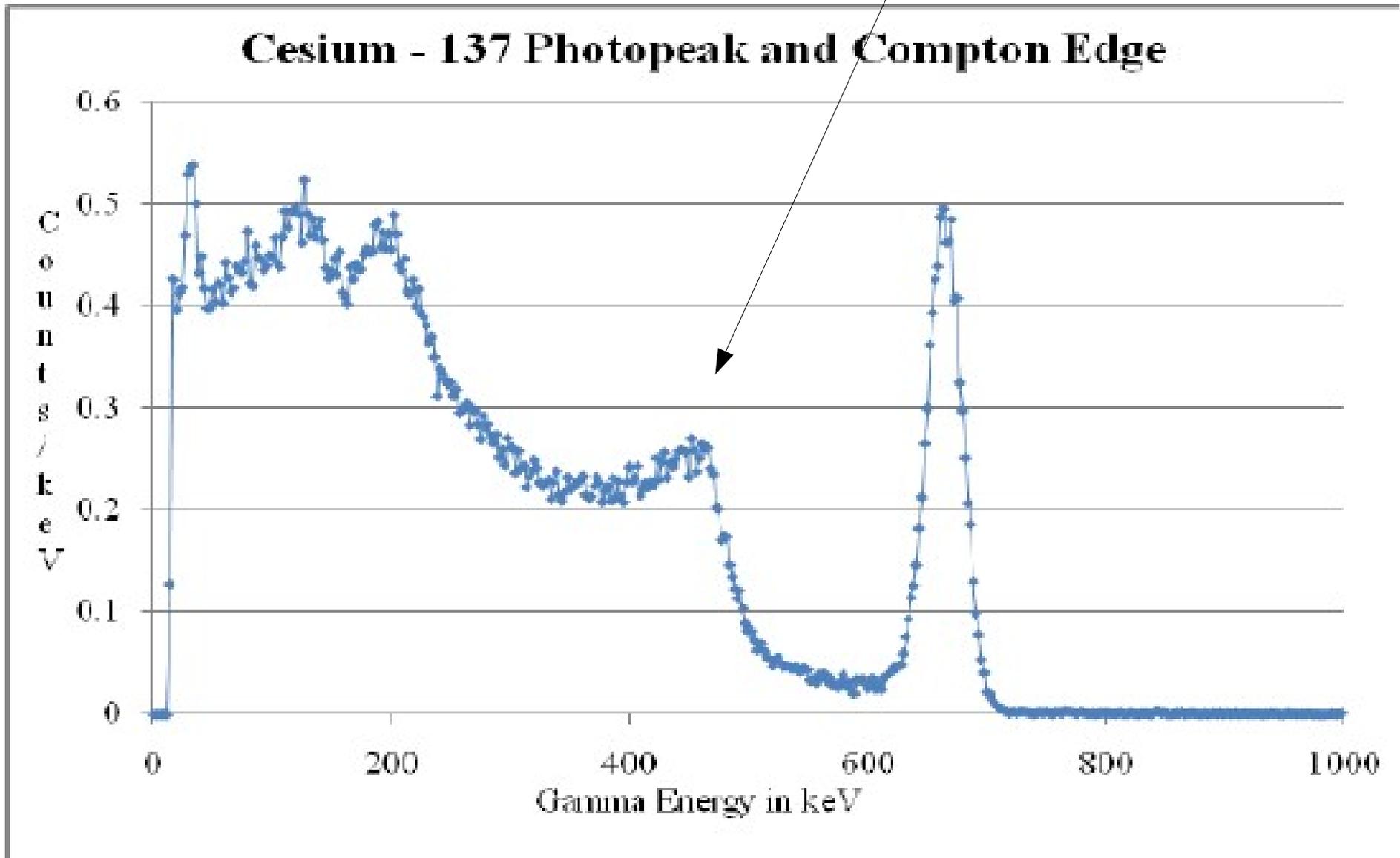
$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \left( \frac{2E_\gamma}{m_e c^2} \right)}, \text{ si } \theta = \pi$$

# Formula de Klein-Nishina

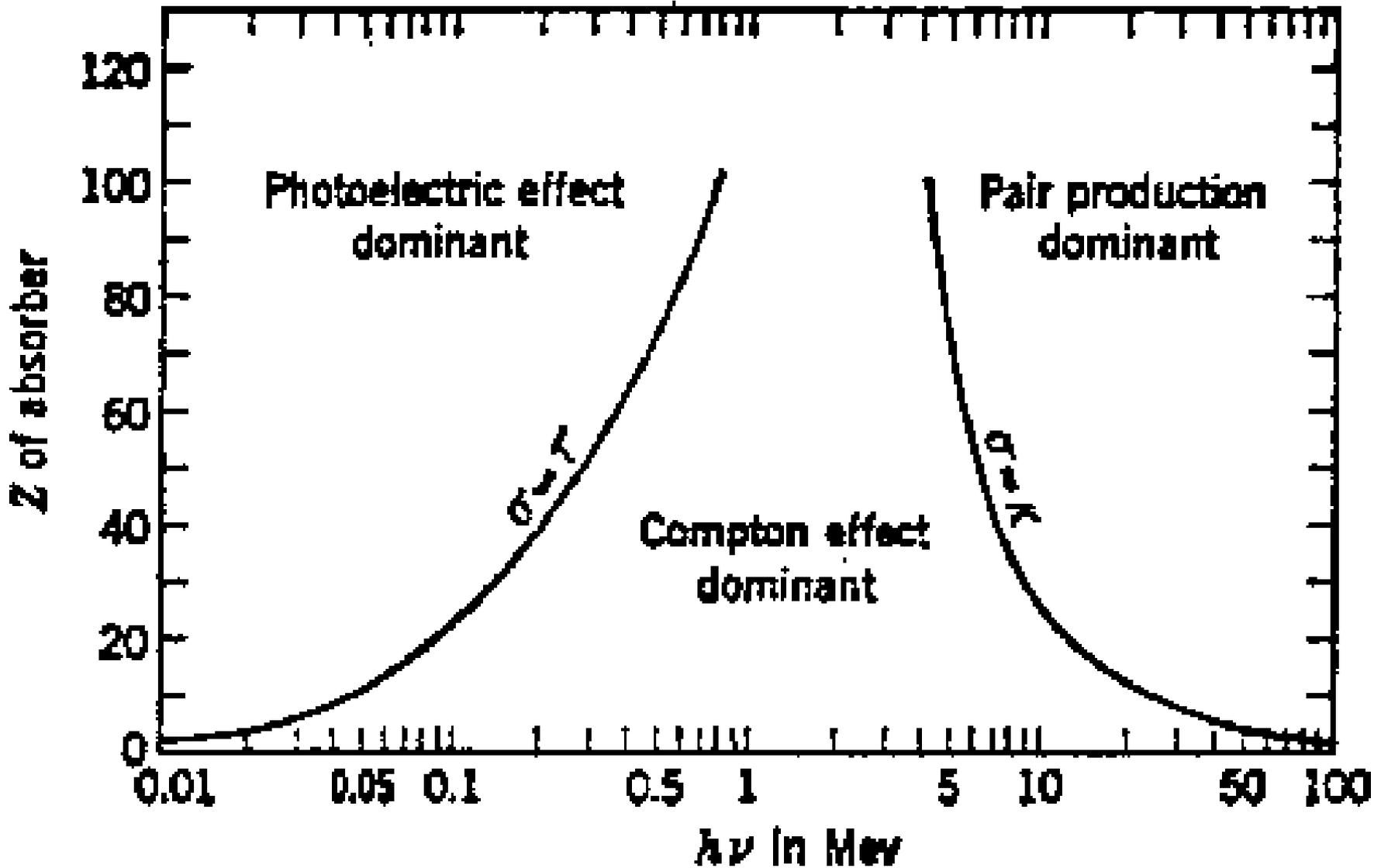
**Sección eficaz diferencial  
Compton como función de  
la energía (gráfico polar)**



# Talón de Compton (Compton edge)



# ¡Importante! Para poner como fondo de pantalla



# Coeficiente de atenuación (lineal) (ver p. ej. Attix cap. 3)

- Un haz de fotones podrá sufrir diferentes interacciones con el medio → la intensidad del haz se ve afectada por dichas interacciones
- La probabilidad de interacción quedará determinada por las secciones eficaces de los distintos procesos
- Definimos al **coeficiente de atenuación** como la probabilidad total de interacción por unidad de longitud recorrida en el medio

$$\mu = \sum_i \sigma_i = \sigma_R + \tau + \sigma + \kappa, \quad [\mu] = \text{cm}^{-1}$$

$\sigma_R$  es Rayleigh,  $\tau$  es fotoeléctrico,  $\sigma$  es Compton, y  $\kappa$  es creación de pares.

- El **camino libre medio,  $\lambda$ , será la distancia promedio entre dos interacciones,**

$$\lambda = \frac{1}{\mu}, \quad \text{y entonces } [\lambda] = \text{cm}$$

- Luego, para un haz de intensidad  $I_0$  que atraviesa un medio de espesor  $l$ :

$$I(l) = I_0 e^{-\mu l} \quad \text{ó} \quad I(l) = I_0 e^{-\frac{l}{\lambda}}$$

$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} l' e^{-\mu l'} dl'}{\int_0^{\infty} e^{-\mu l'} dl'} = \frac{1}{\mu}$$

# Coeficiente de atenuación másico

- $\mu$  varía con la densidad del medio: para el mismo material, dependerá del estado del medio (sólido, líquido, gaseoso).
- El coeficiente de atenuación másico está corregido por  $\rho$ :

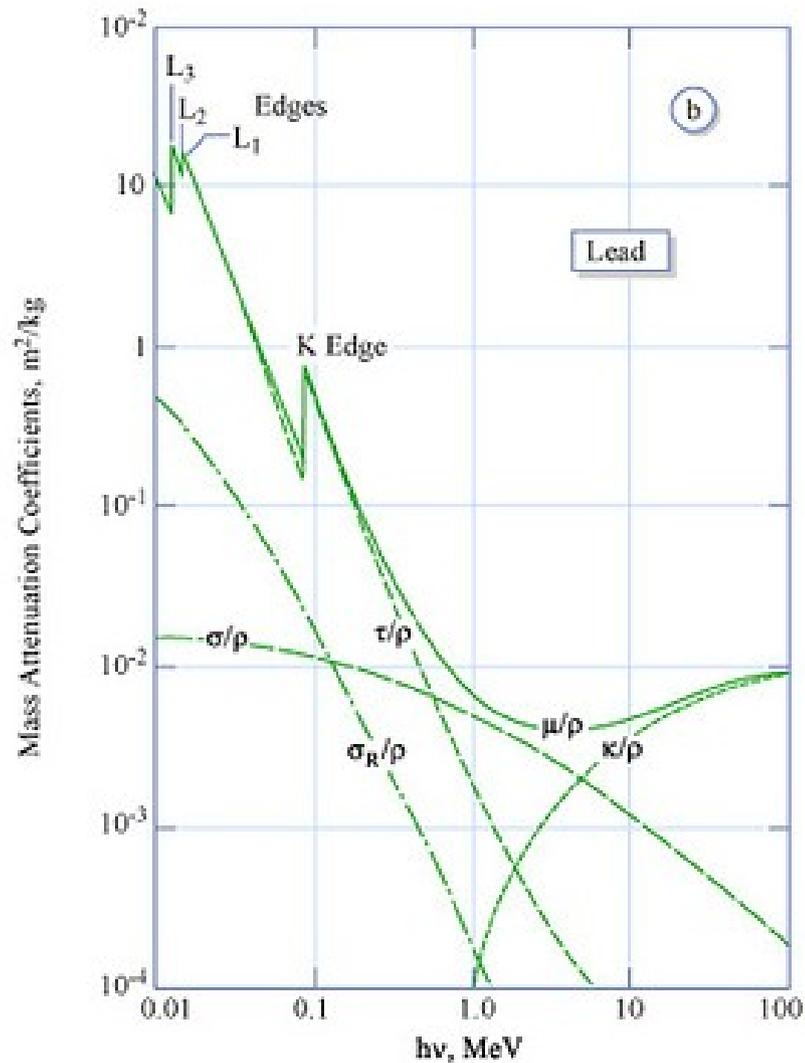
$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right), \quad \left[\frac{\mu}{\rho}\right] = \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$$

- Y luego,

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i \frac{\sigma_i}{\rho} = \frac{\sigma_R}{\rho} + \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho}$$

- El término de Rayleigh (dispersión elástica) se incluye para haces estrechos (la dispersión afecta el haz)

# Coefficiente de atenuación másico



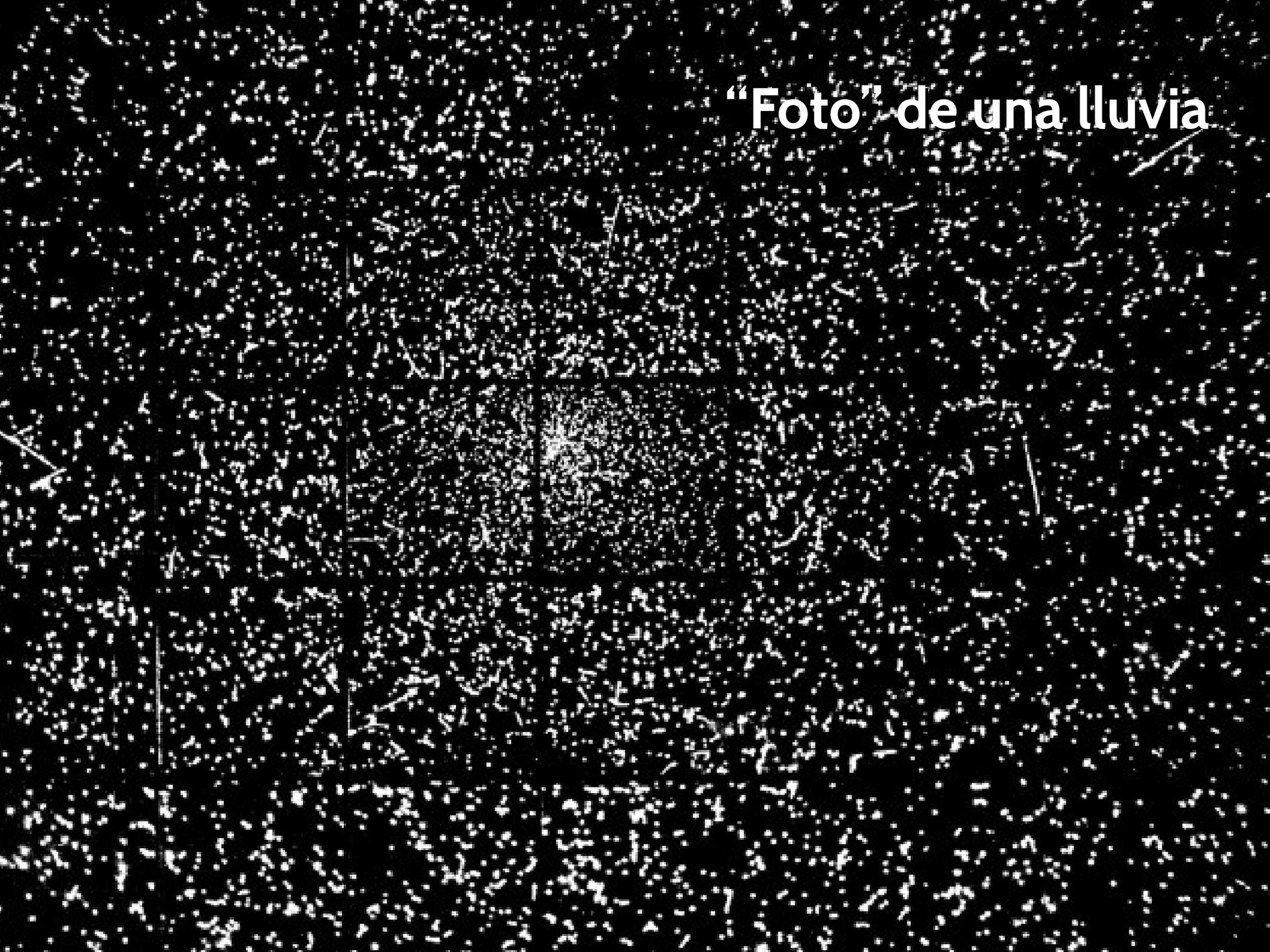
Mass attenuation coefficients for carbon (a) and lead (b).  $\tau/\rho$  indicates the contribution of the photoelectric effect,  $\sigma/\rho$  is that of the Compton effect,  $\kappa/\rho$  that of pair production, and  $\sigma_R/\rho$  that of Rayleigh (coherent) scattering.  $\mu/\rho$  is their sum, which is closely approximated in Pb by the  $\tau/\rho$  curve below  $h\nu = 0.1$  MeV.



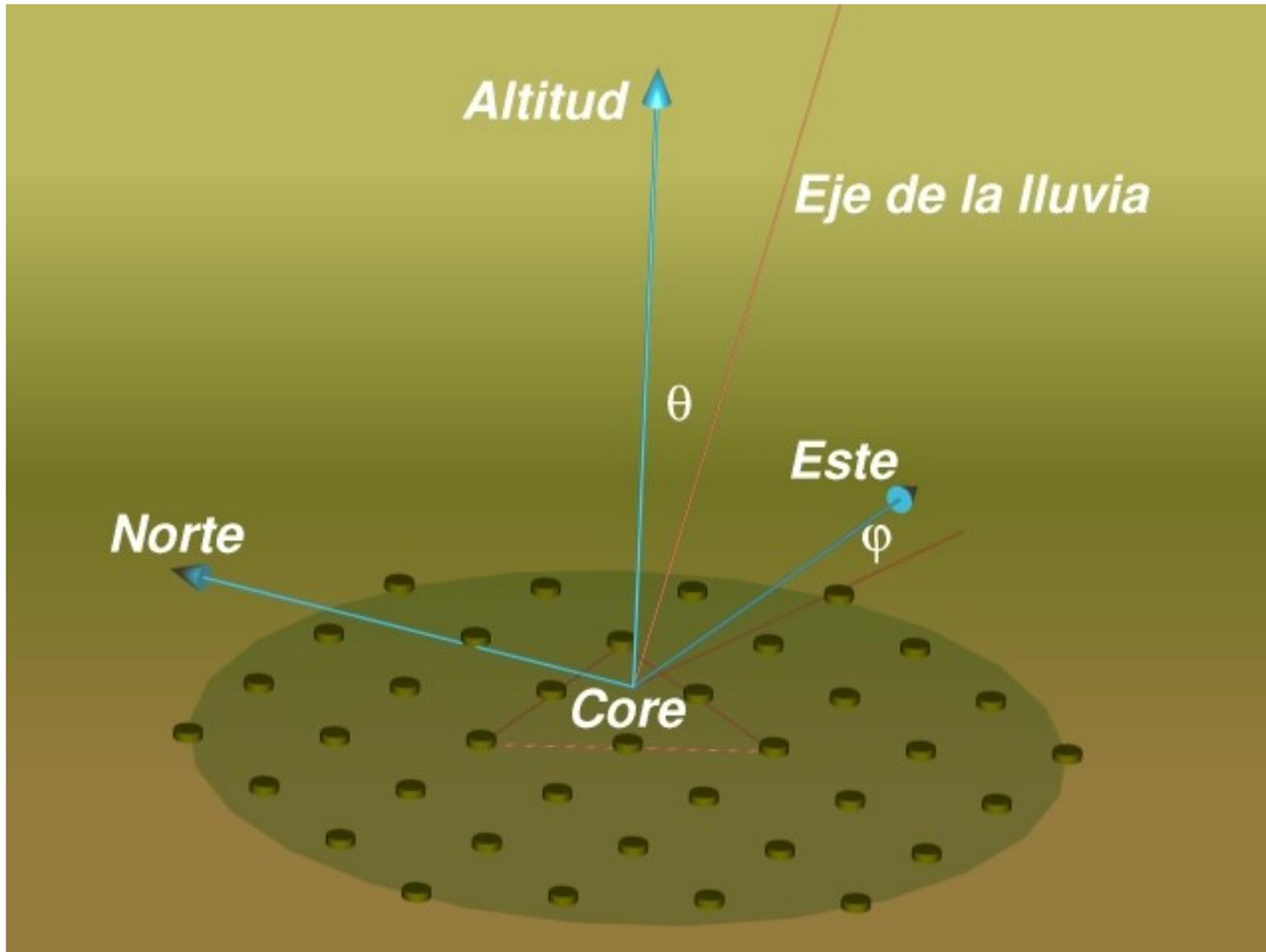
# Interacción con la atmósfera



**“Foto” de una lluvia**



# Algunas definiciones útiles



# Blindaje atmosférico

JON HOPKINS  
BREATHE THIS AIR  
FEATURING PURITY RING



CHALLENGE ACCEPTED

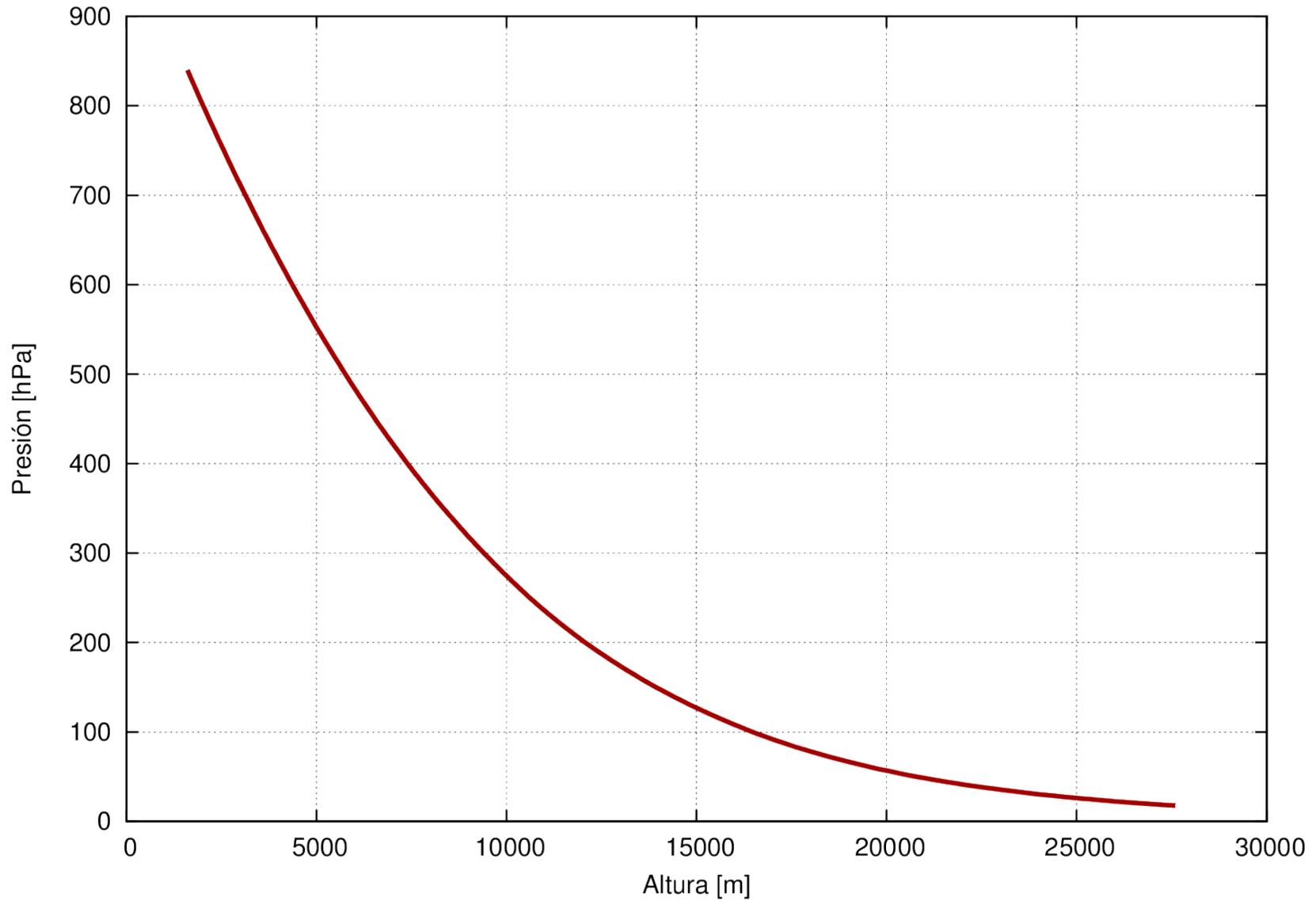


$1 \text{ atm} = 1033 \text{ g/cm}^2 = 91 \text{ cm Pb}$

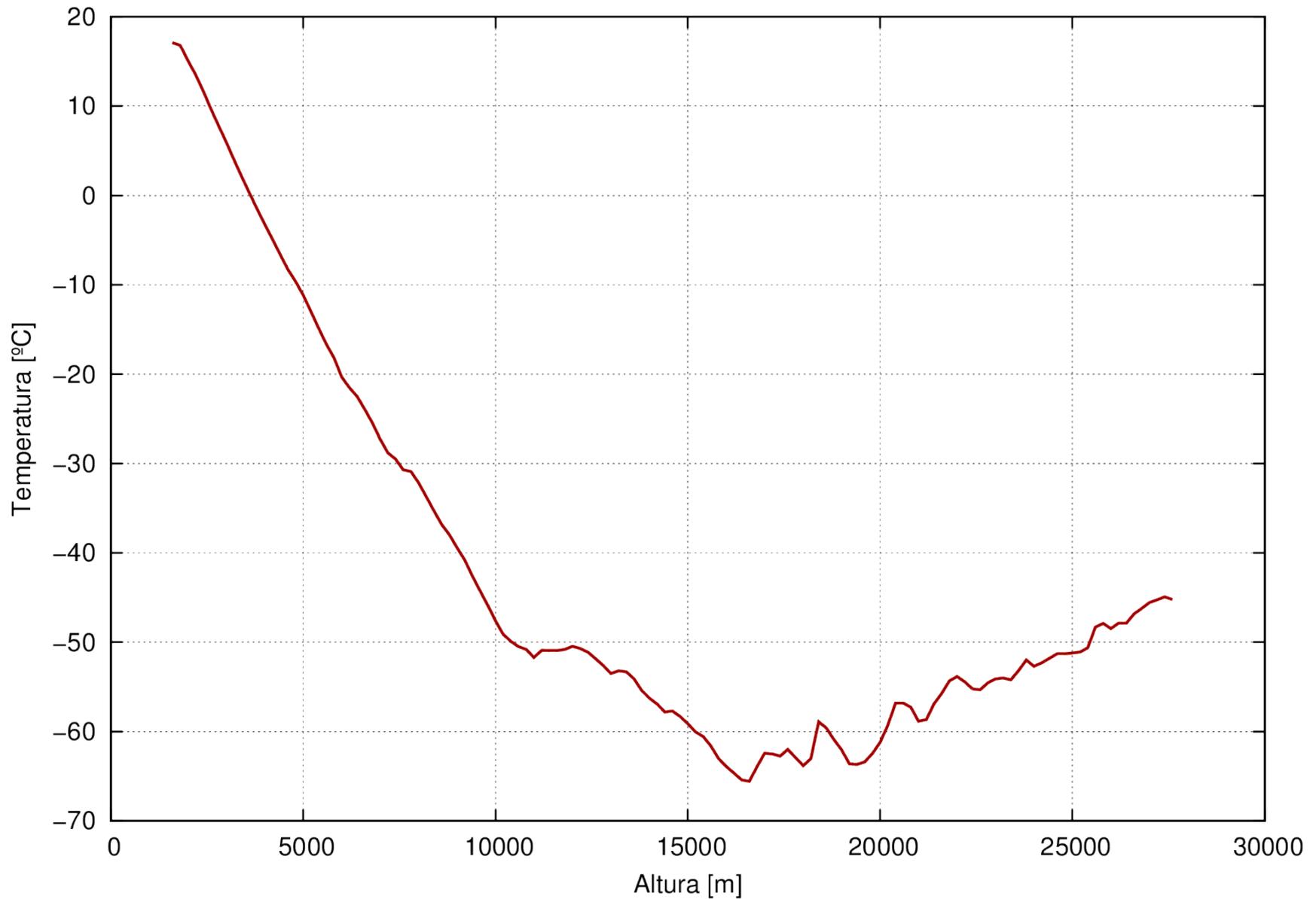
**Profundidad atmosférica X:**  
Cantidad de masa atravesada en la dirección transversal para una partícula entrando a la atm.

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

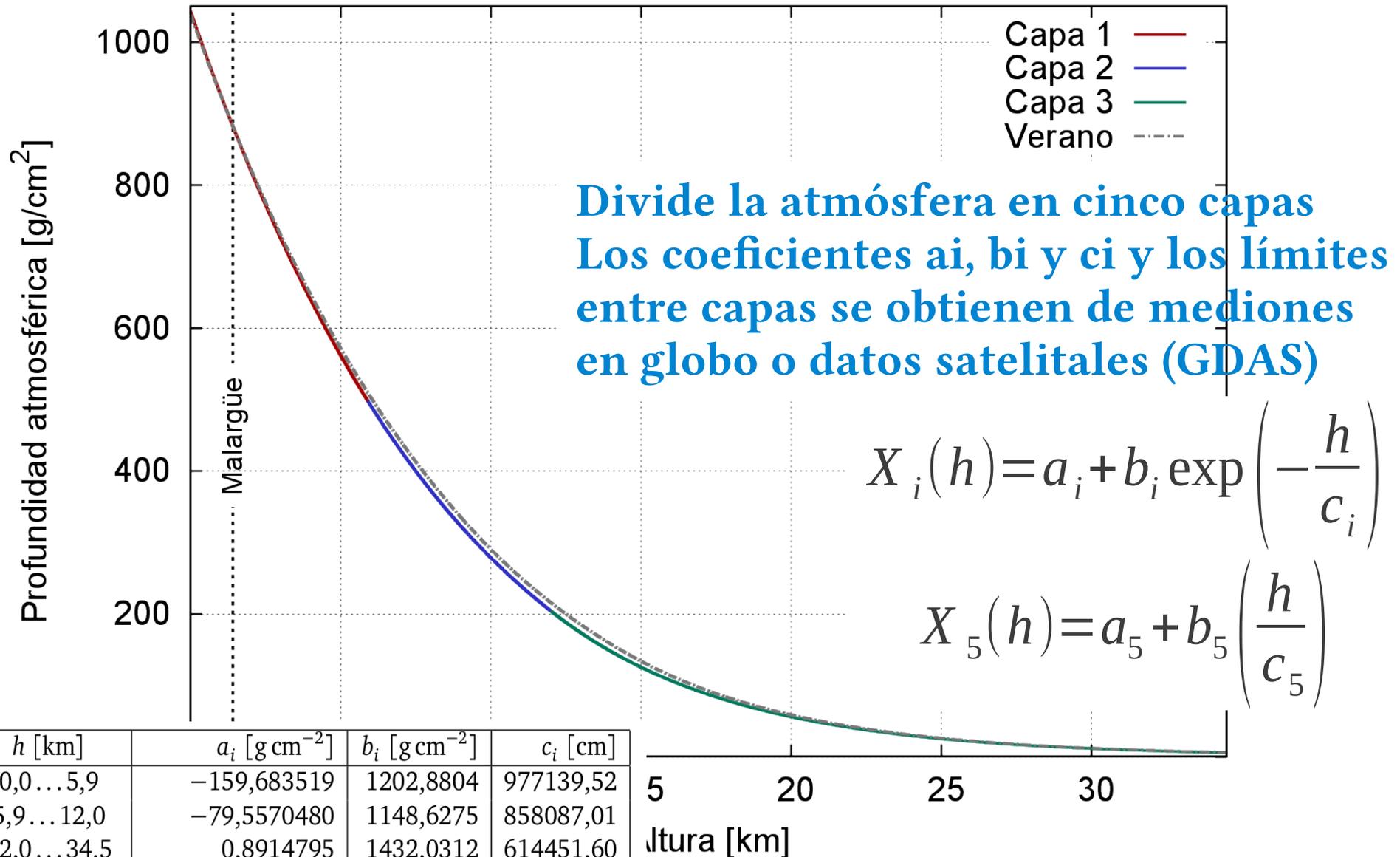
# Presión vs altura (datos)



# Temperatura vs Altura



# Modelo atmosférico de Linsley



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	$10^9$

5

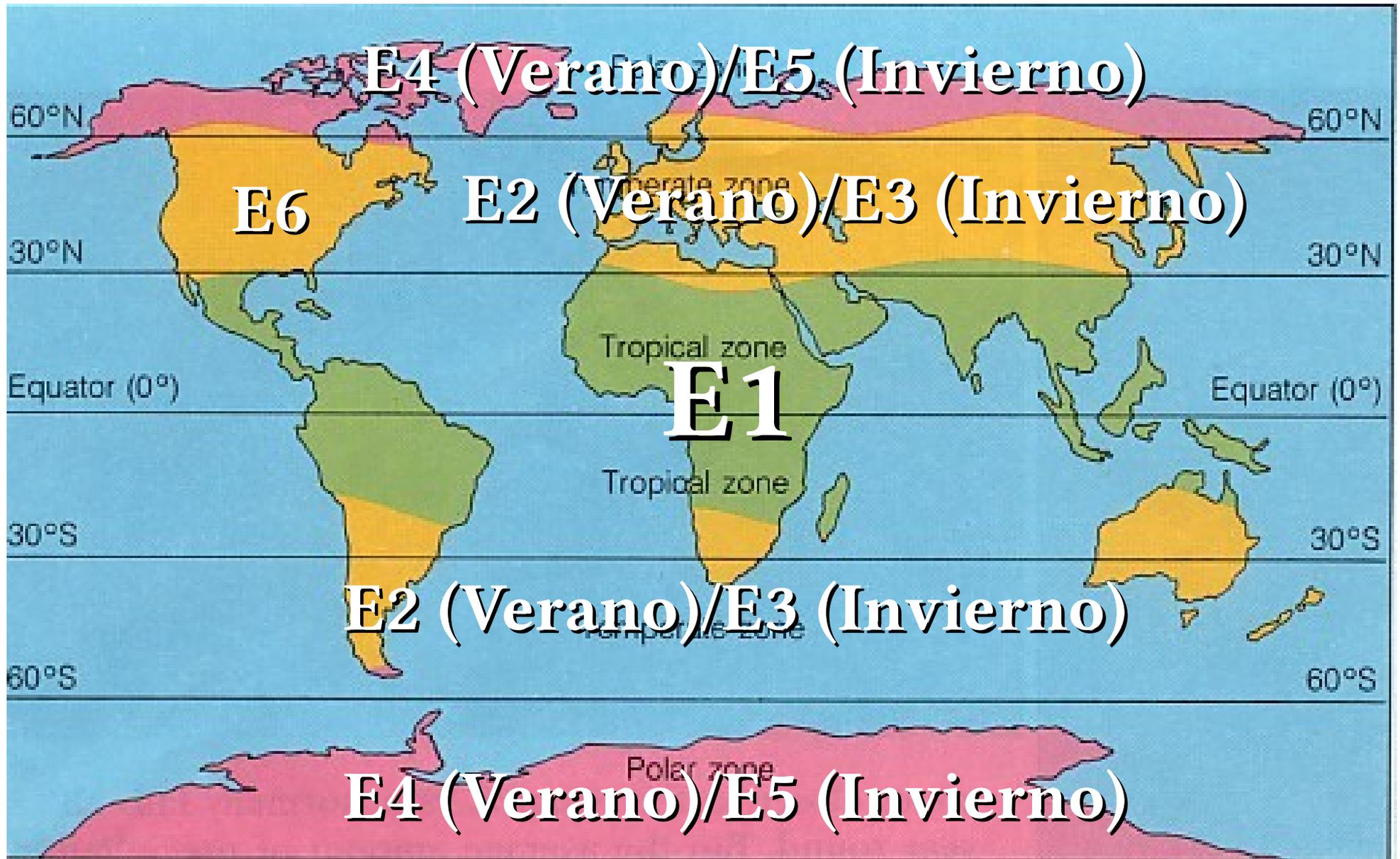
20

25

30

Altura [km]

# MODTRAN Models (atmprof1-6)



# La Tierra es curva...



- 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

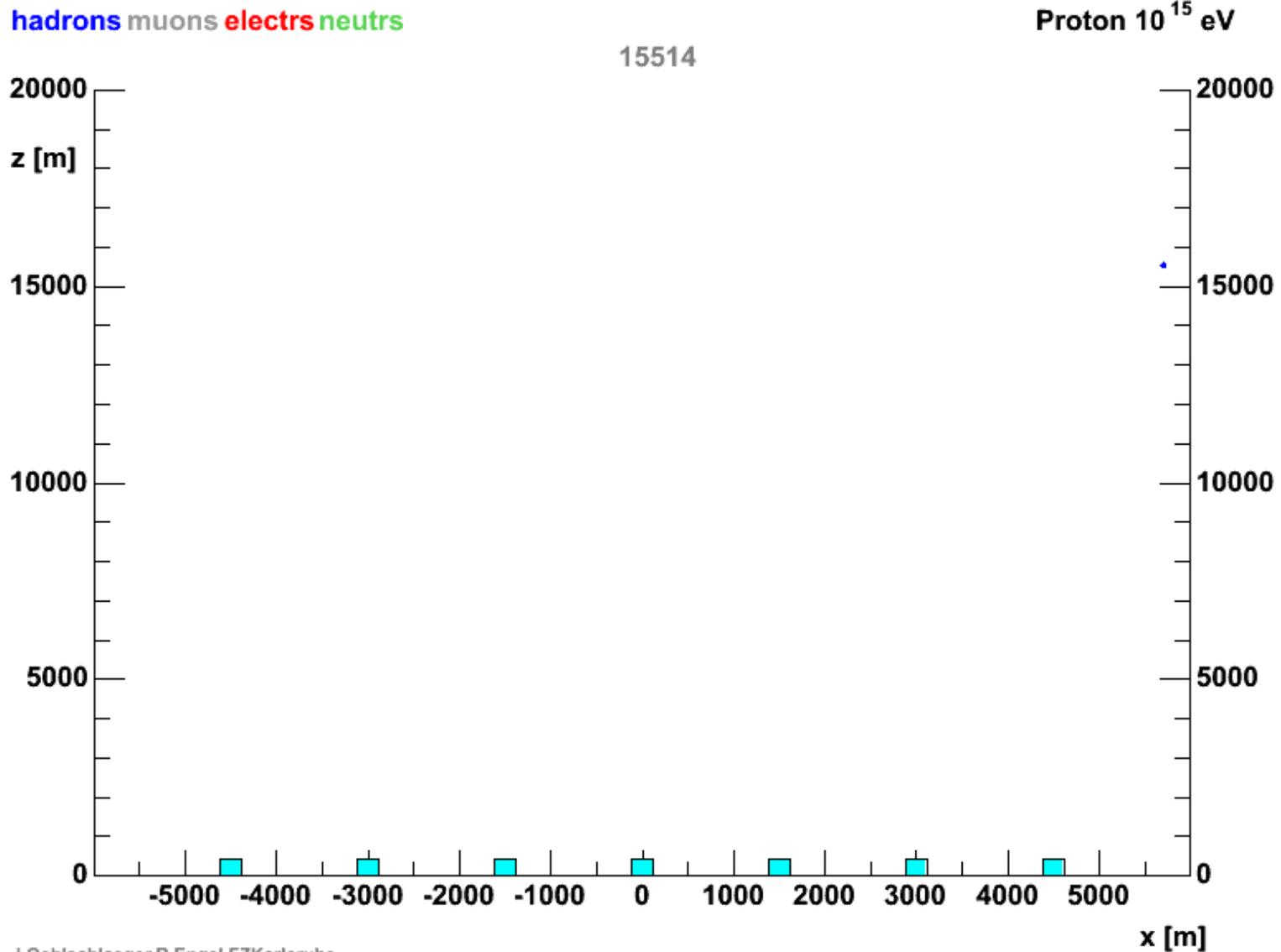
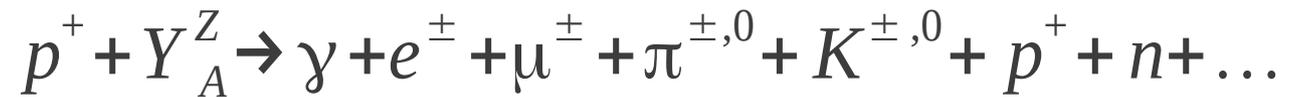
- Si  $\theta \rightarrow 90^\circ$ ,

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

CHALLENGE ACCEPTED



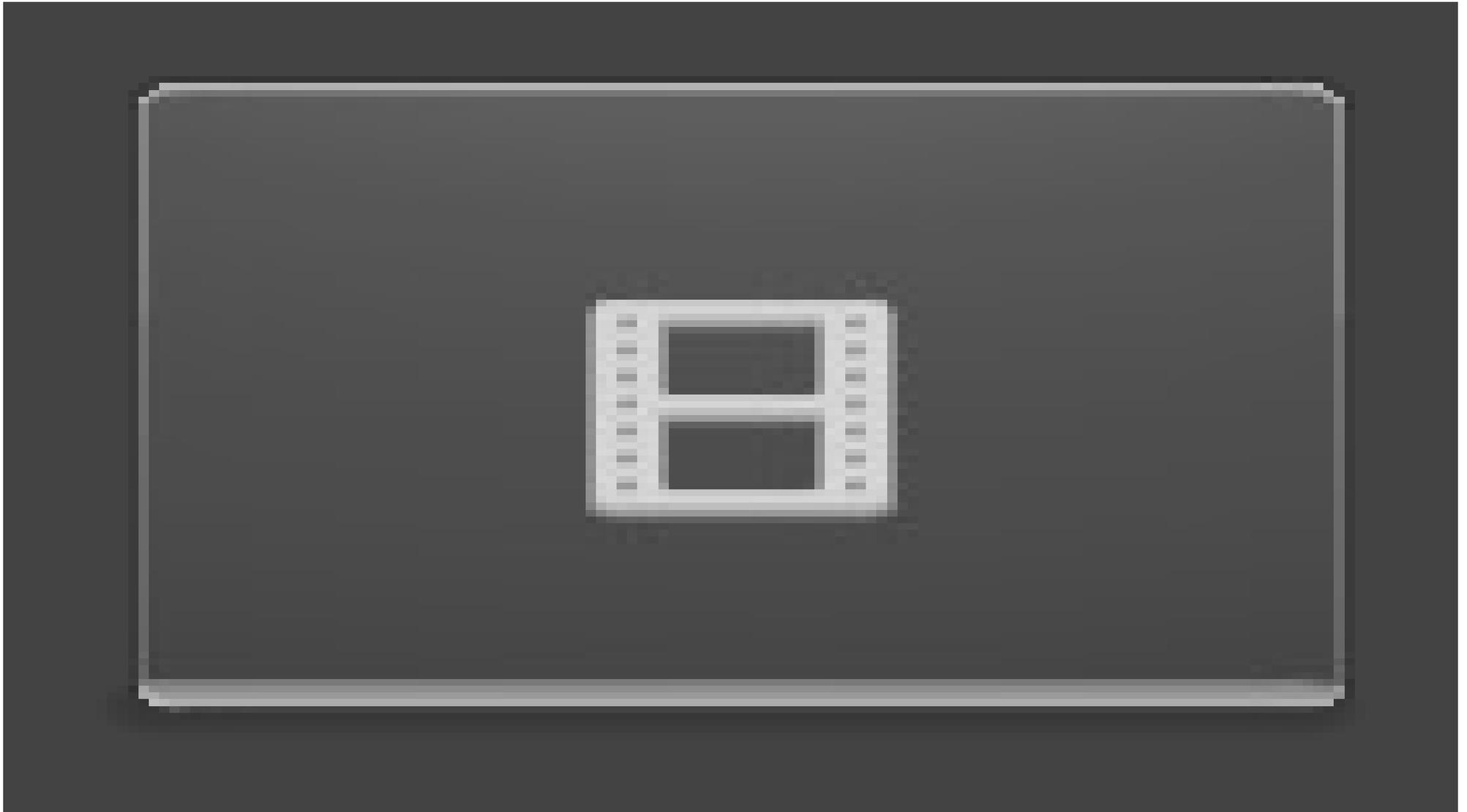
# Lluvias Atmosféricas Extendidas



# Photon EAS

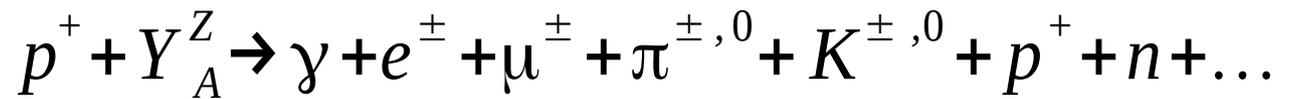


# Gamma, Proton, Carbon-13



# Lluvias Atmosféricas Extendidas

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

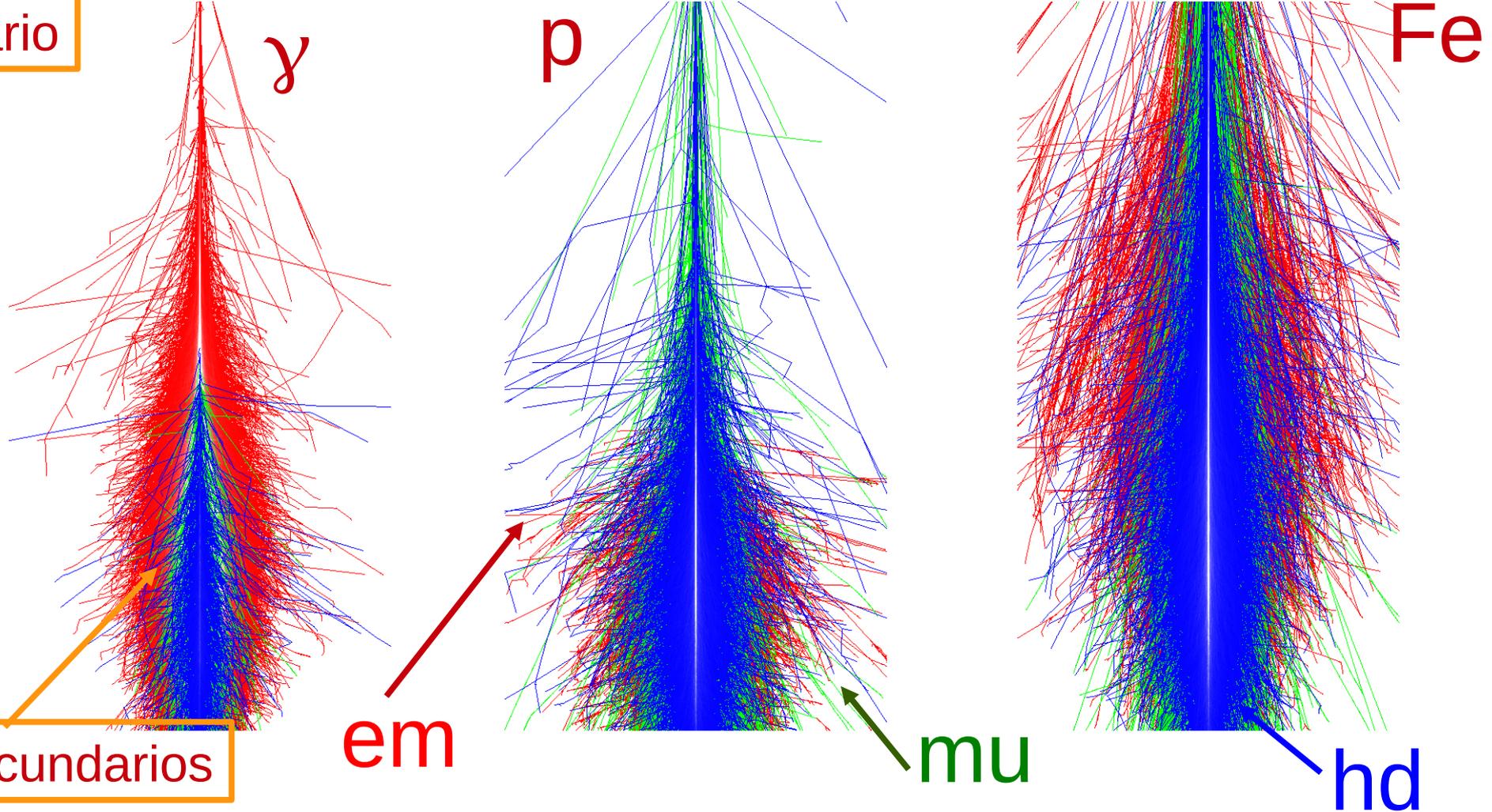


Primario

$\gamma$

p

Fe



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:  $e^\pm \xrightarrow{ZY} e^\pm \gamma$   
Pares:  $\gamma \xrightarrow{ZY} e^+ e^-$
- 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  
 $\mu^\pm \xrightarrow{ZY} \mu^\pm e^+ e^-$   
 $\mu^\pm \xrightarrow{ZY} \mu^\pm + \text{had}$
- $N_\mu \propto A^{0,1} E_p^{0,9}$

## Hadrónica

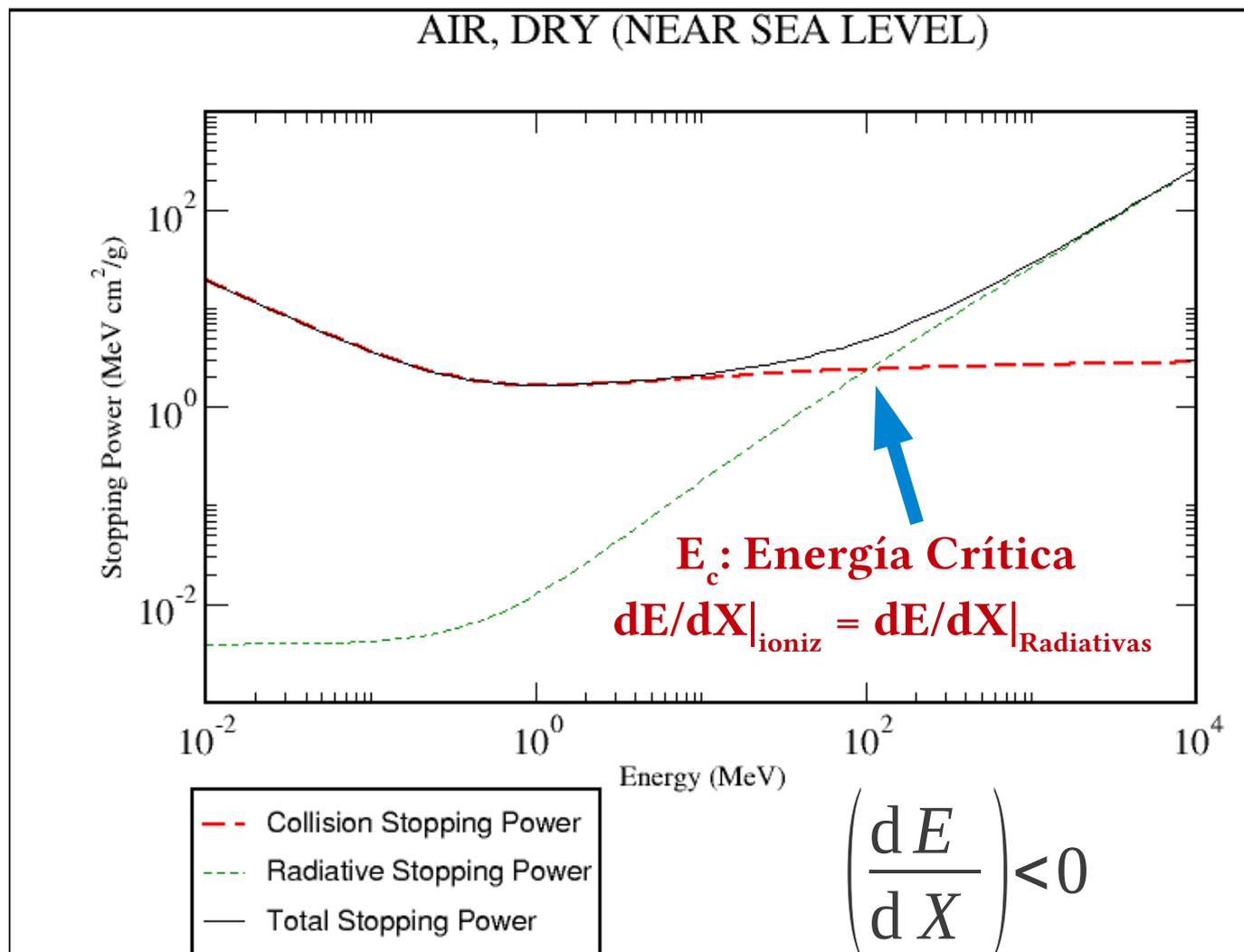
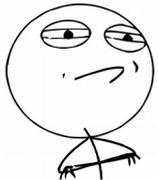
- Fragmentos nucleares
- $p, n, \pi^\pm, K^\pm$
- Mesones encantados
- *Leading particle effect*
- Concentrada en el eje de la lluvia
- $N_h \propto N_e^{0,95}$
- $N_h/N_e \sim 10^{-2} - 10^{-4}$

# Poder de frenado

## EM

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

CHALLENGE ACCEPTED



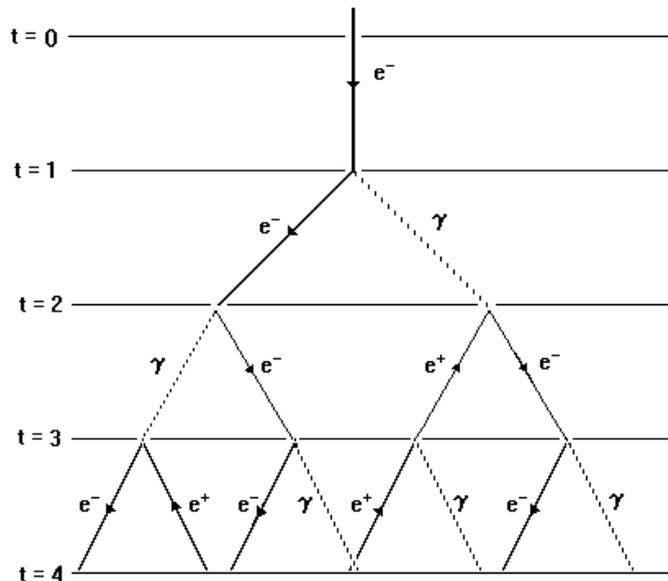
Si  $E > E_c \rightarrow$  Nuevas partículas

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

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

# Modelo ultra-simplificado

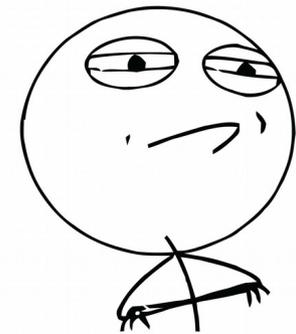
- Recorrida una distancia  $\lambda_{EM} = X_{EM} / \ln 2$ , una partícula produce 2 partículas con  $E_{n+1} = E_n / 2$
- El número de partículas:  $N \sim 2^n$ : 
$$N(X) = 2^{X/\lambda_{EM}}$$
- Luego, la energía media: 
$$\langle E \rangle = E_p / N(X) = E_p / 2^{X/\lambda_{EM}}$$
- Ahora, si  $\langle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



$$N_{\text{máx}} \sim \frac{E_p}{E_c}$$

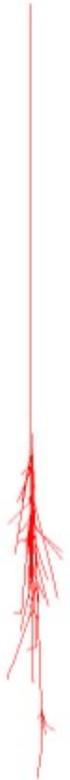
$$X_{\text{máx}} \sim \log \left( \frac{E_p}{E_c} \right)$$

**CHALLENGE ACCEPTED**



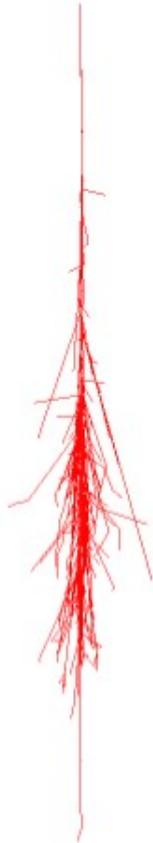
# Absorción atmosférica EM

12 km



2 km  
 $E_\nu = 1 \text{ GeV}$

12 km



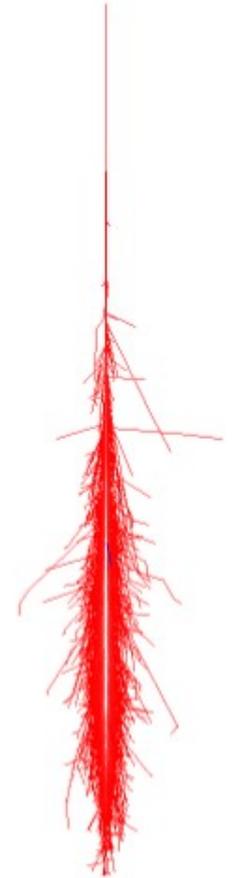
2 km  
 $E_\nu = 5 \text{ GeV}$

12 km



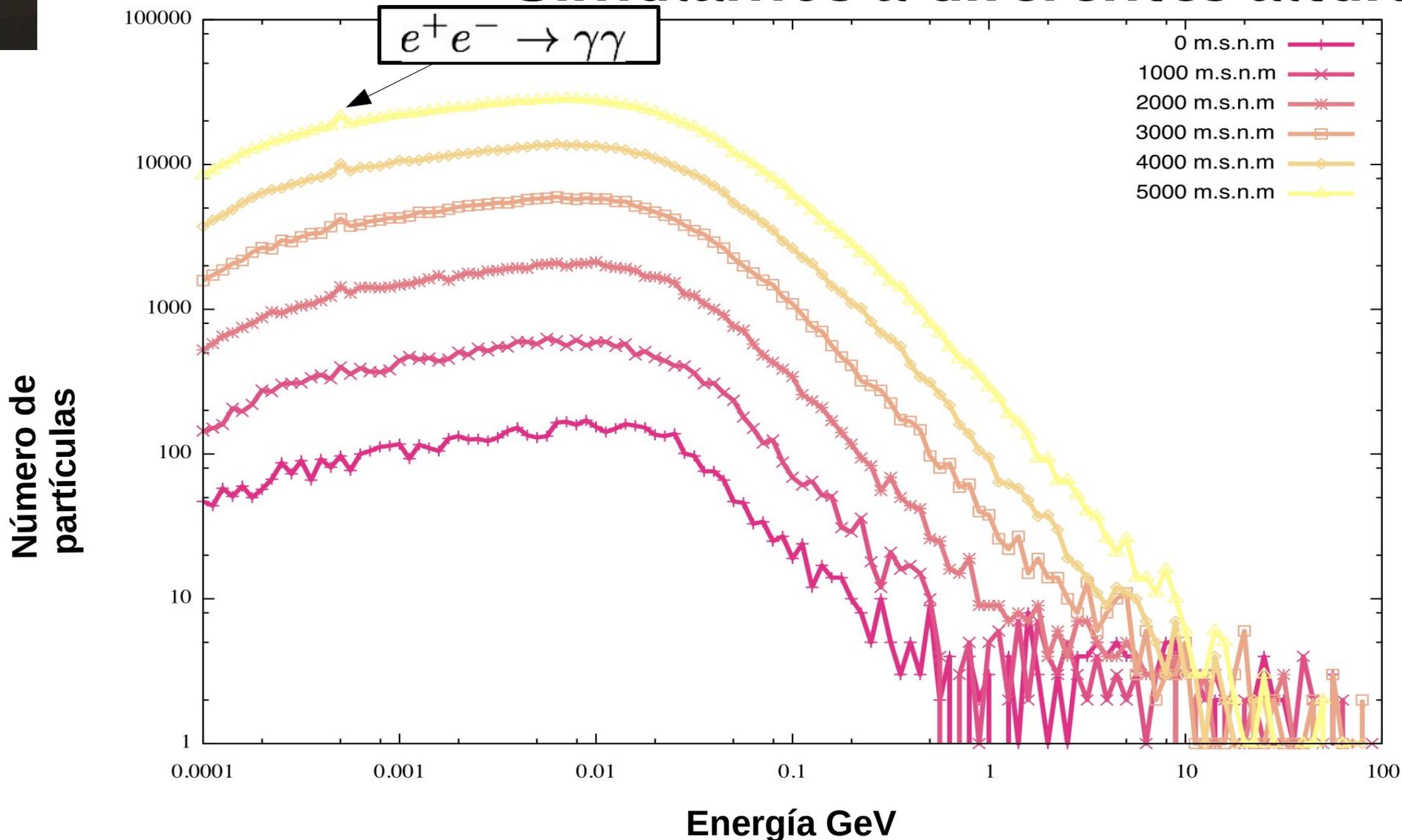
2 km  
 $E_\nu = 20 \text{ GeV}$

12 km



2 km  
 $E_\nu = 100 \text{ GeV}$

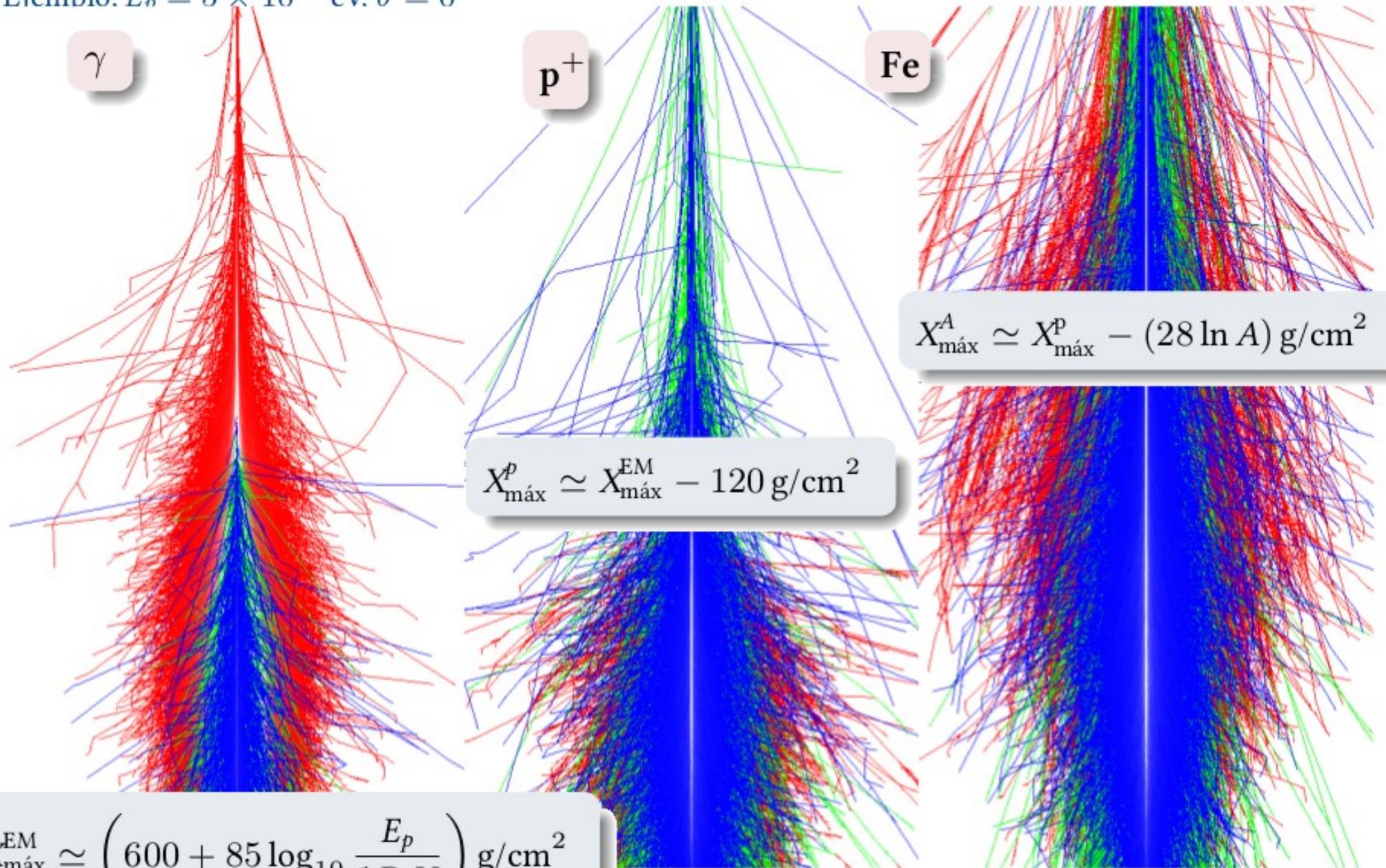
# Simulamos a diferentes alturas.



Histograma de frecuencia del numero de los fotones secundarios de una lluvia iniciada por un fotón de 130 GeV respecto a su energía. Cada linea corresponde a 5000 lluvias simuladas en CORSIKA.

# Cascadas atmosféricas

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

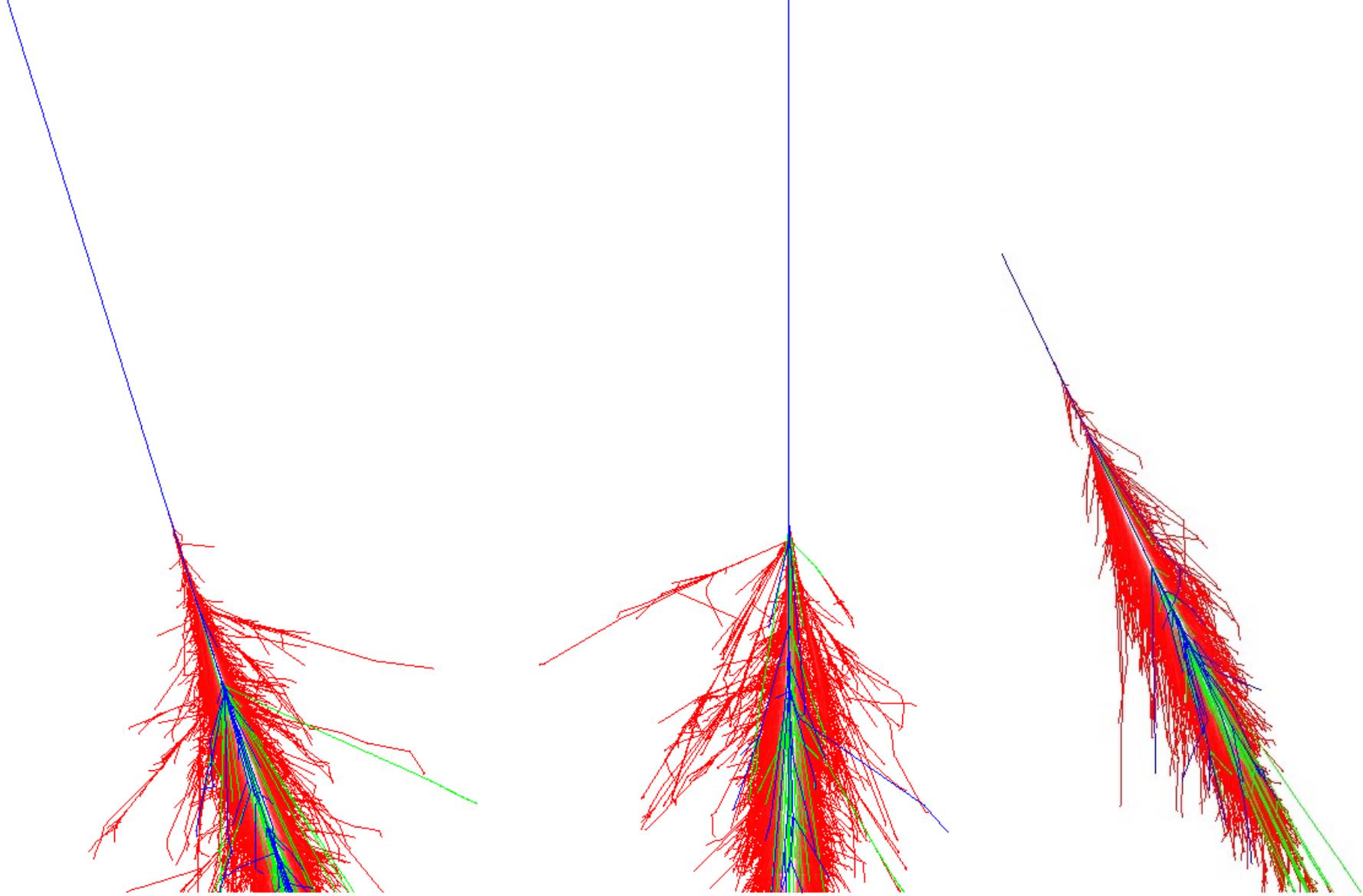


$$X_{\text{máx}}^A \simeq X_{\text{máx}}^p - (28 \ln A) \text{ g/cm}^2$$

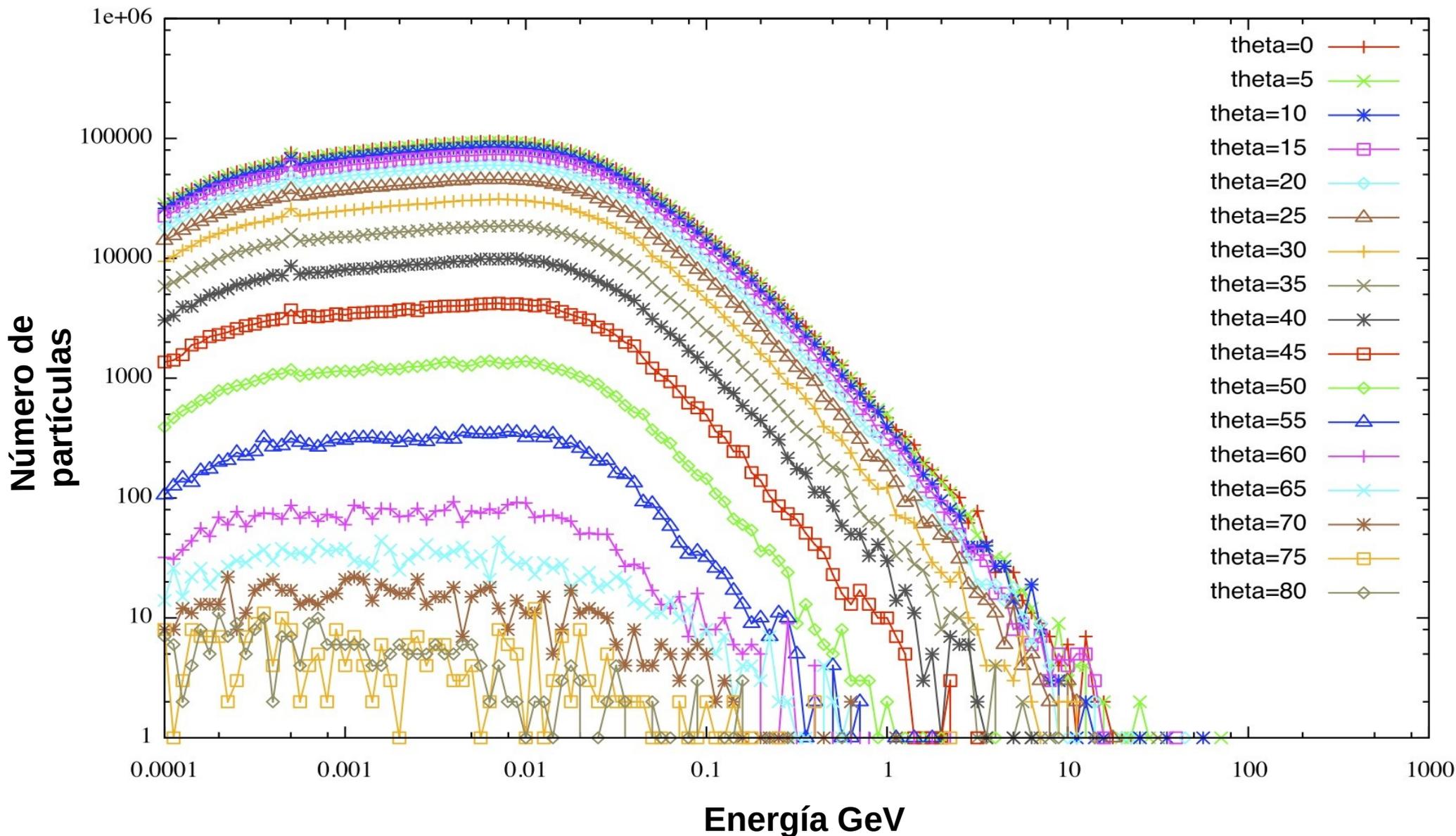
$$X_{\text{máx}}^p \simeq X_{\text{máx}}^{\text{EM}} - 120 \text{ g/cm}^2$$

$$X_{\text{máx}}^{\text{EM}} \simeq \left( 600 + 85 \log_{10} \frac{E_p}{1 \text{ PeV}} \right) \text{ g/cm}^2$$

# Efecto cenital

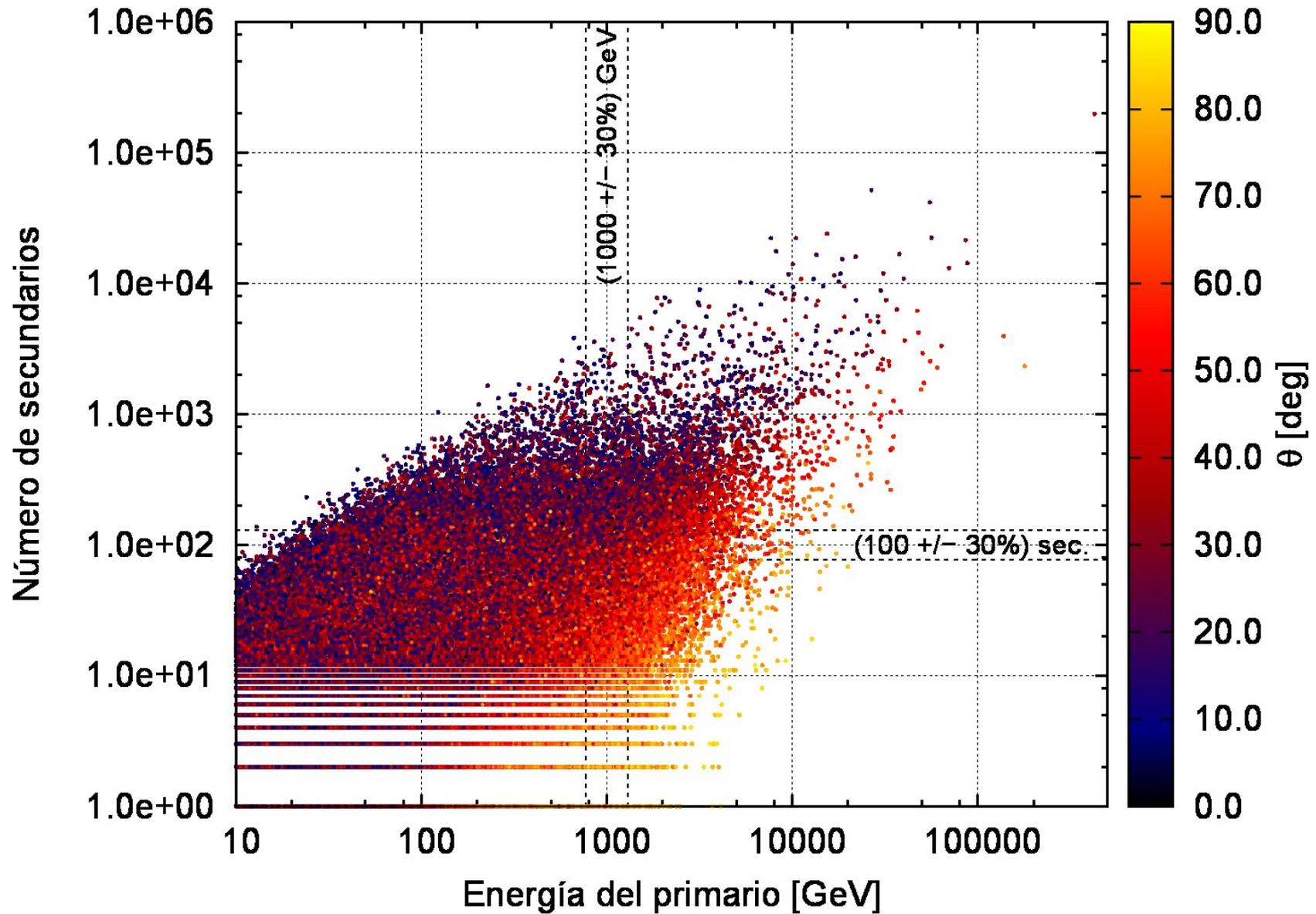


# Histograma de frecuencia para las energías de los fotones simulados para 3500 m.s.n.m.

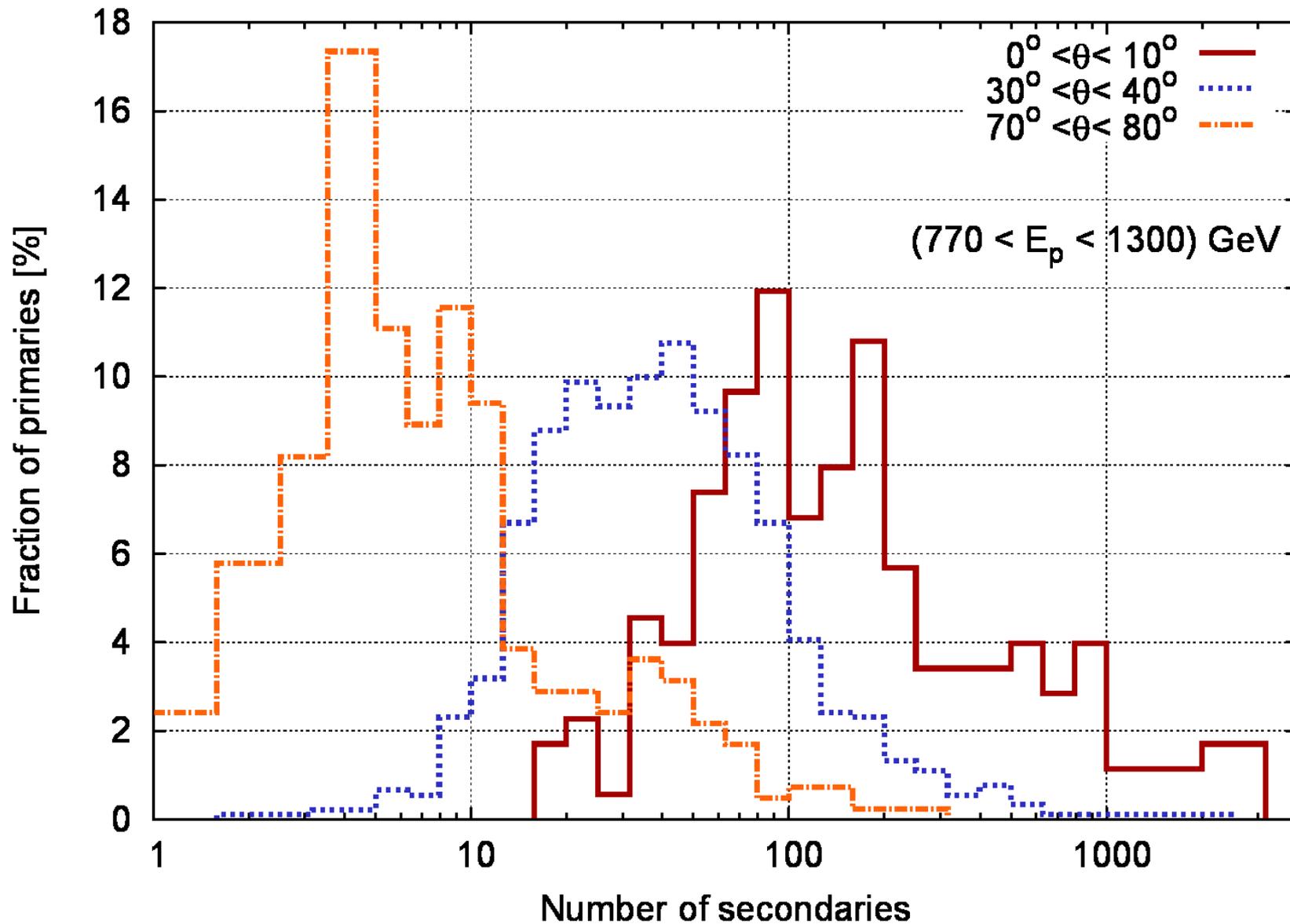


Histograma de frecuencia del numero de los fotones secundarios de una lluvia iniciada por un fotón de 130 GeV respecto a su energía. Cada linea corresponde a 5000 lluvias simuladas en CORSIKA.

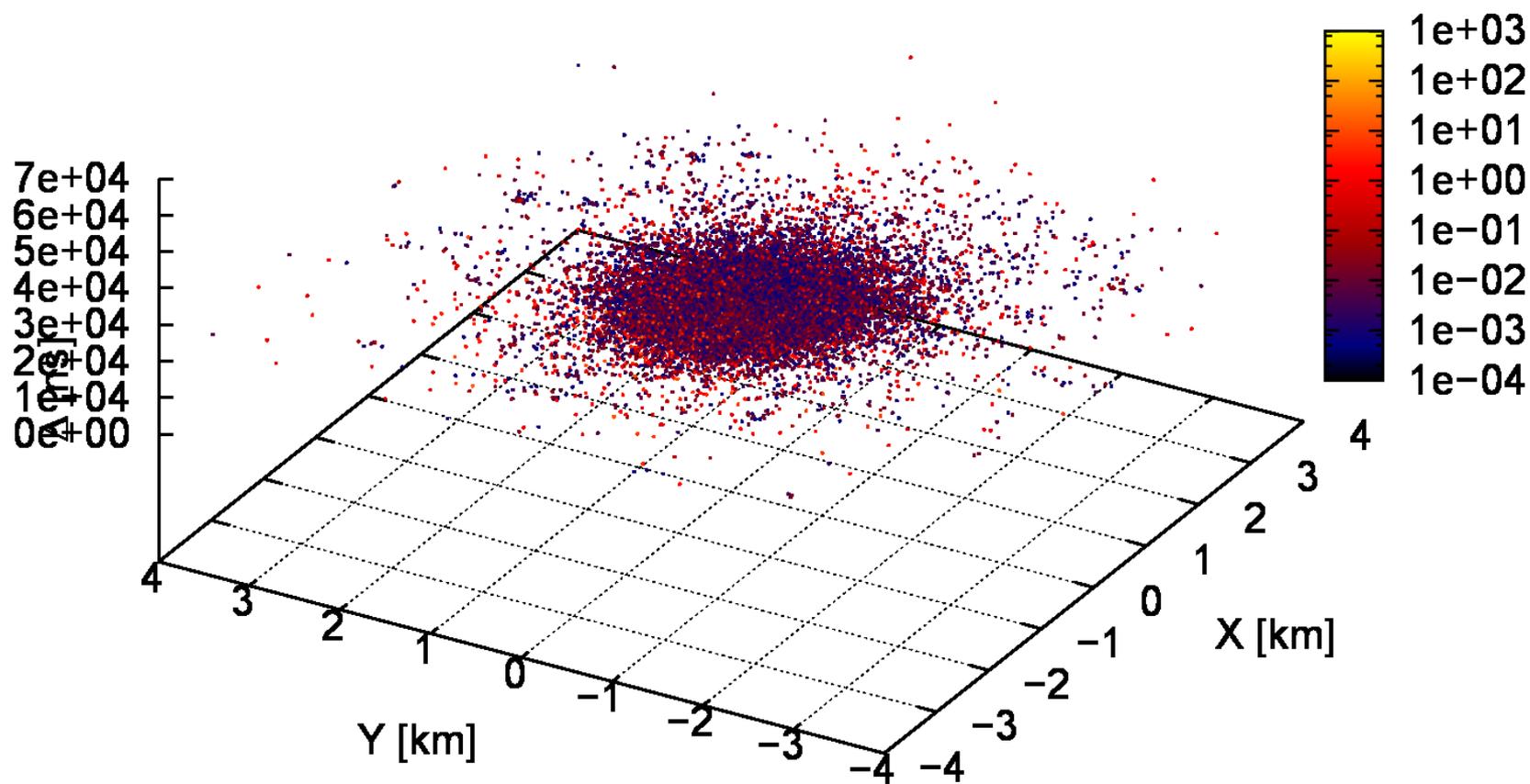
# Efecto de la absorción atmosférica



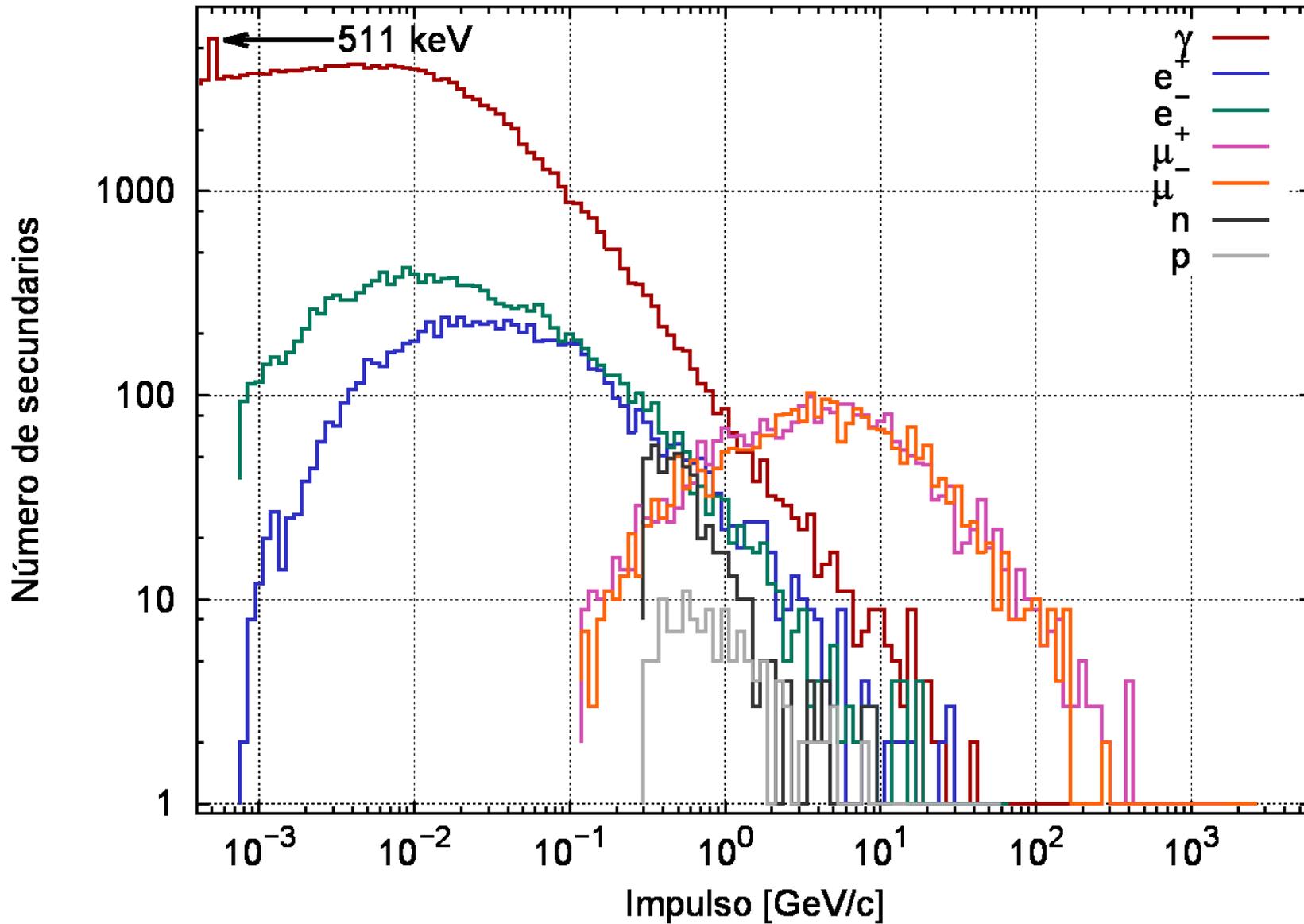
# Mayor absorción a ángulos grandes



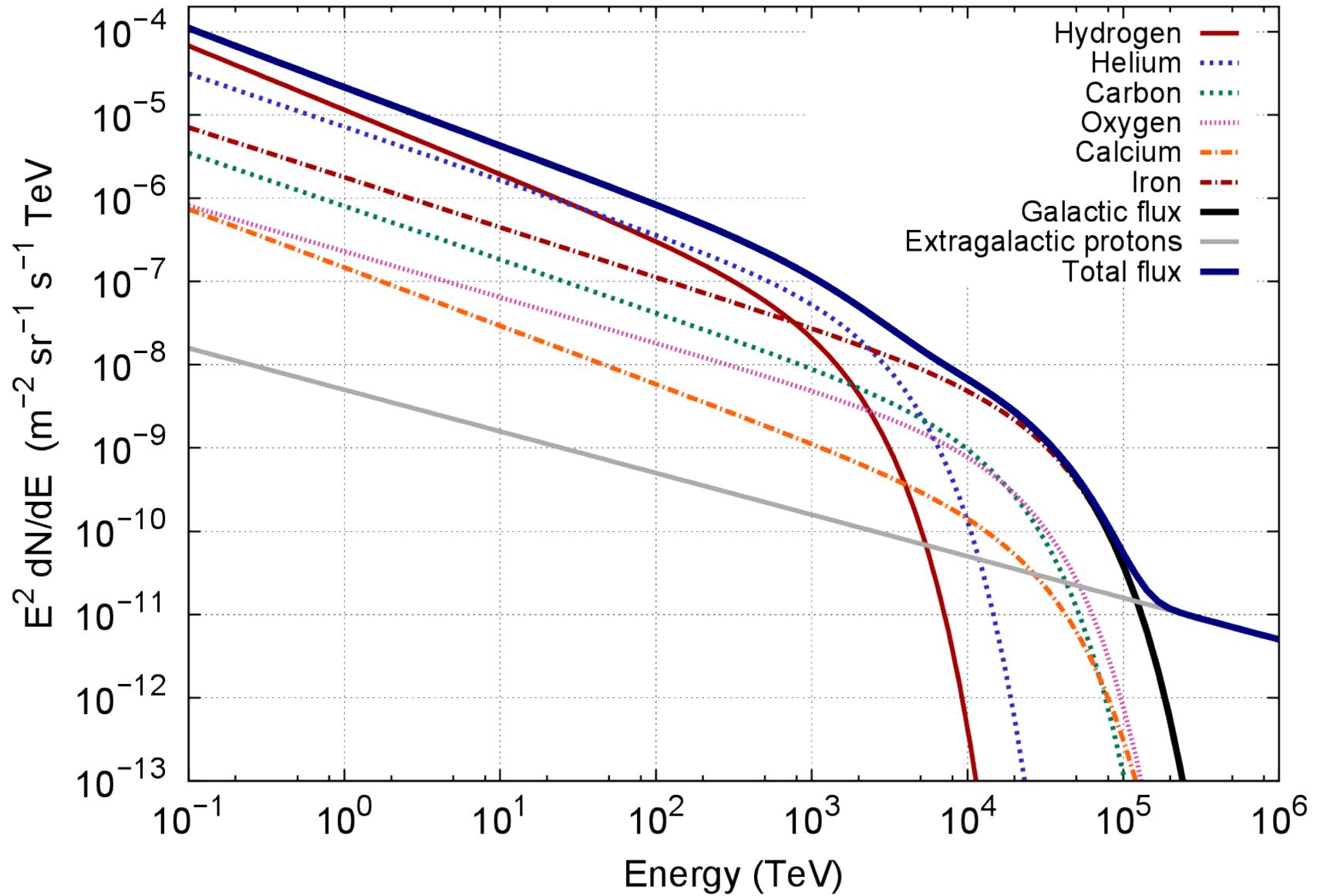
$^1\text{H}_1$ ,  $E=425 \text{ TeV}$ ,  $\theta=37^\circ$ ,  $\phi=168.7^\circ$  ...



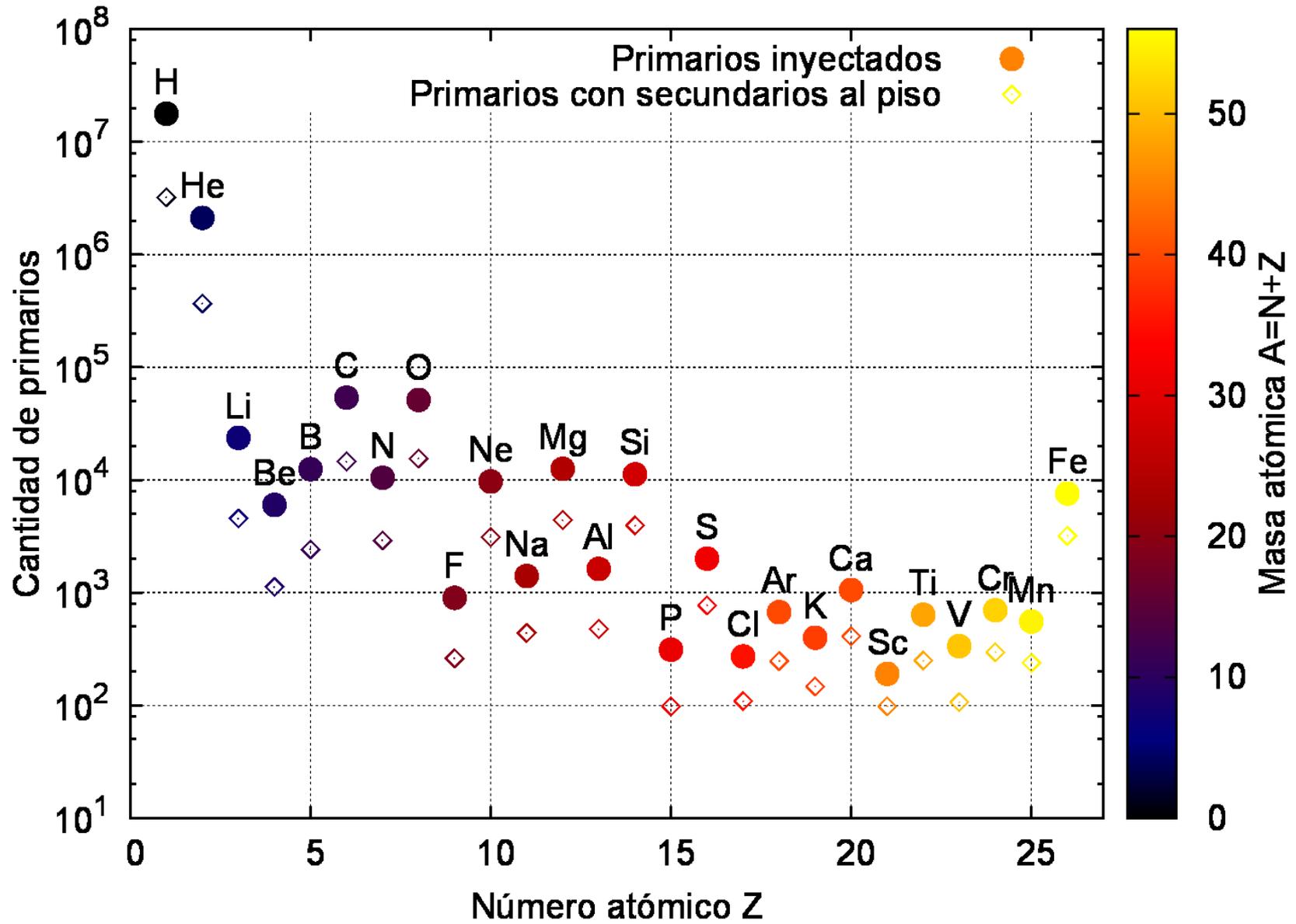
# Distribución de secundarios, $^1\text{H}$ , 425 TeV

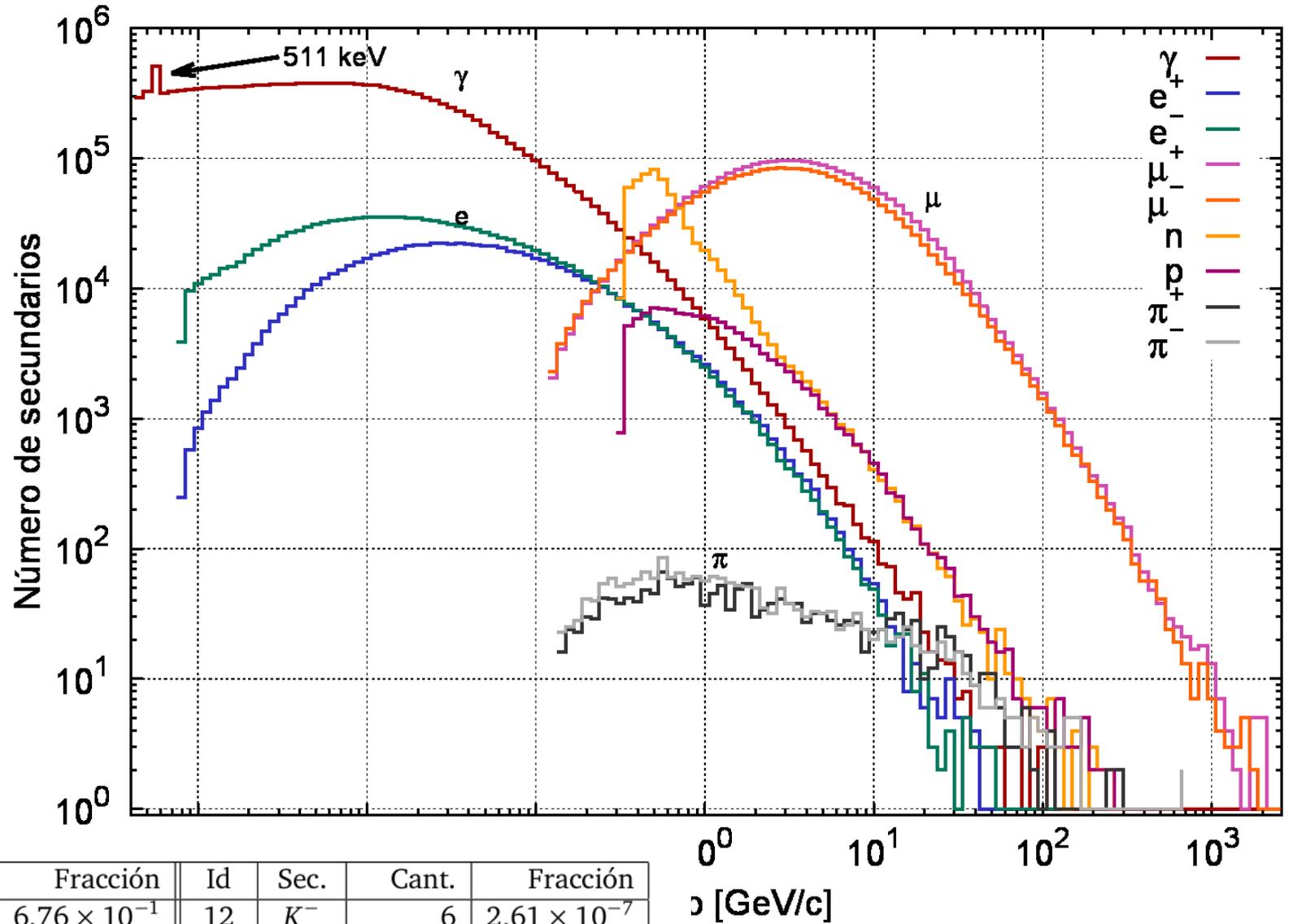
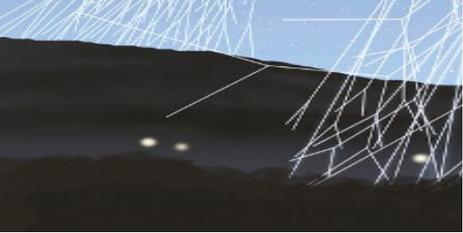


# Fondo de radiación



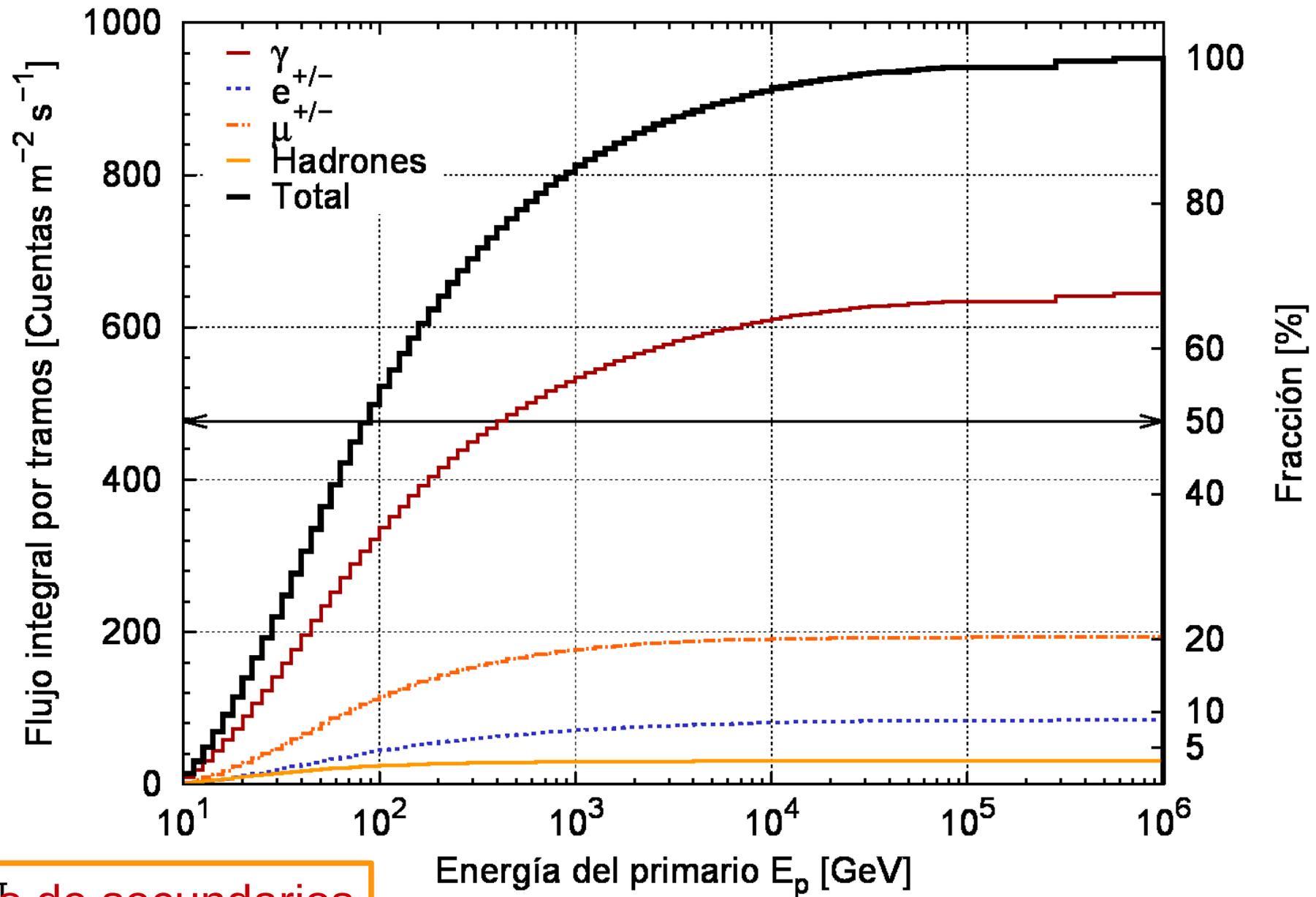
# Primarios y secundarios





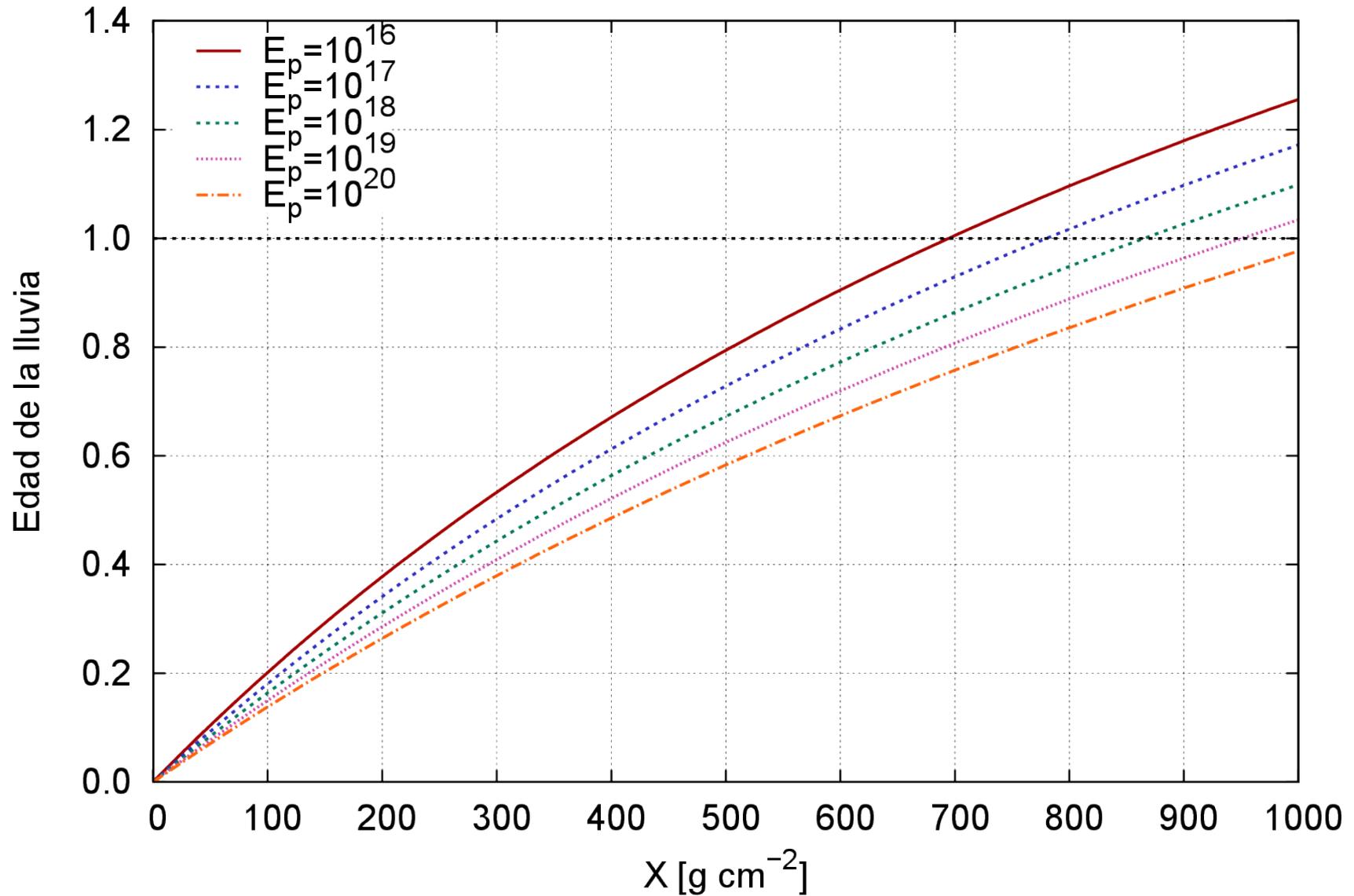
Id.	Sec.	Cant.	Fracción	Id	Sec.	Cant.	Fracción
1	$\gamma$	15535052	$6,76 \times 10^{-1}$	12	$K^-$	6	$2,61 \times 10^{-7}$
2	$e^+$	751113	$3,27 \times 10^{-2}$	13	$n$	617949	$2,69 \times 10^{-2}$
3	$e^-$	1304011	$5,67 \times 10^{-2}$	14	$p$	116291	$5,06 \times 10^{-3}$
5	$\mu^+$	2491493	$1,08 \times 10^{-1}$	15	$\bar{p}$	104	$4,52 \times 10^{-6}$
6	$\mu^-$	2176153	$9,46 \times 10^{-2}$	18	$\Lambda$	1	$4,35 \times 10^{-8}$
7	$\pi^0$	1	$4,35 \times 10^{-8}$	25	$\bar{n}$	159	$6,91 \times 10^{-6}$
8	$\pi^+$	1738	$7,56 \times 10^{-5}$	201	${}^2\text{H}_1$	99	$4,31 \times 10^{-6}$
9	$\pi^-$	1980	$8,61 \times 10^{-4}$	301	${}^3\text{H}_1$	10	$4,35 \times 10^{-7}$
10	$K_L^0$	45	$1,96 \times 10^{-6}$	302	${}^3\text{He}_2$	1	$4,35 \times 10^{-8}$
11	$K^+$	16	$6,96 \times 10^{-7}$	402	${}^4\text{He}_2$	3	$1,30 \times 10^{-7}$

# Primarios y secundarios

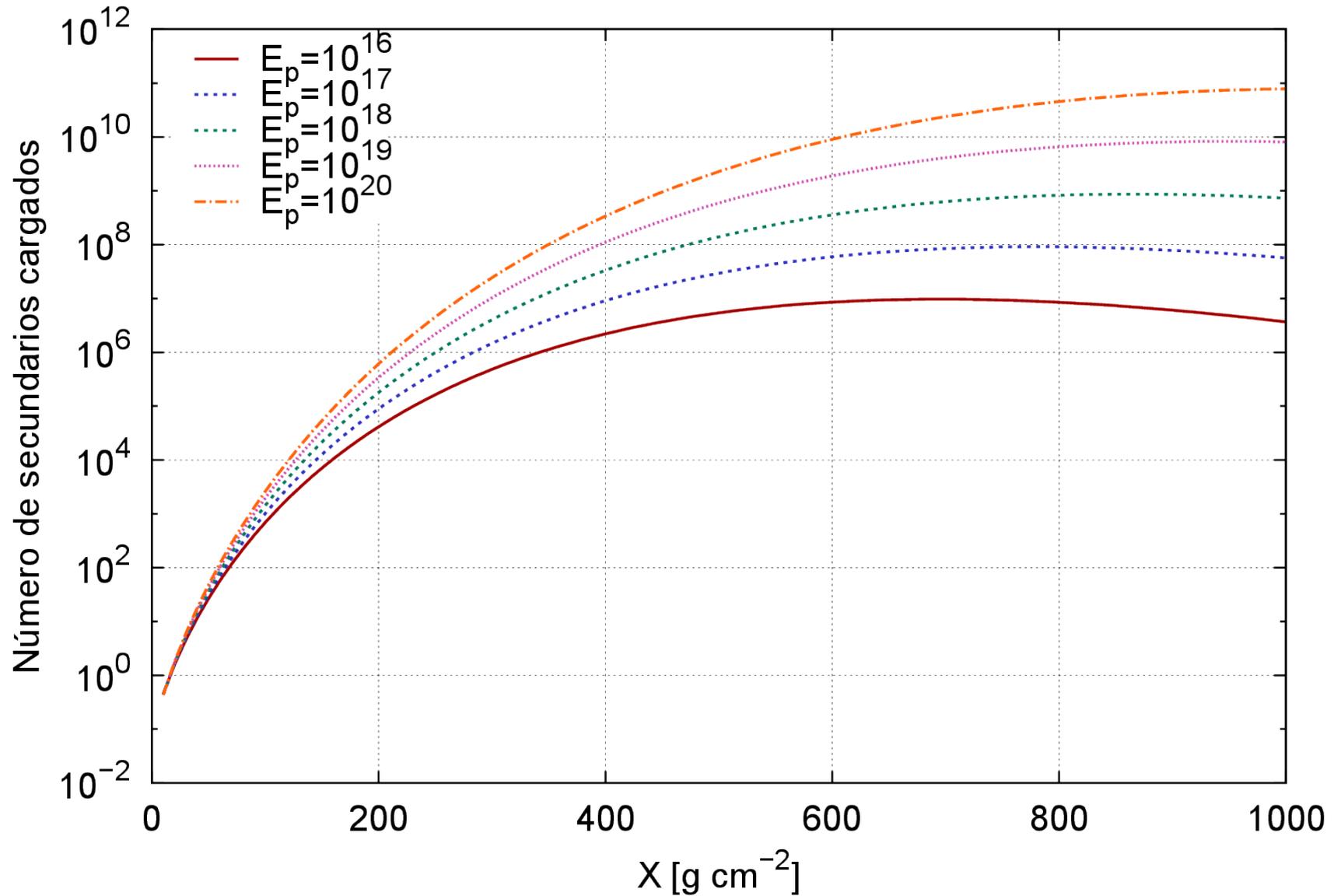


Flujo de secundarios

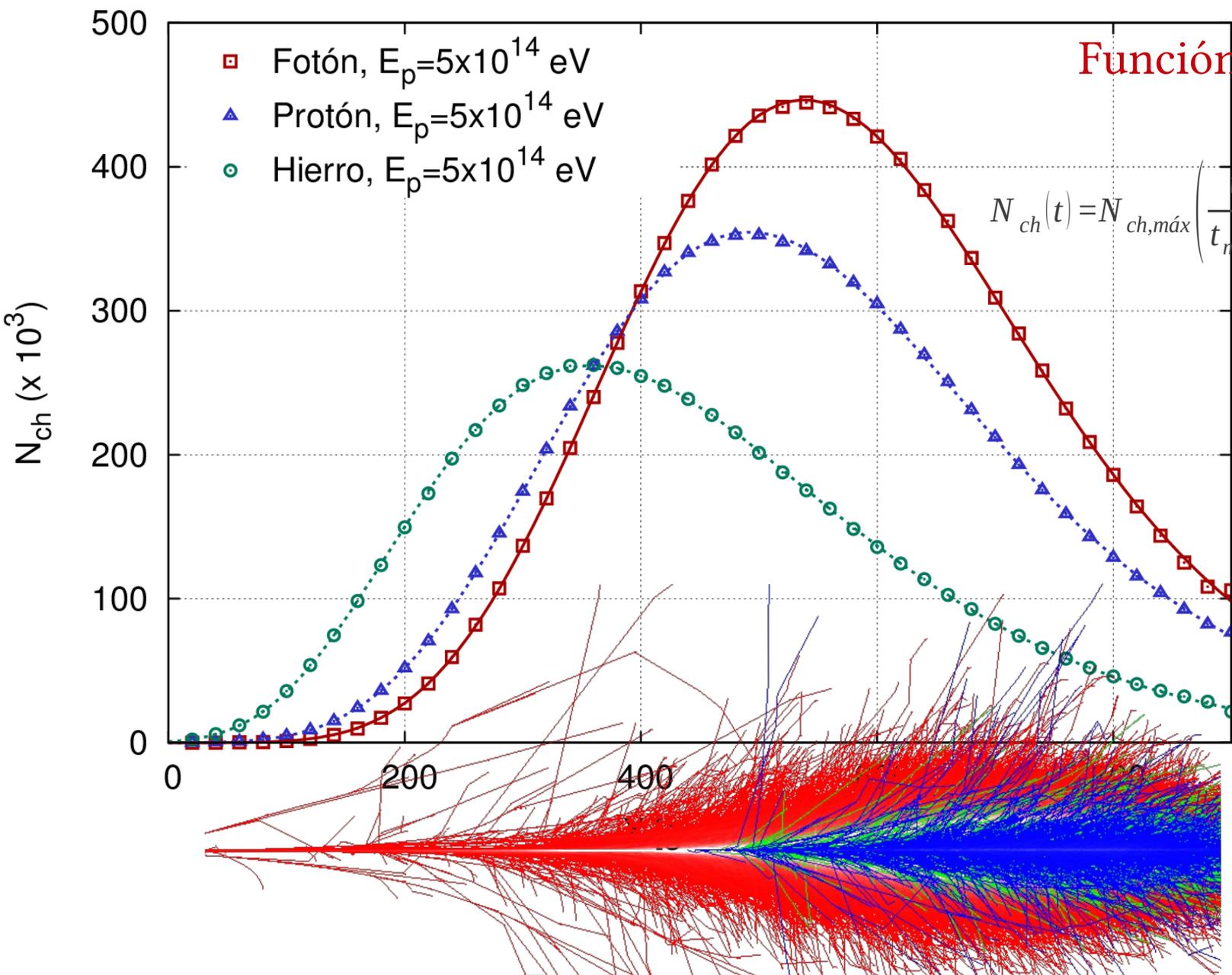
# Edad de la lluvia EM



# Número de partículas cargadas (EM)



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

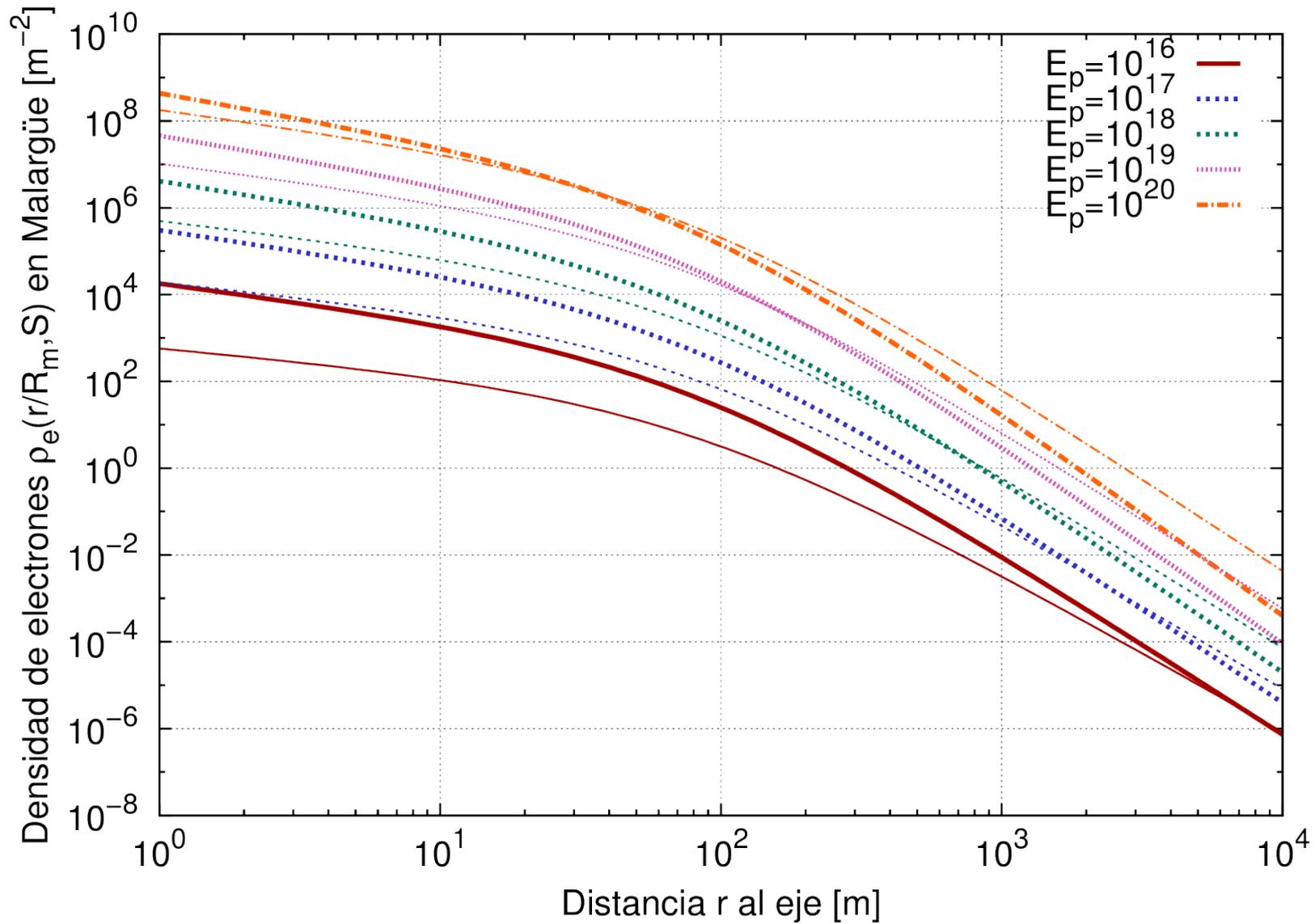


Función de Gaisser-Hillas

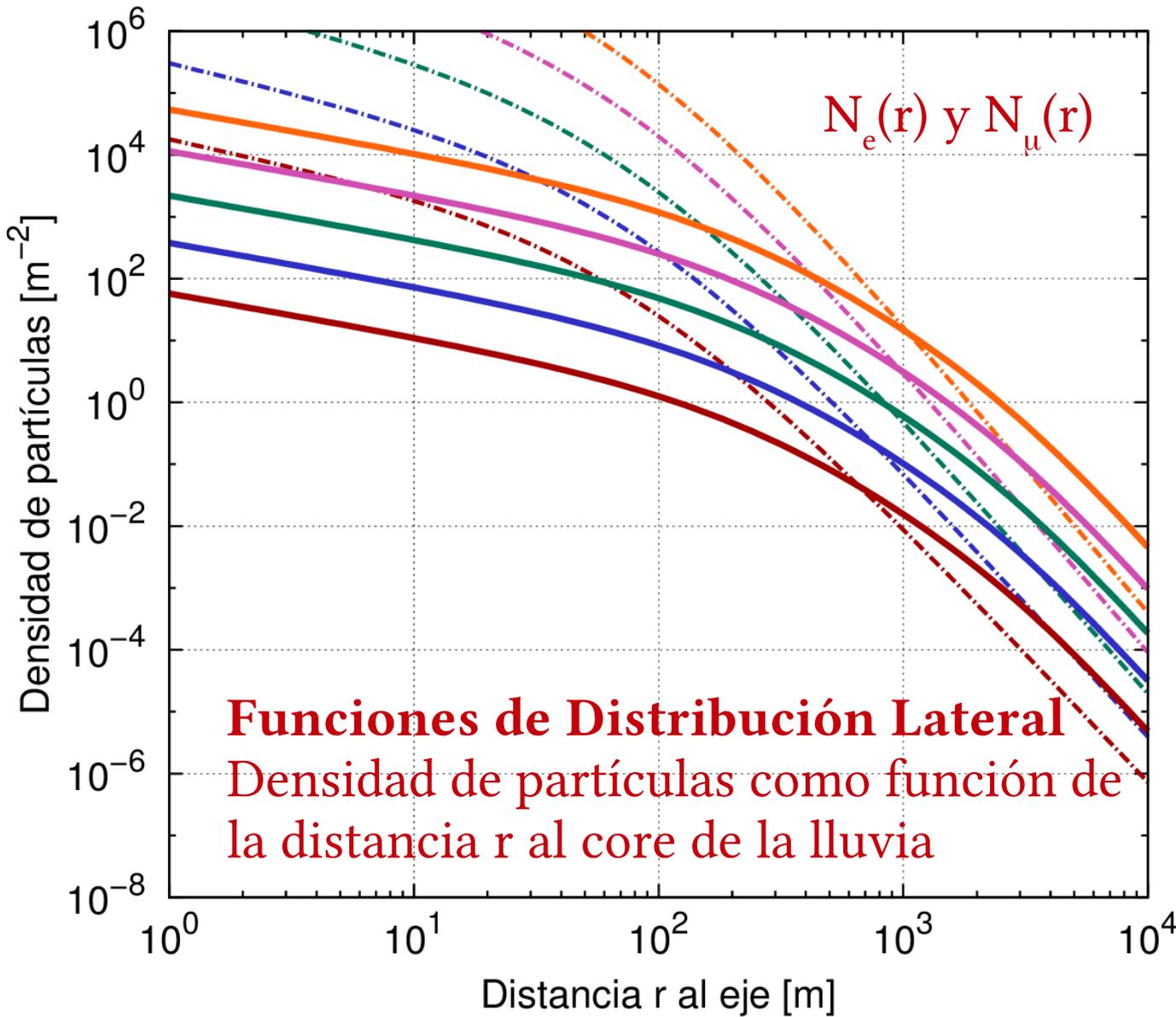
$$N_{ch}(t) = N_{ch,m\acute{a}x} \left( \frac{t-t_0}{t_{max}-t_0} \right)^{f(t)(t_{max}-t_0)} e^{-f(t)(t_{max}-t_0)}$$

$$f(t) = \frac{1}{\sum a_j t^j}$$

# LDF de NKG para lluvias EM

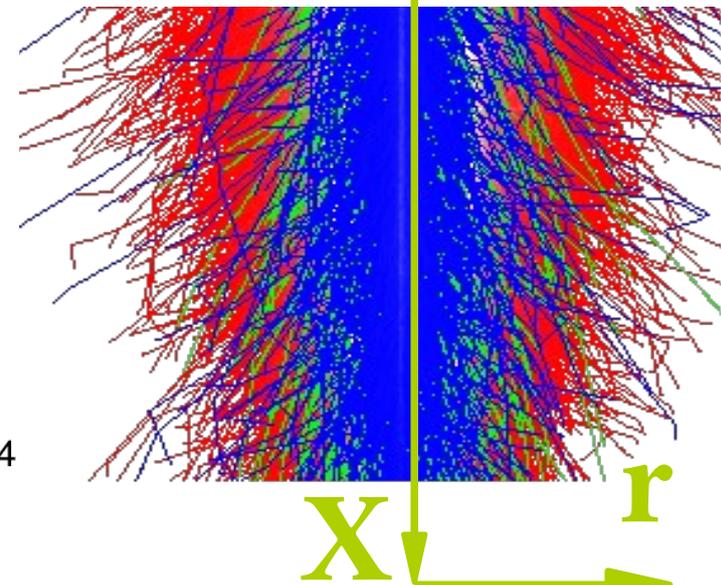


# LDF: Desarrollo transversal



**Funciones de Distribución Lateral**  
Densidad de partículas como función de la distancia r al core de la lluvia

- N<sub>e</sub>(10<sup>16</sup>)
- (10<sup>17</sup>)
- (10<sup>18</sup>)
- (10<sup>19</sup>)
- (10<sup>20</sup>)
- N<sub>μ</sub>(10<sup>16</sup>)
- (10<sup>17</sup>)
- (10<sup>18</sup>)
- (10<sup>19</sup>)
- (10<sup>20</sup>)

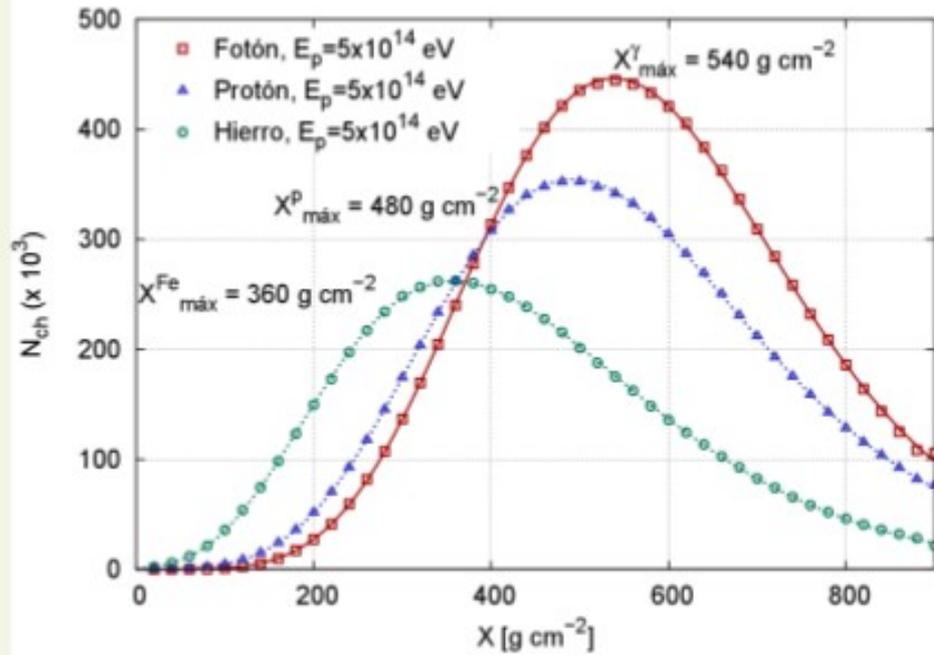


$$E_d^{\text{atm}} + E_d^{\text{suelo}} = E_p$$

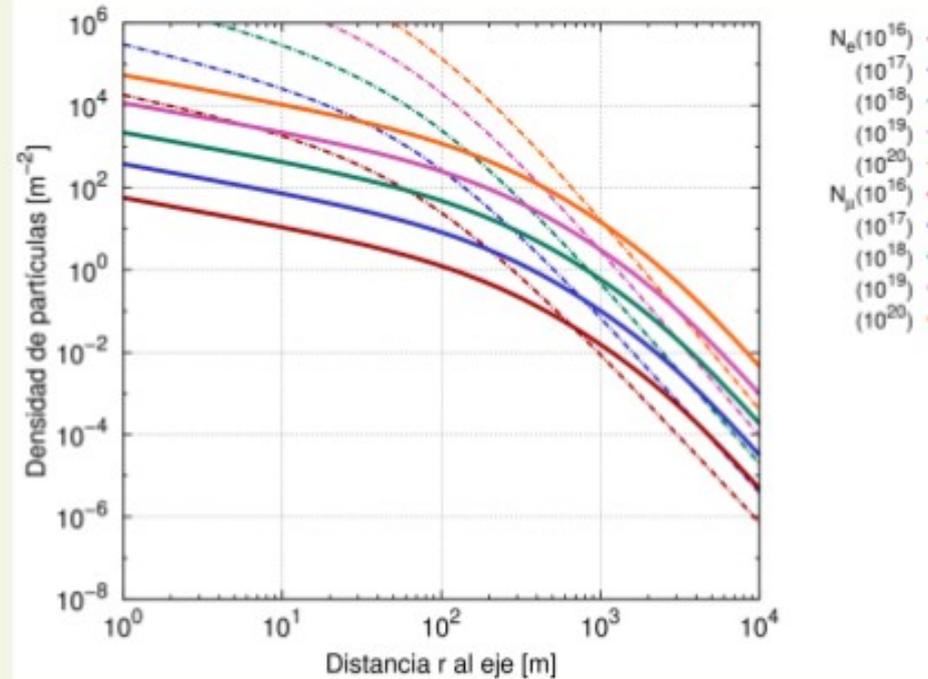
Desarrollo Longitudinal y Transversal

# La energía se conserva

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



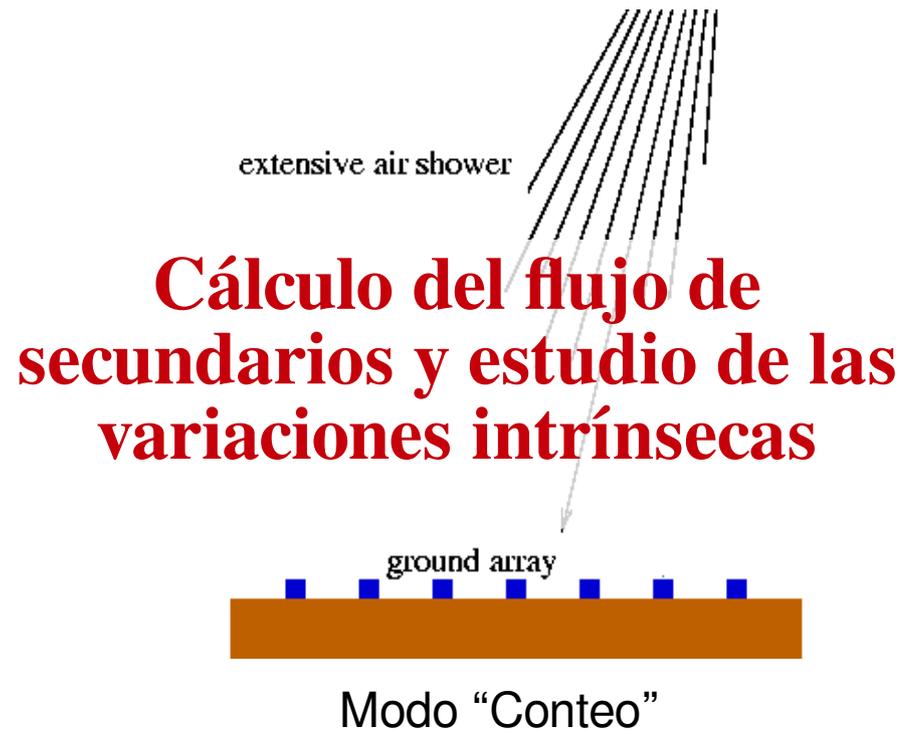
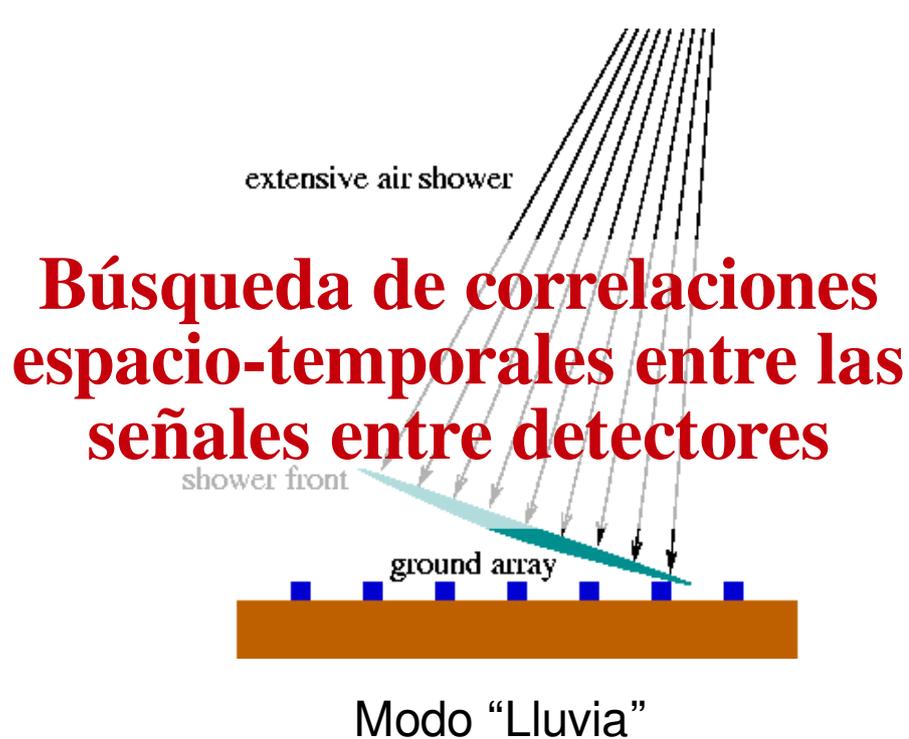
$E_d^{\text{suelo}} \rightarrow$  LDF:  $\rho_e(r)$  y  $\rho_{\mu}(r)$



- Desarrollo longitudinal
- $N_{ch}(X) \propto E_d(X)$

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

# Técnicas de detección en Superficie



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