



Escuela José Antonio Balseiro 2016

Nuevas Tendencias en Investigación en Física Médica

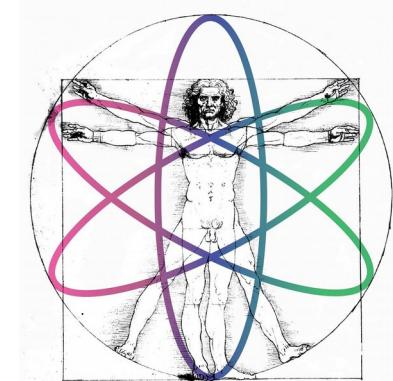
Introducción a muchas cosas

Viernes: Interacción de la radiación y Detectores

Hernán Asorey

asoreyh@cab.cnea.gov.ar

Laboratorio Detección Partículas y Radiación
Centro Atómico Bariloche



 asoreyh	Clase 01 lista	Latest commit db0d282 2 days ago
 clases	Clase 01 lista	2 days ago
 README.md	Commit inicial	4 days ago



Curso de Introducción a Física Nuclear y Detectores

Escuela José Antonio Balseiro - Nuevas Tendencias en Investigación en Física Médica

Octubre 2016 - Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro

(C) 2016 - Hernán Asorey ([@asoreyh](https://github.com/asoreyh))



Este trabajo se distribuye en forma gratuita bajo la [Licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



Aceleradores





Radio de giro

- La componente magnética de la fuerza de Lorentz es perpendicular a la dirección de movimiento:

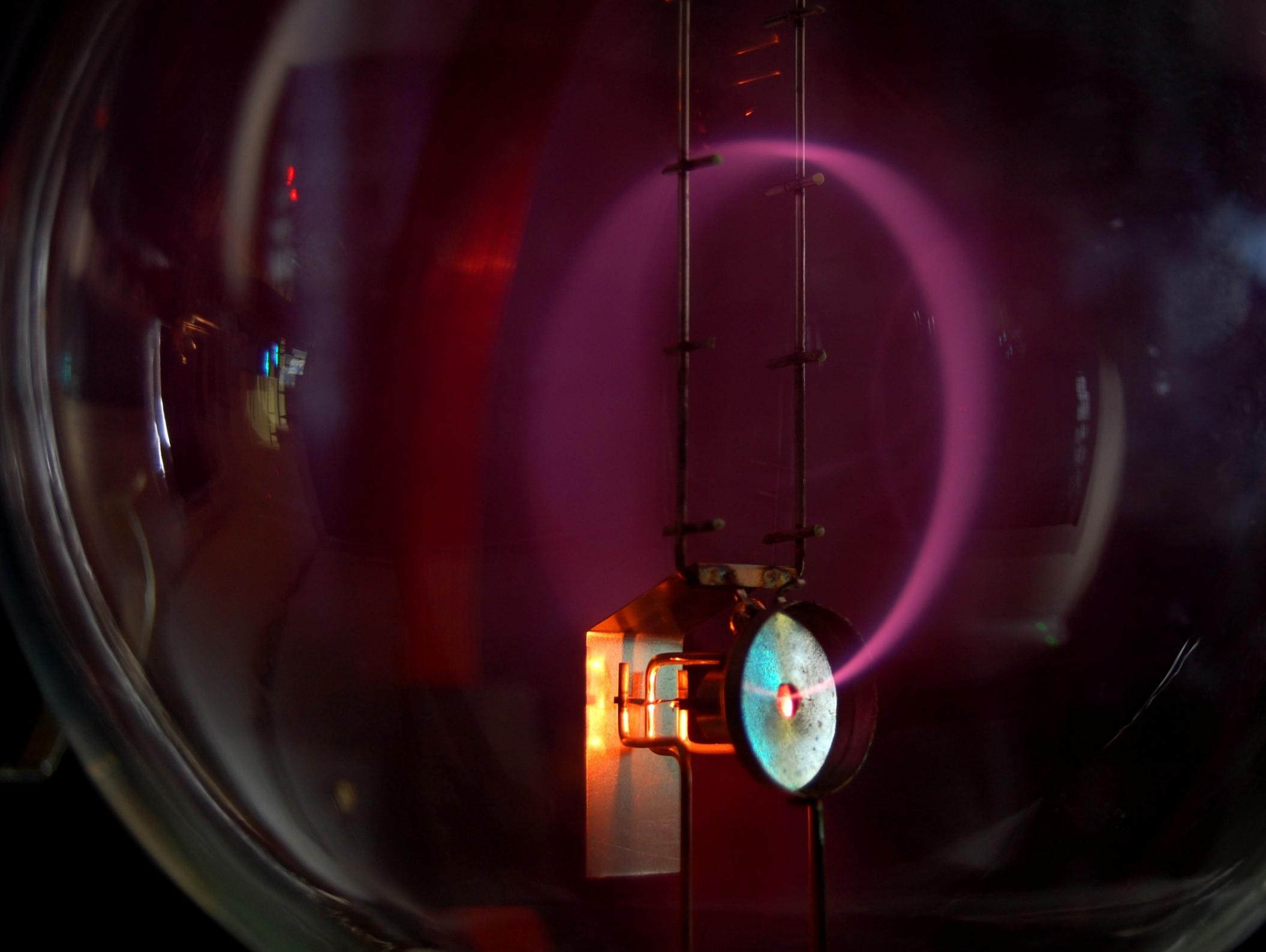
$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

- Movimiento circular, aceleración centrípeta (¡usar γm para el caso relativista! Gracias Feynmann)

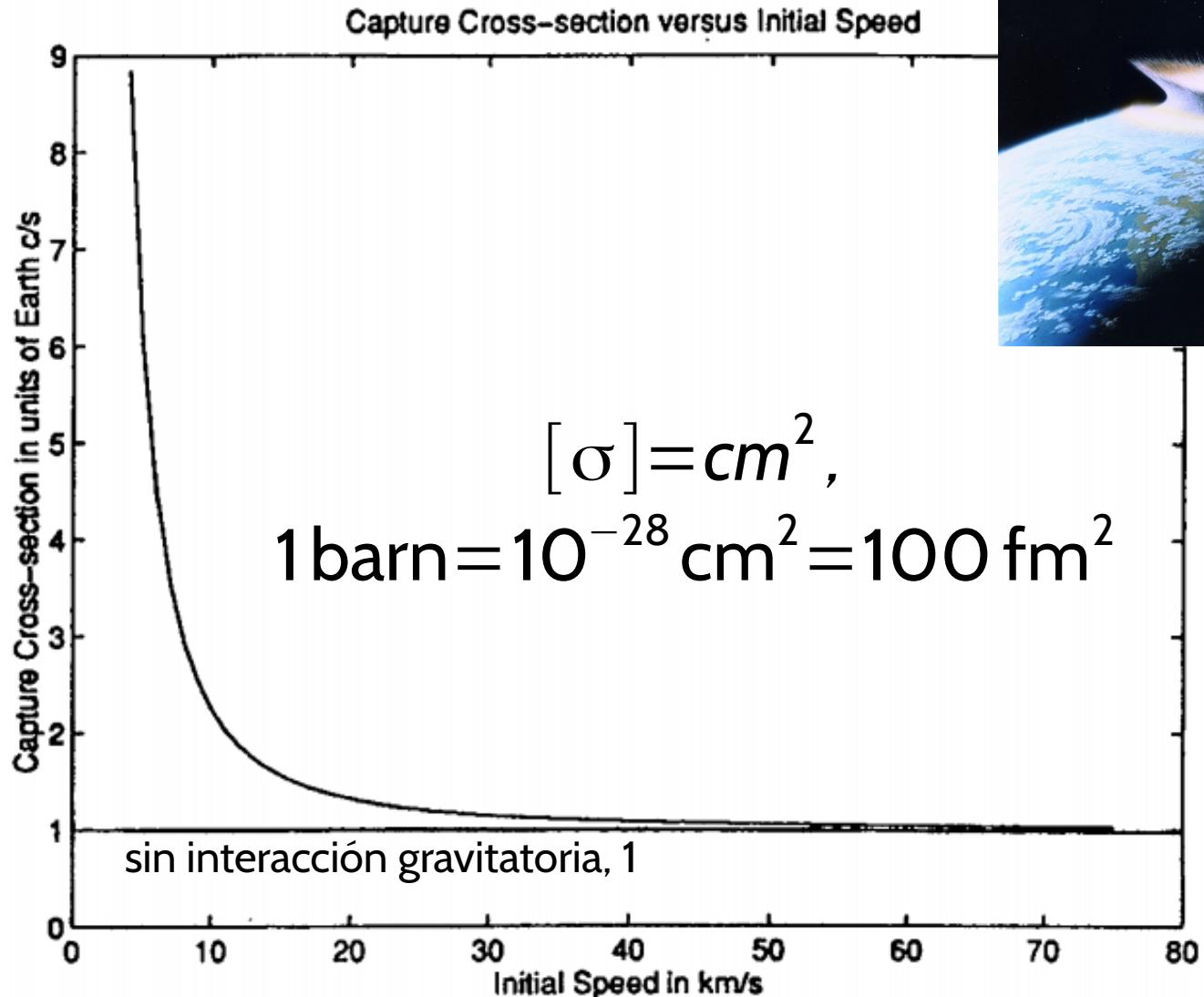
$$r_g = \left(\frac{\gamma m}{|q|} \right) \left(\frac{v_{\perp}}{B} \right)$$

- El período es entonces:

$$t_g = \frac{2\pi\gamma m}{|q|B}$$



Sección eficaz de captura de asteroides



Luminosidad de un acelerador

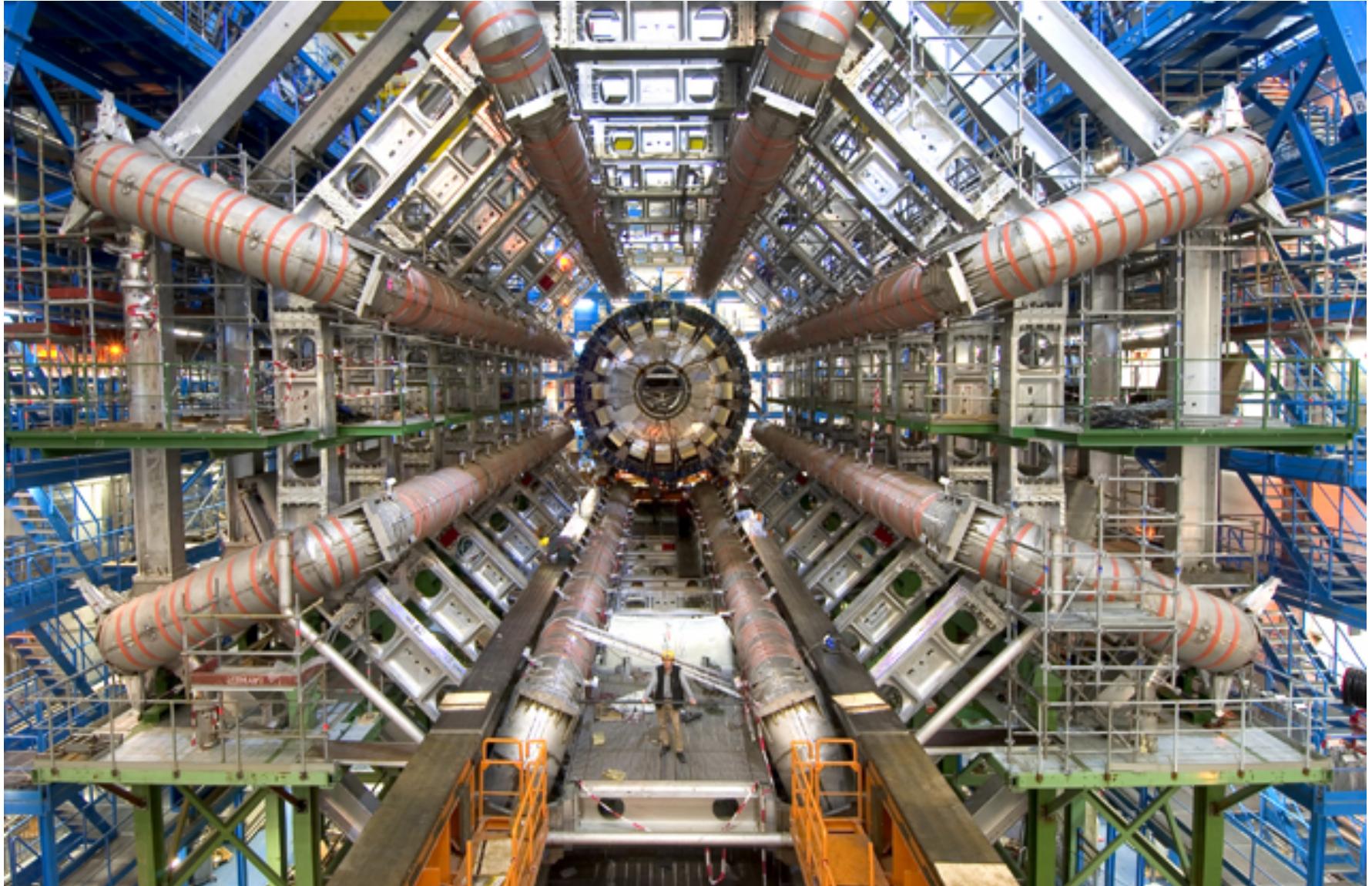
- Número de eventos **detectados** (N) como en un cierto tiempo (t) respecto a la sección eficaz de interacción (σ)

$$L = \frac{1}{\sigma} \frac{dN}{dt}, \quad [L] = \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

- La luminosidad integrada es la integral en el tiempo:

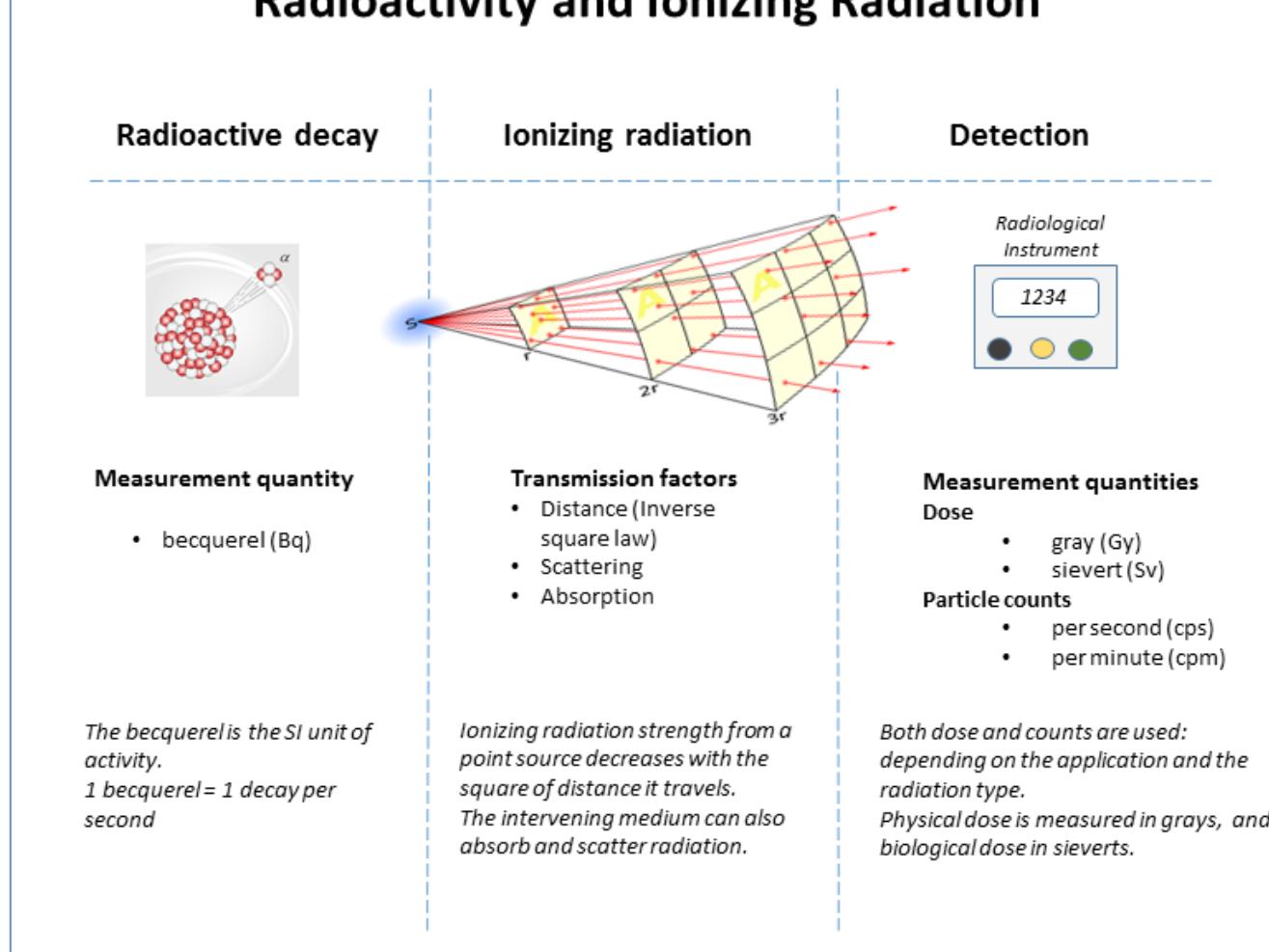
$$L_{\text{int}} = \int L dt, \quad [L_{\text{int}}] = \text{cm}^{-2}$$

Detectores, porque medir es interactuar



Radiación y Unidades

Radioactivity and Ionizing Radiation



- **Dosis efectiva, H**
considera el efecto sobre los distintos tipos de tejidos

- **Dosis absorbida, D**
Energía recibida en forma de radiación ionizante por un medio
 $[D_{R,T}] = \text{J/kg} = \text{Gy (gray)}$
(1 rad = 0.01 Gy)

- **Dosis equivalente, H_T**
Incluye el efecto biológico de los distintos tipos de radiación ionizante:

$$H_T = w_R D_{R,T},$$
$$[H_T] = \text{Sv (sievert)}$$
$$(1 \text{ rem} = 0.01 \text{ Sv})$$



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

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

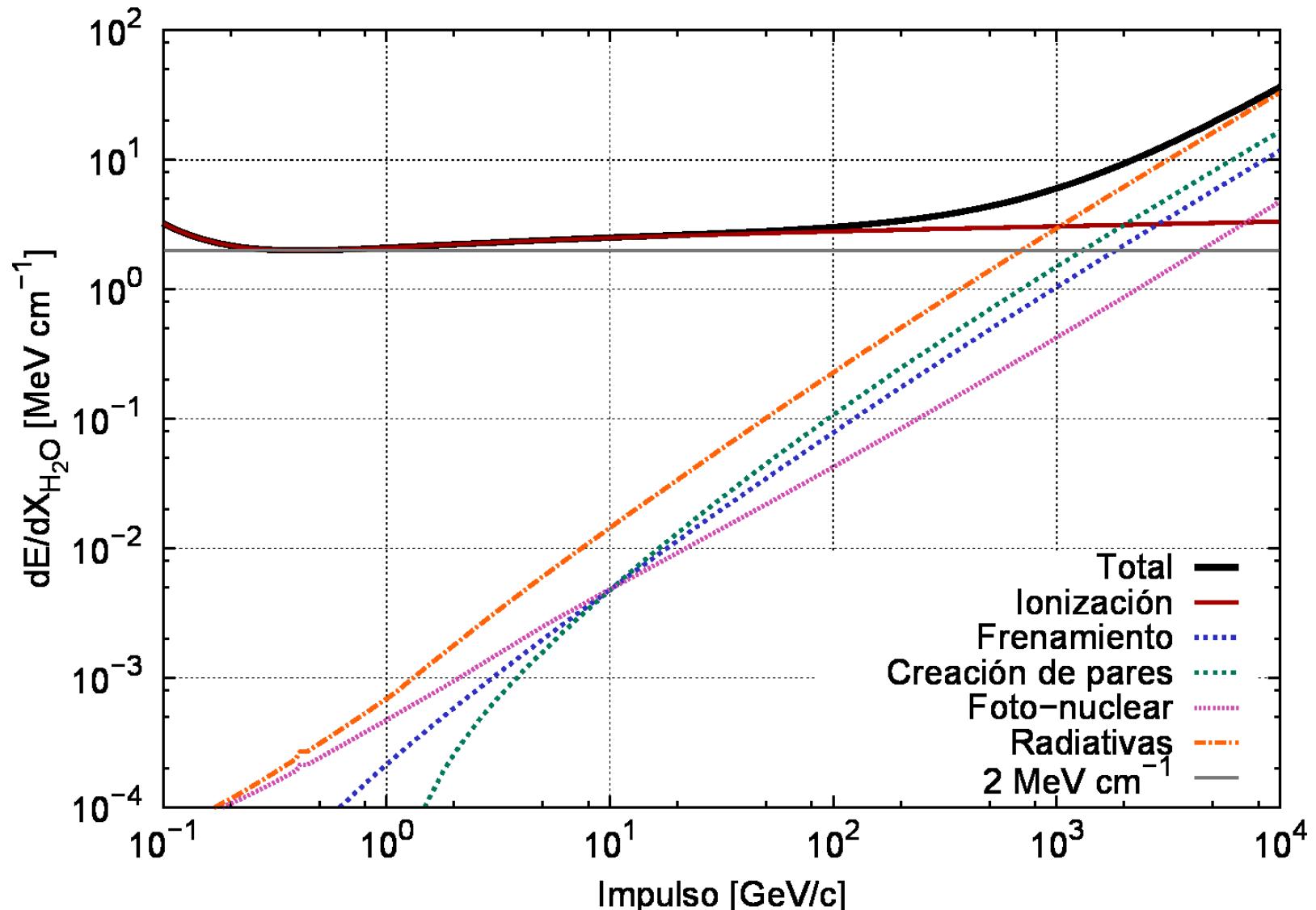
- Luego el **rango** recorrido depende de la energía inicial E_0 (CSDA: continuous slowing down approximation)

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

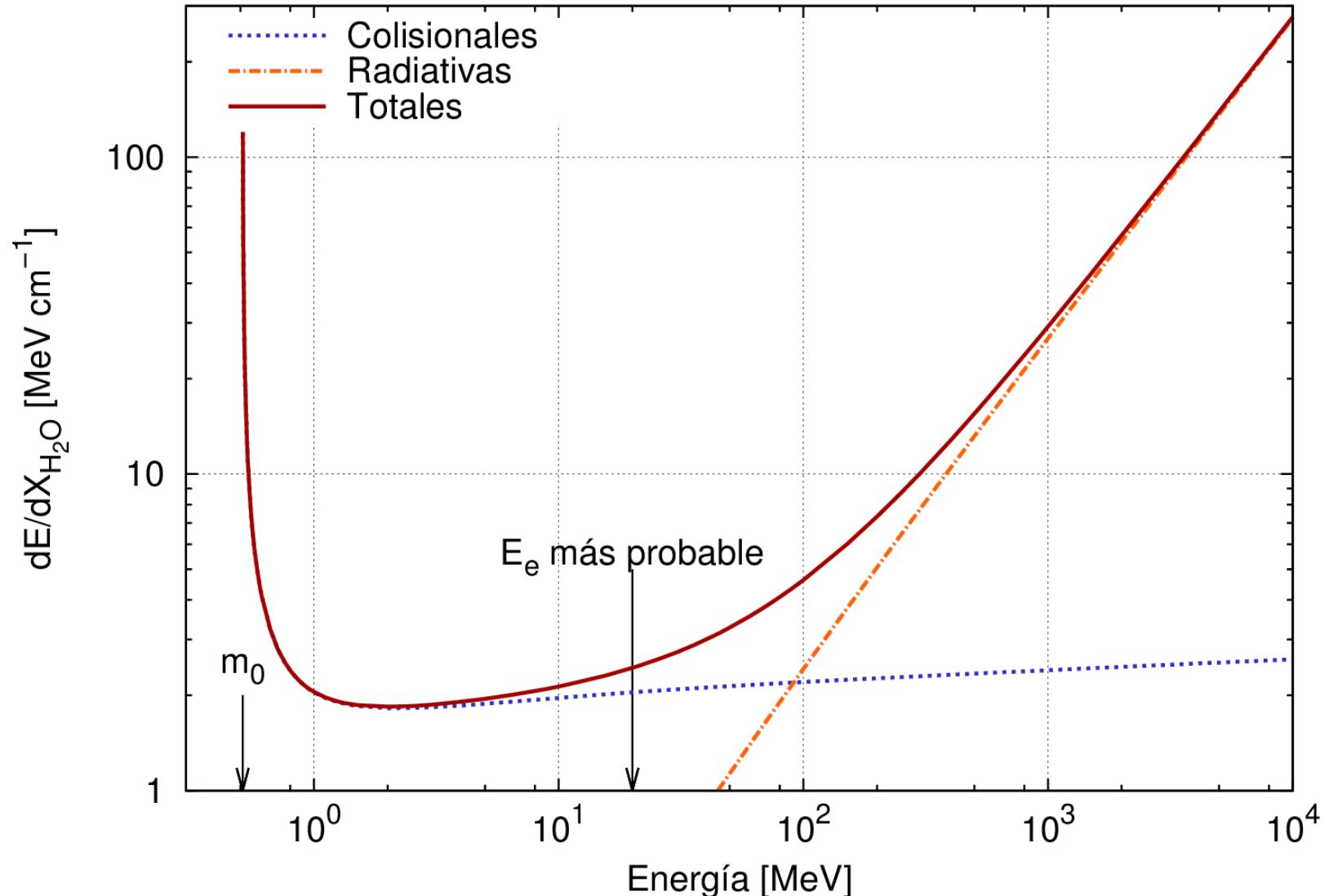
- X:

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

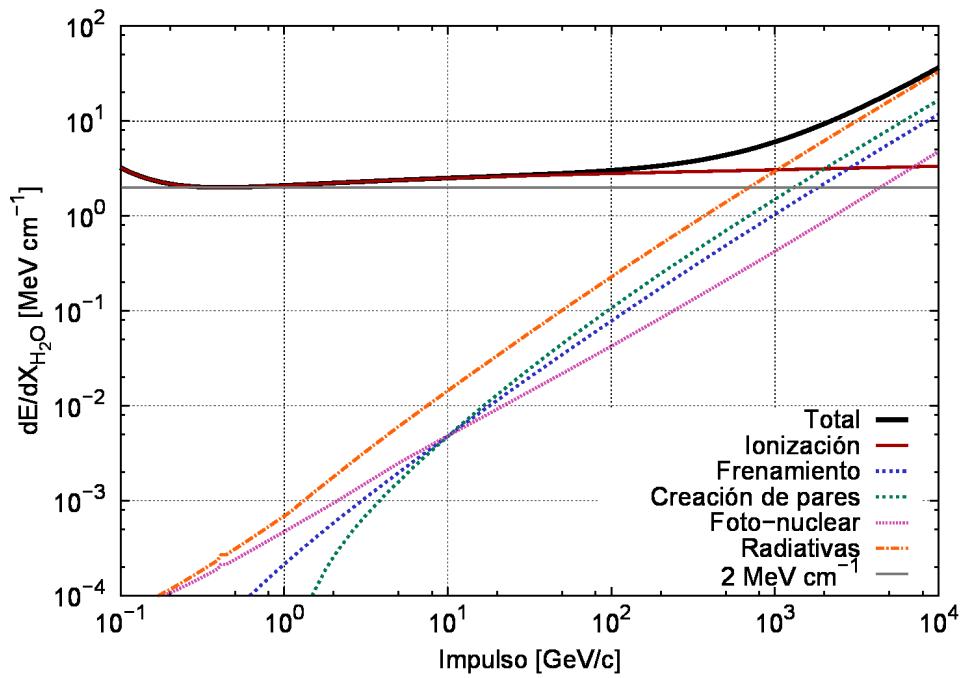
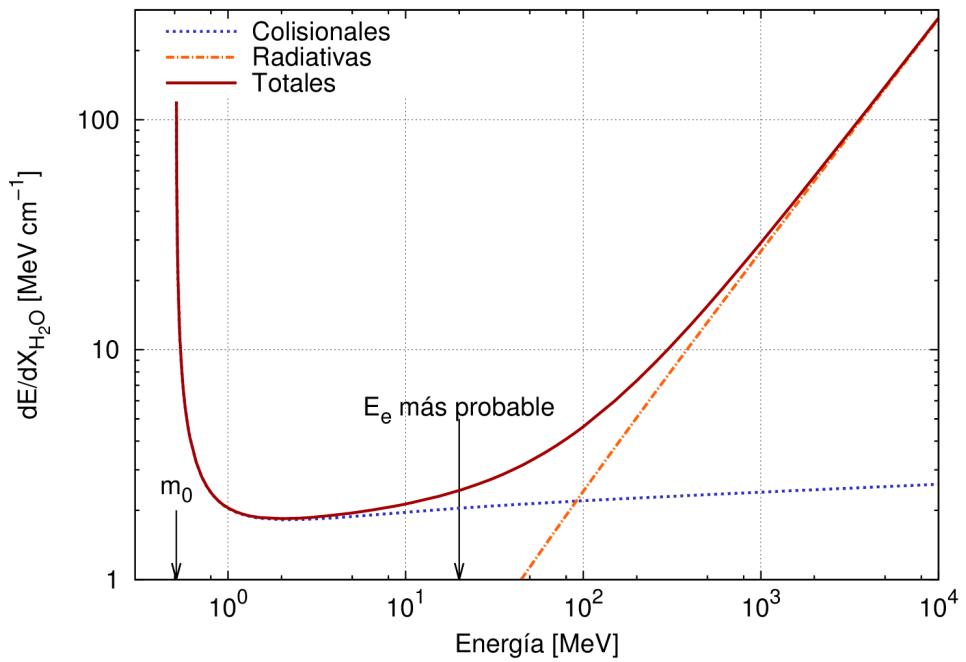
dE/dX muones en agua

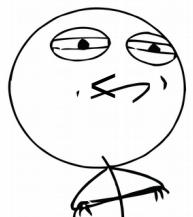


dE/dX electrones en agua



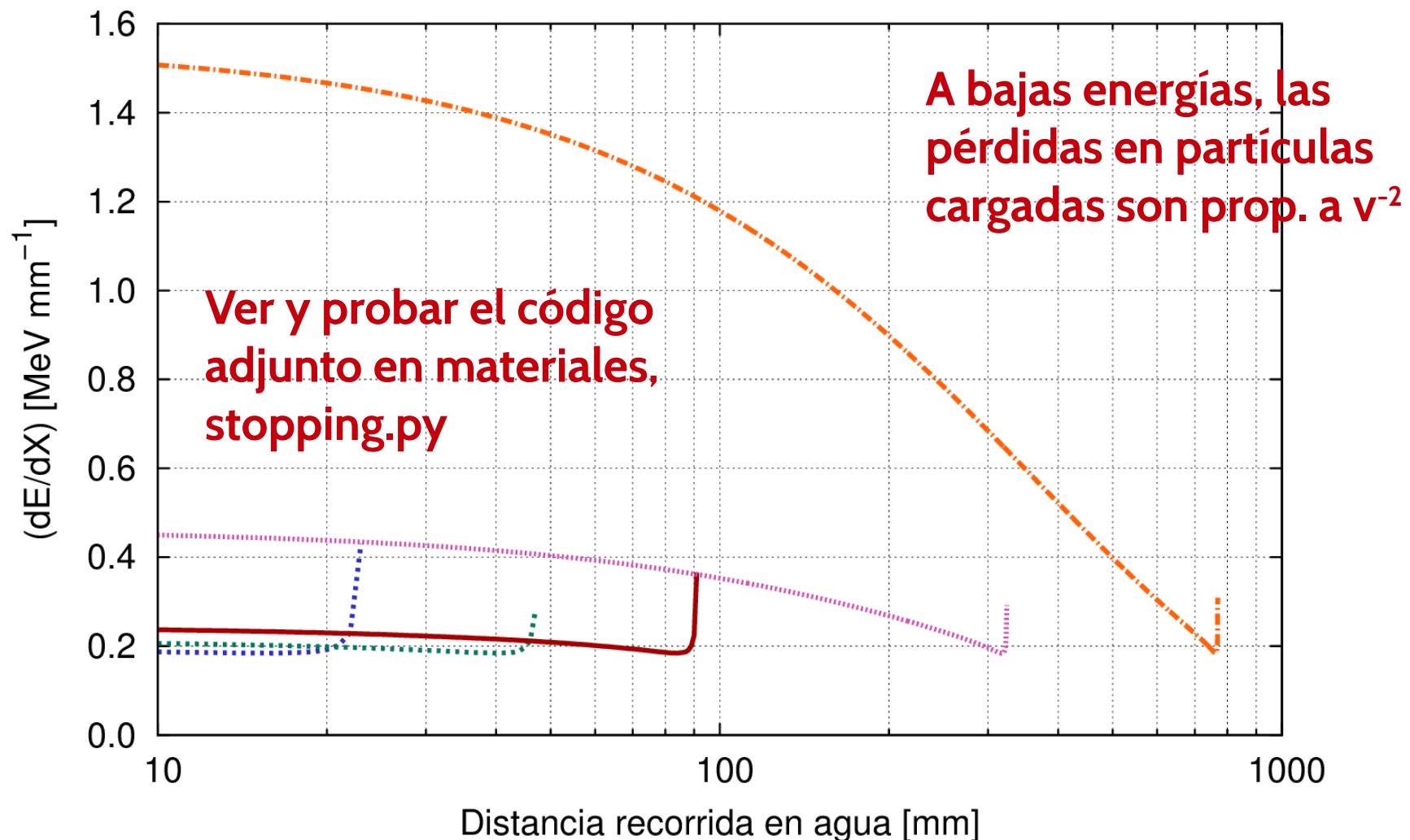
dE/dX electrones vs muones en agua





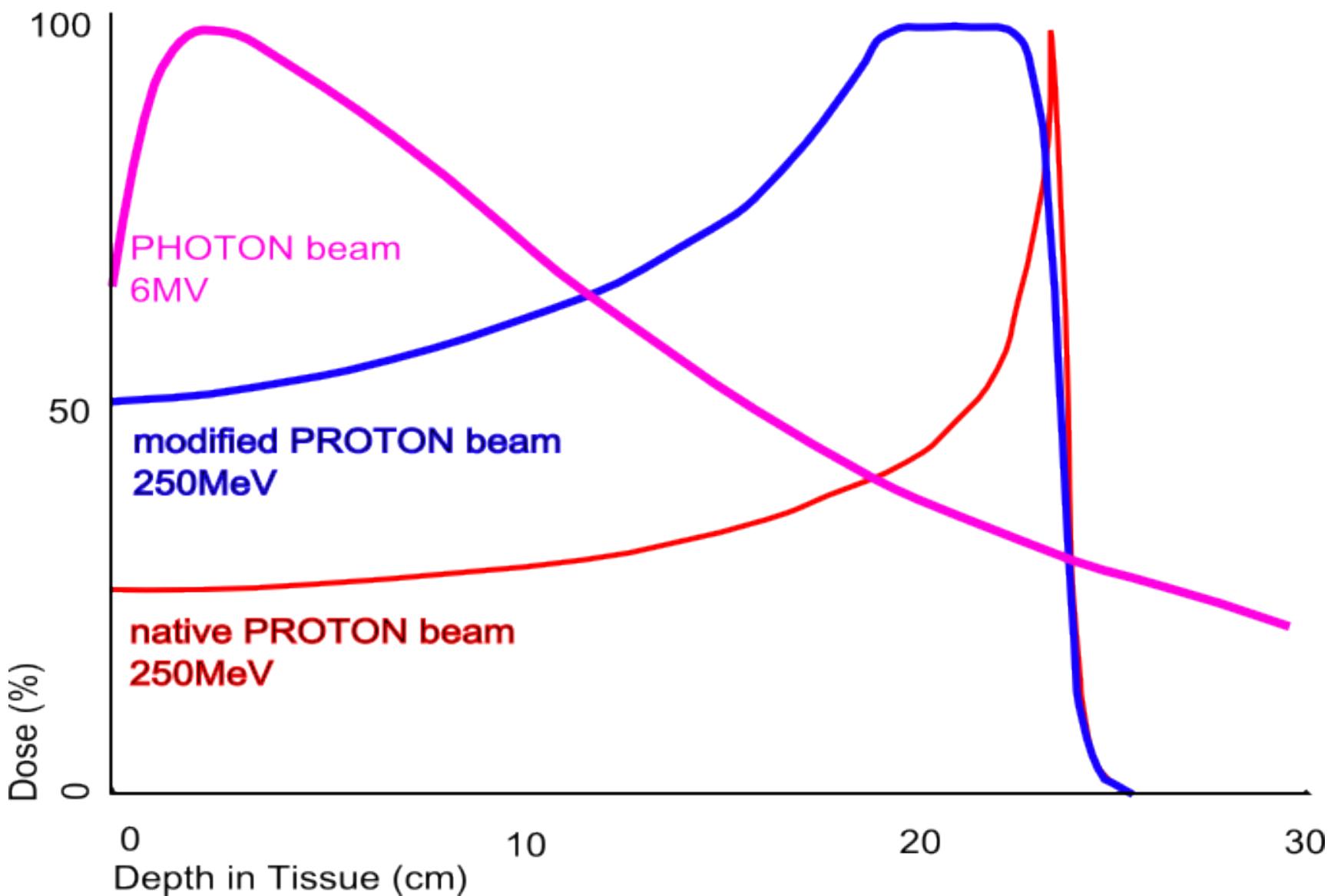
Pico de Bragg

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

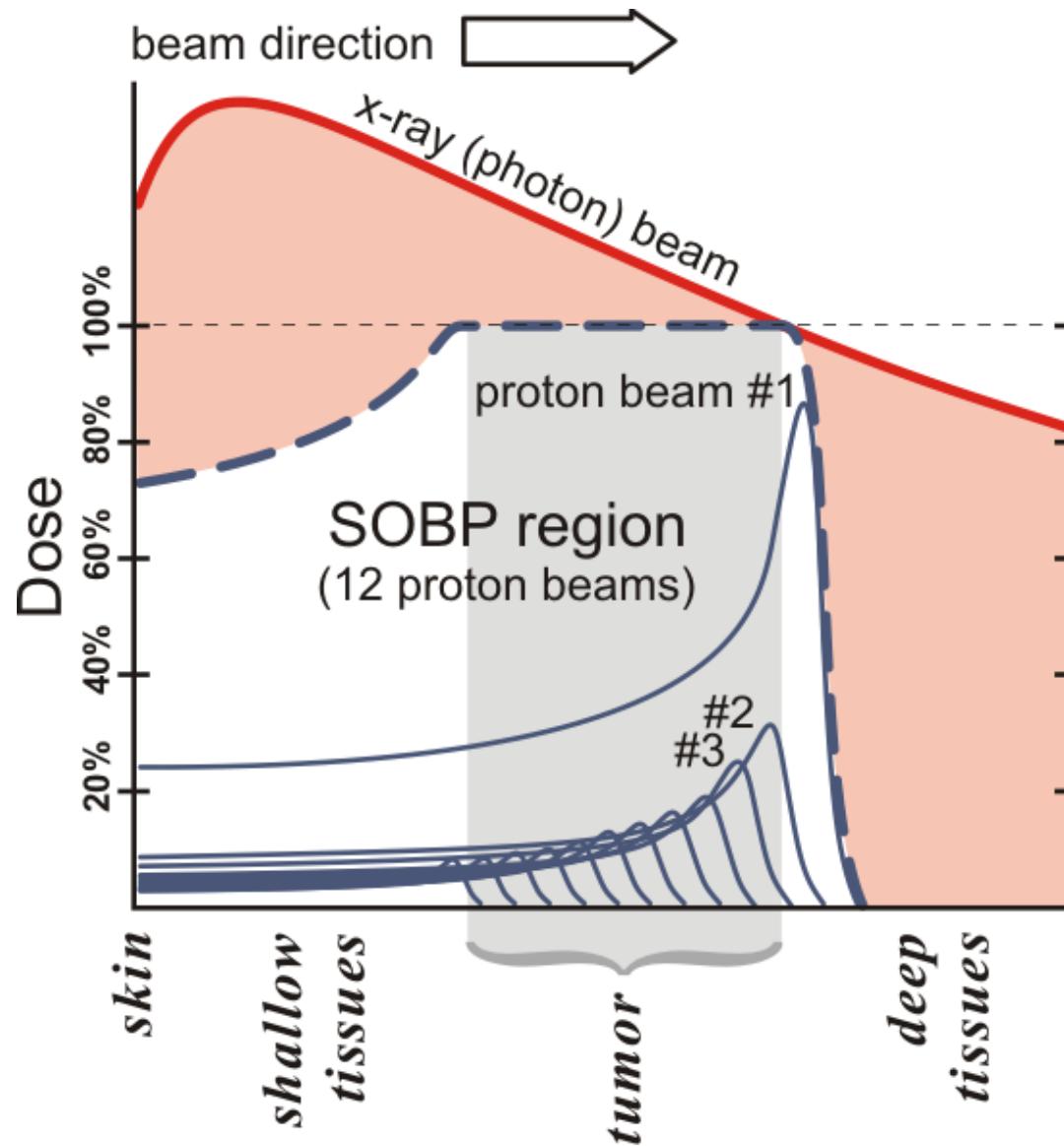


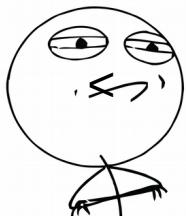


Pico de Bragg

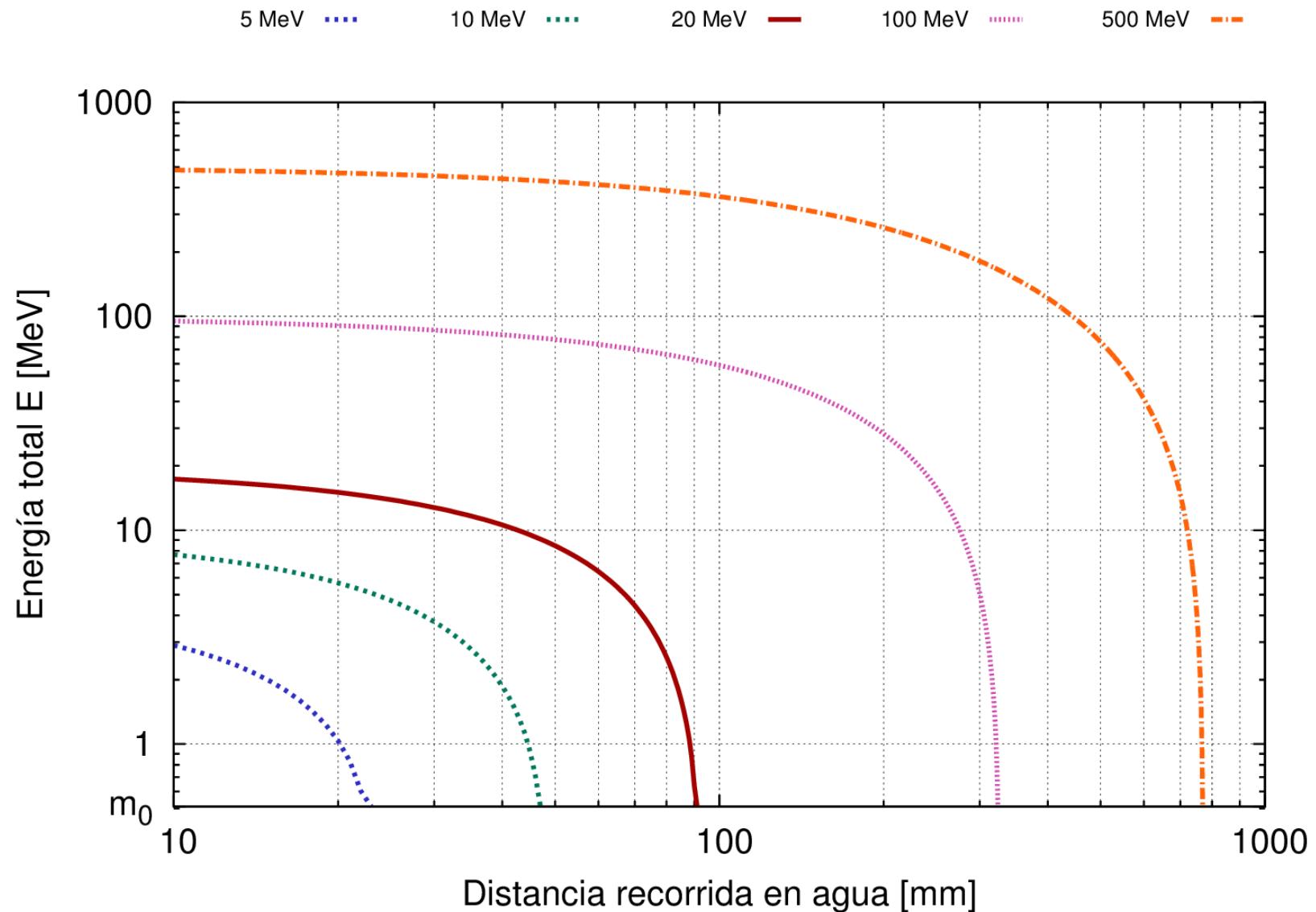


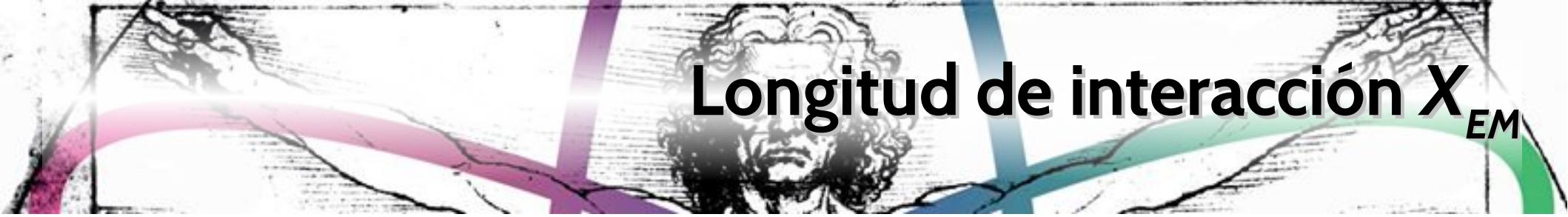
Pico de Bragg, haces múltiples





Rango de electrones en agua





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} ”

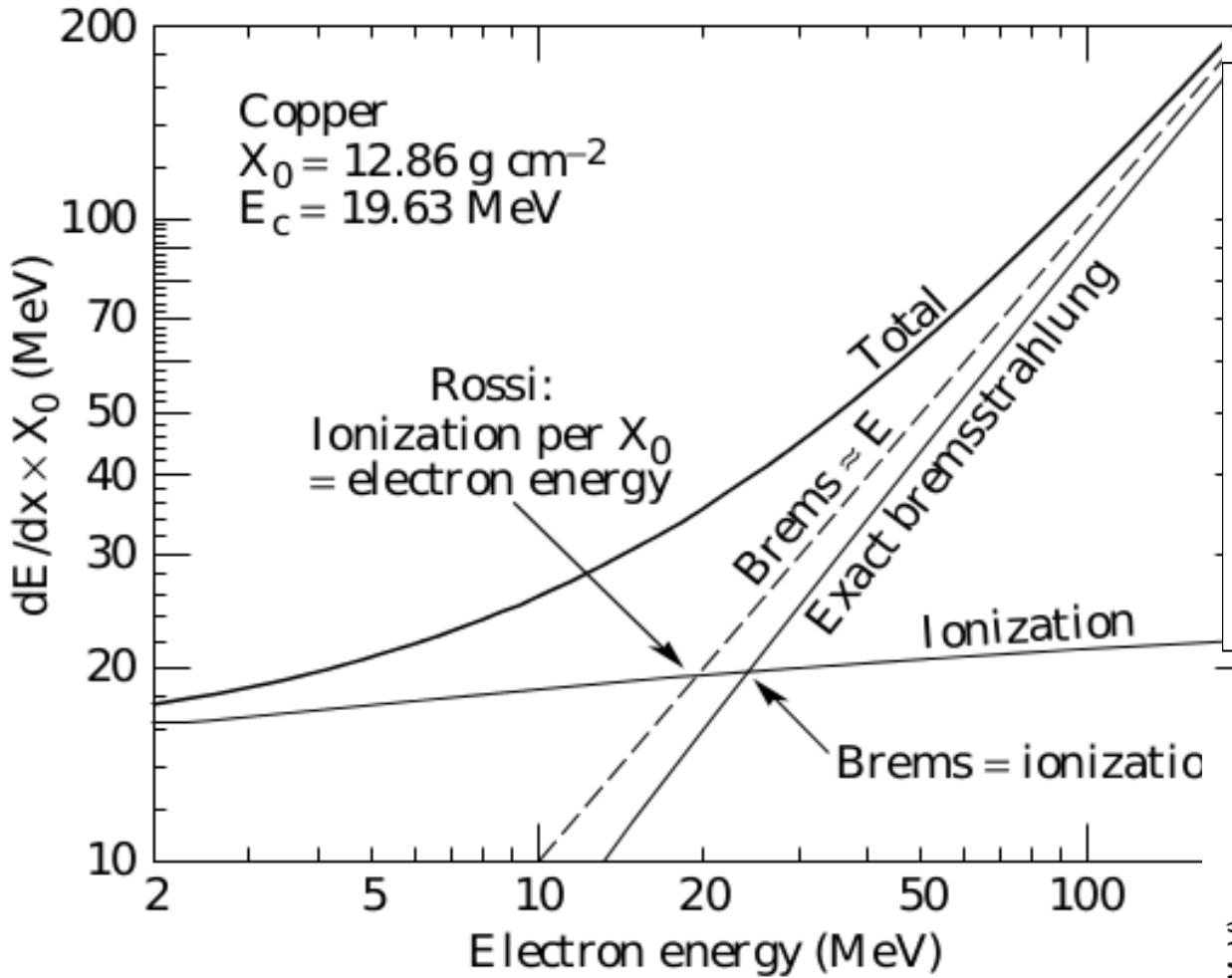
- Cantidad de materia atravesada (en g/cm²) cuando un electrón pierde una fracción $1-e^{-1}$ (~63%) de su energía original
- 7/9 del camino libre medio de producción de pares para un fotón



Energía Crítica

- 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

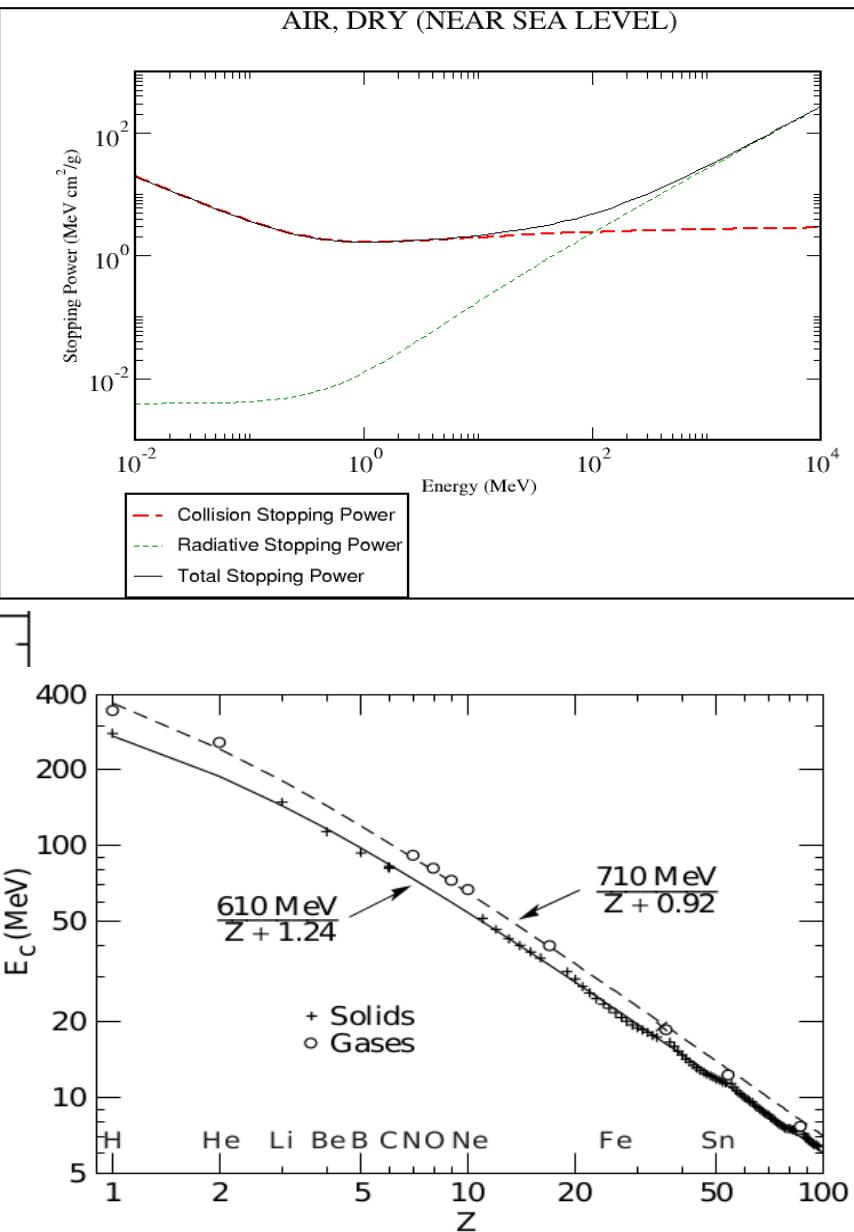
Energía crítica para electrones (ver p. ej. RPP-PDG cap 32)



$$E_c^{\text{Sólidos}} = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1.24} \quad E_c^{\text{Gases}} = \frac{710 \text{ MeV}}{Z + 0.92}$$

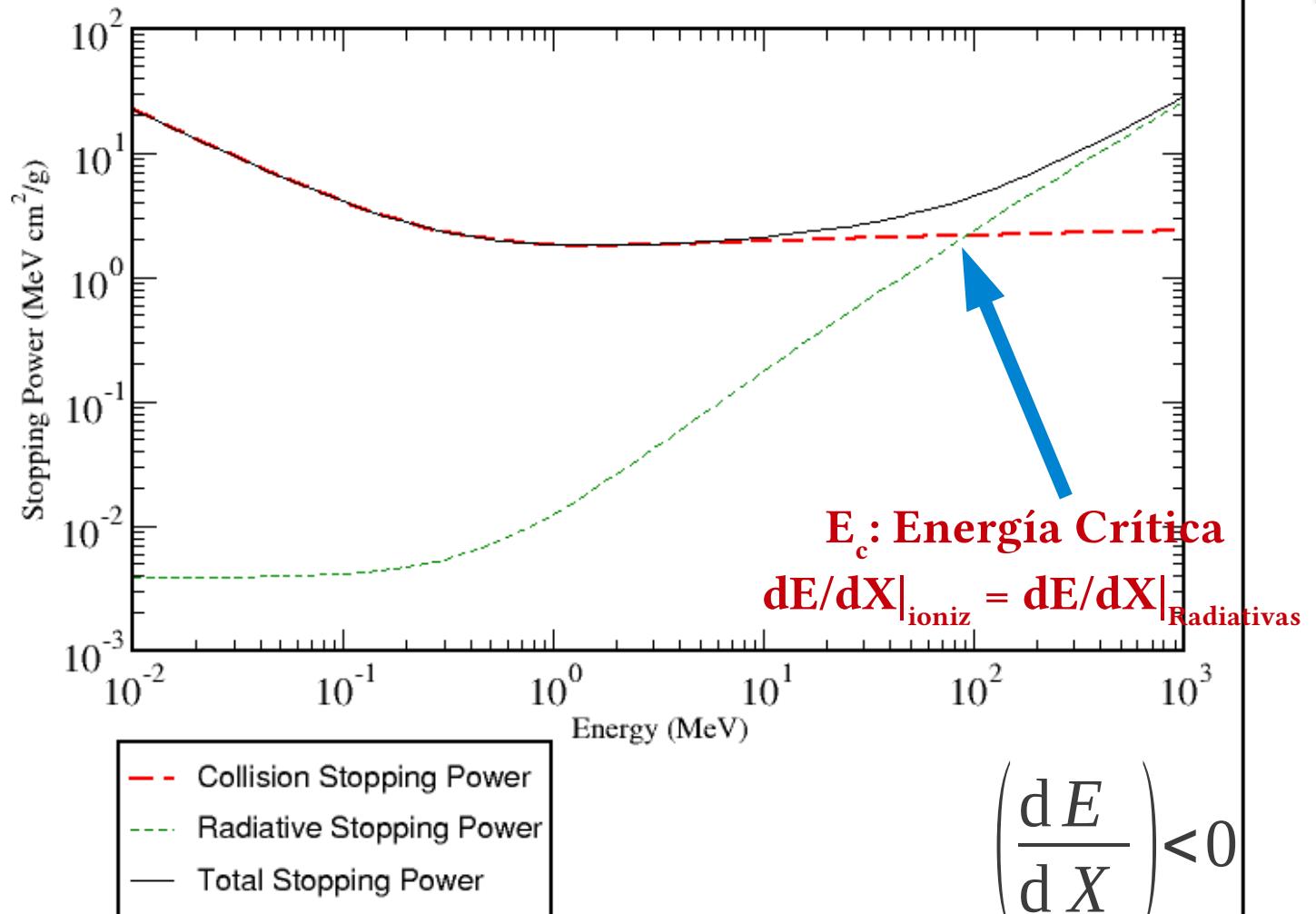
Oct, 2016

Asorey - Balseiro 2016 Física Méd



Otros medios

MUSCLE, SKELETAL (ICRP)



Si $E > E_c \rightarrow$ Nuevas partículas

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

estar/pstar/astar/XCOM



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:**▼[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

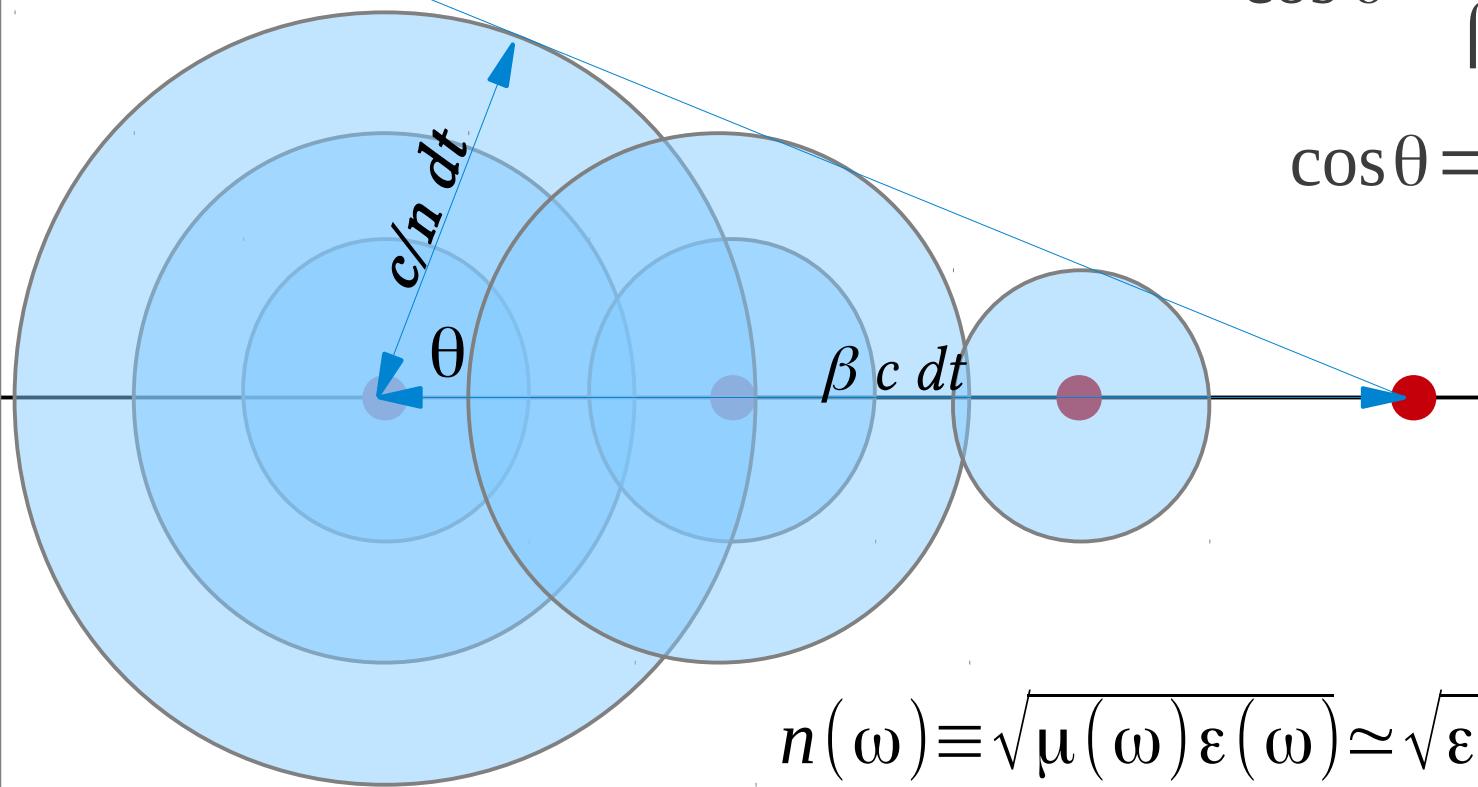
Note: Only stopping powers and the density effect parameter will be calculated if additional energies are used.

* Your browser must be file-upload compatible.

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

Efecto Cherenkov simplificado

$$\cos \theta = \frac{c/n dt}{\beta c dt}$$
$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}$$



$$n(\omega) \equiv \sqrt{\mu(\omega)\epsilon(\omega)} \approx \sqrt{\epsilon(\omega)} \approx n$$

- Medio material con índice de refracción $n = \text{cte}$
- Partícula cargada con velocidad $\beta c > (c/n)$

Barrera del sonido



Efecto Cherenkov, el regreso

- En un medio material ligeramente absorbente, con permitividad $\epsilon(\omega)$ y número atómico $\langle Z \rangle$, una partícula con velocidad $\beta=v/c$ produce:

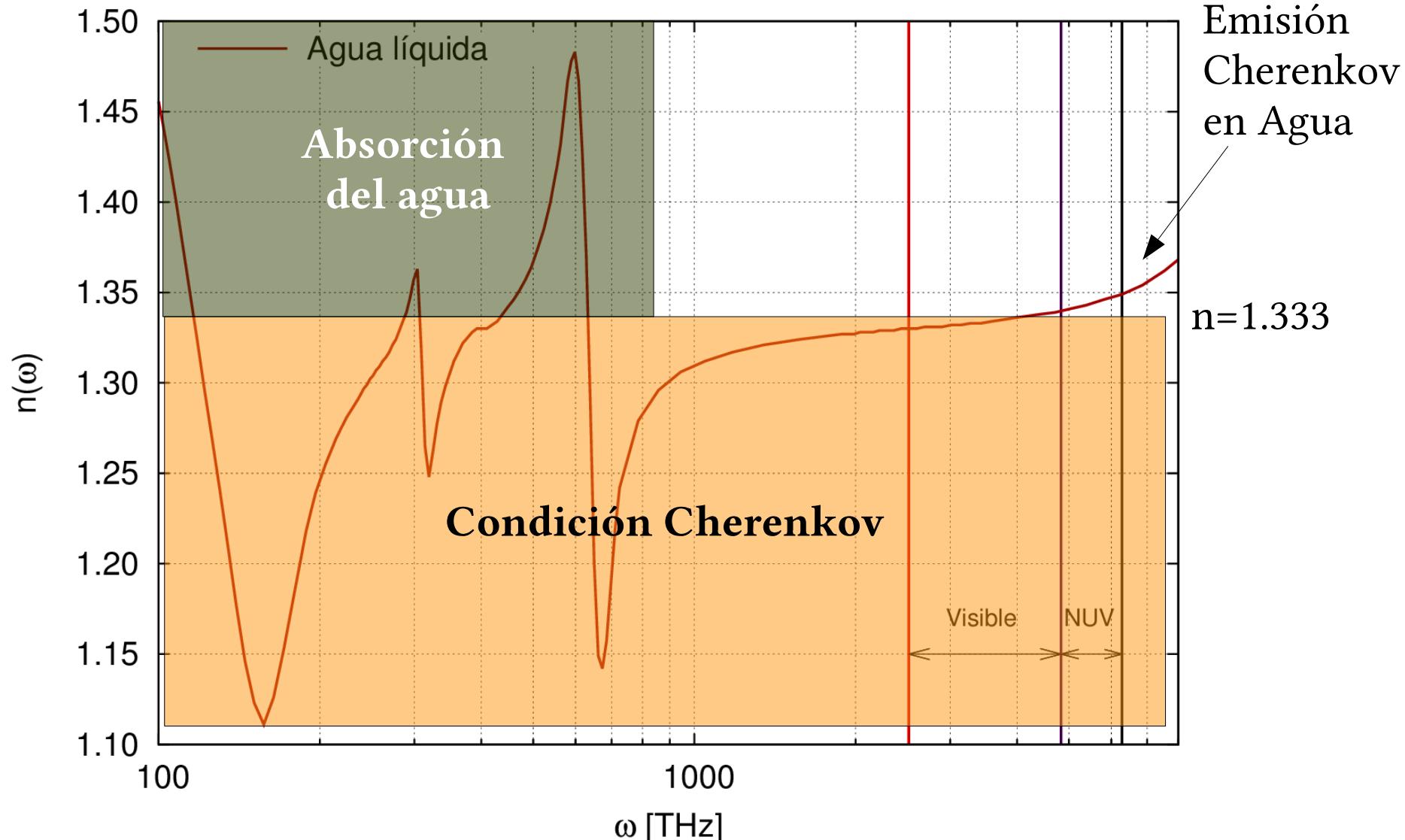
$$\left(\frac{dE}{dl} \right) = \left(\frac{Ze}{c} \right)^2 \int_{\beta^2 \epsilon(\omega) > 1} \omega \left(1 - \frac{1}{\beta^2 \epsilon(\omega)} \right) d\omega \quad \text{Ecuación de Frank-Tamm}$$

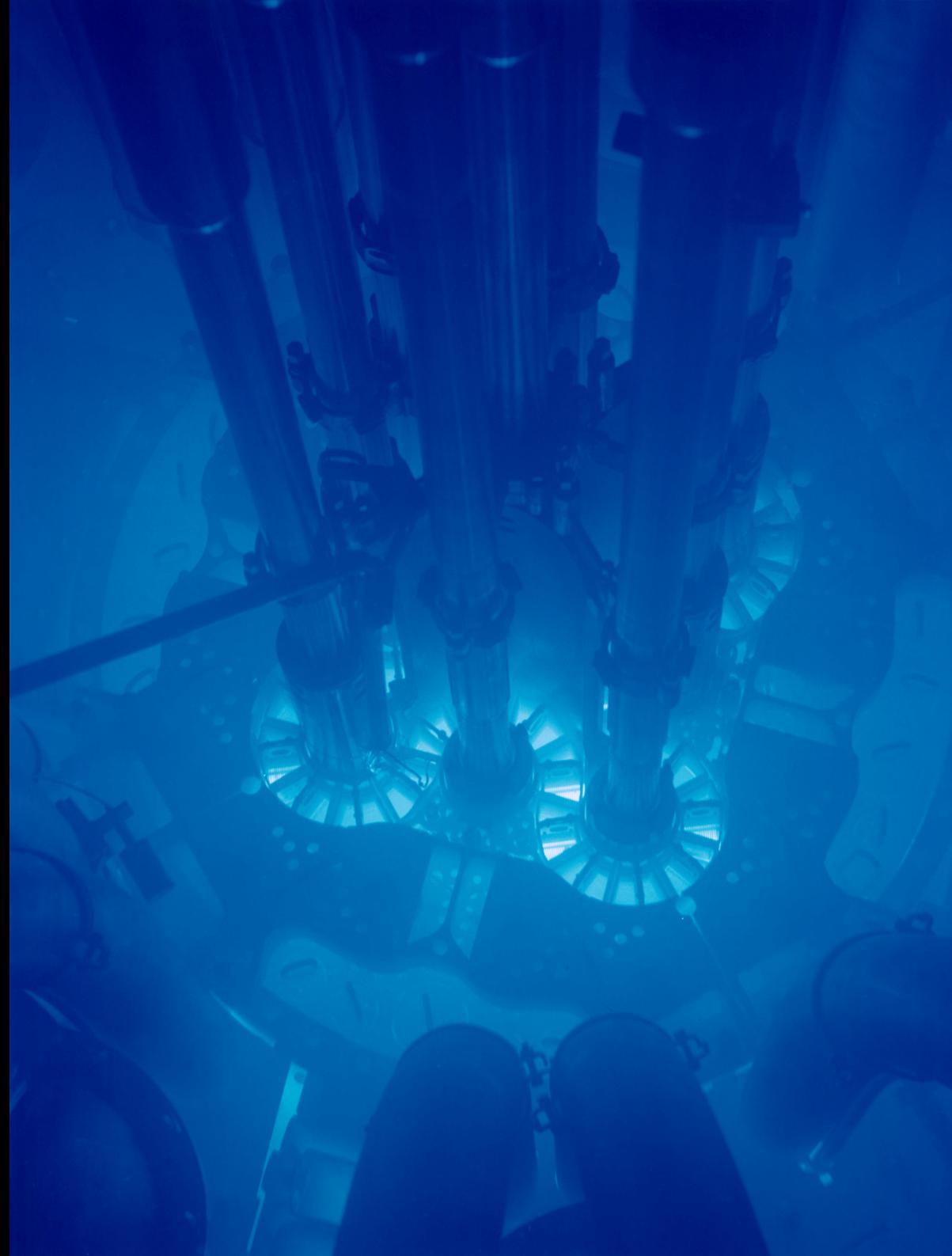
- Reagrupando e integrando, obtenemos el número N de fotones Cherenkov producidos cuando la partícula avanza l en el intervalo λ_1 y λ_2

$$\frac{\Delta N}{\Delta l} = 2\pi \alpha_{EM} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right) \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \quad n(\omega) \approx \sqrt{\epsilon(\omega)} \approx n$$

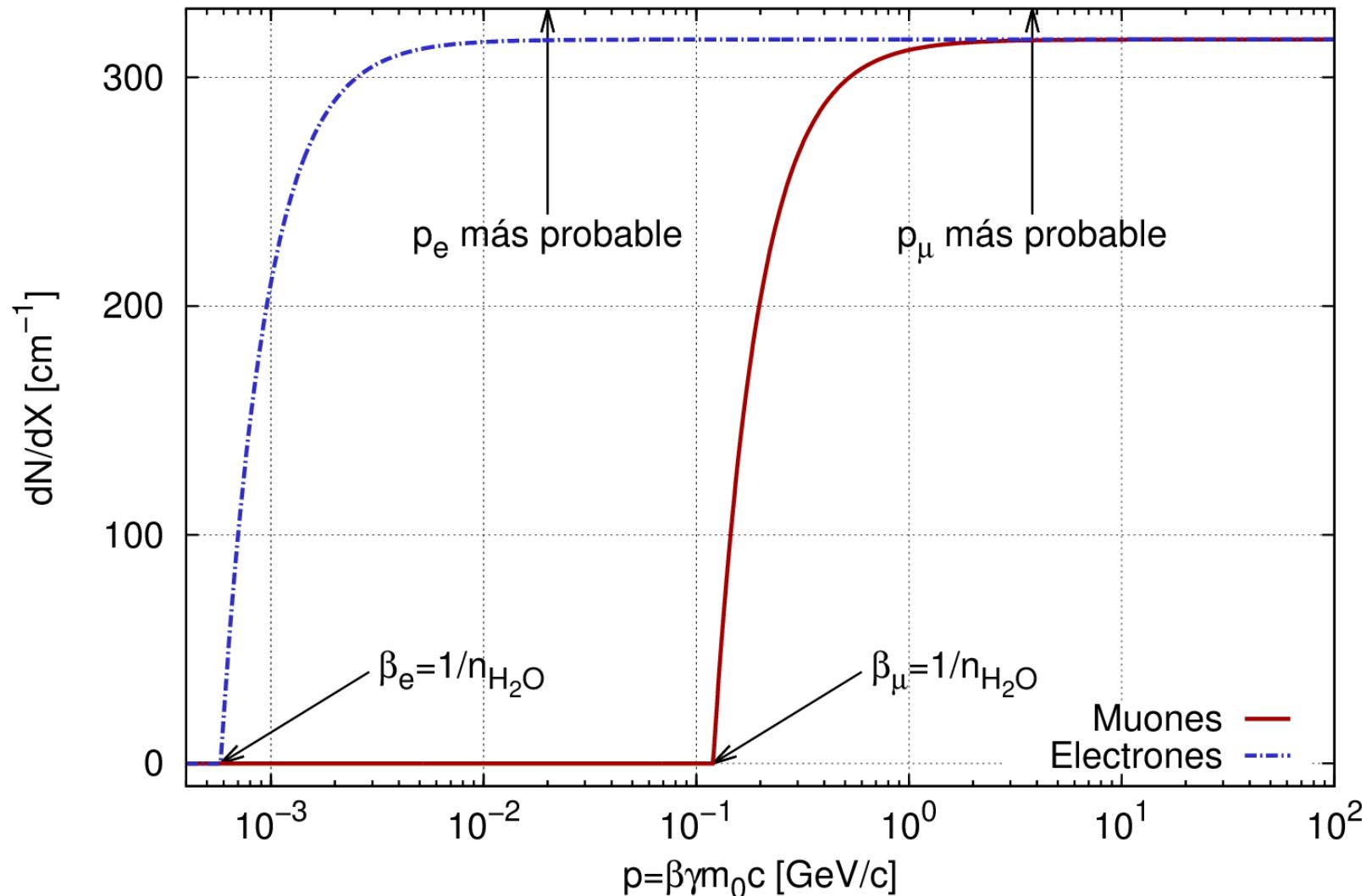


Índice de refracción agua

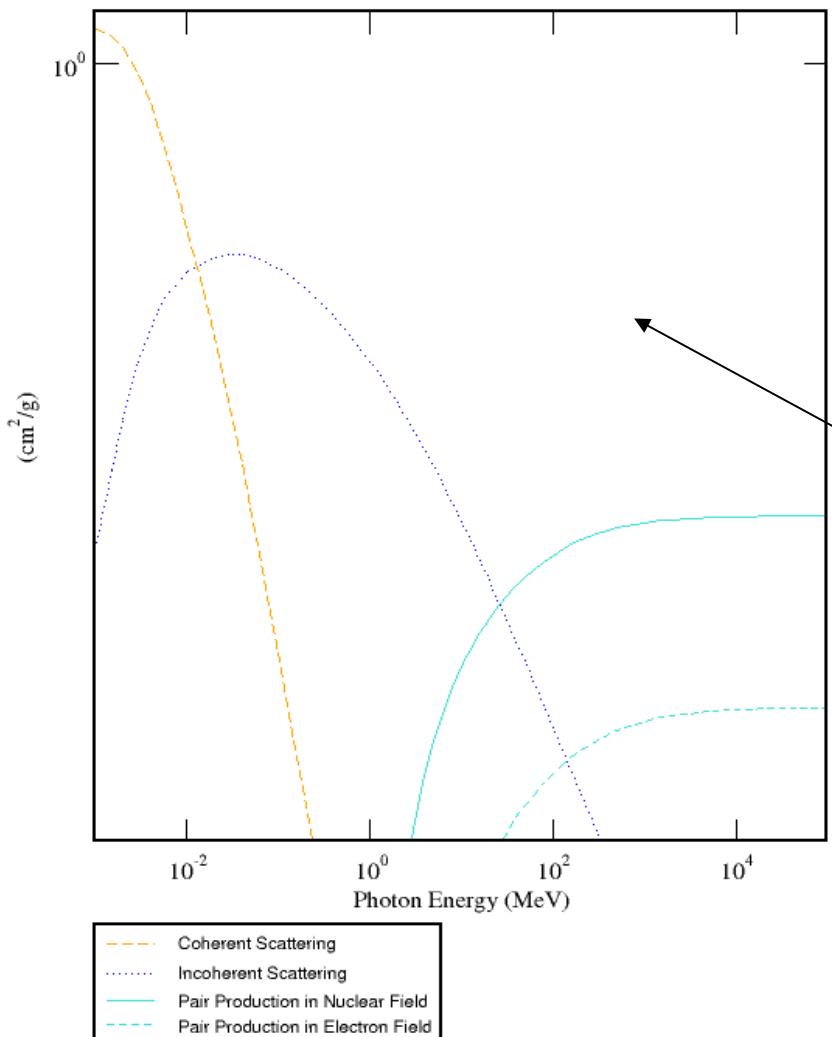




Producción Cherenkov en agua (para $n=cte$ y en el rango de interés PMT R5912)



¿Qué pasa con los fotones? ver p. ej. Attix cap. 7, Knoll cap. 2



Partículas sin carga

Pero hay dos efectos adicionales:

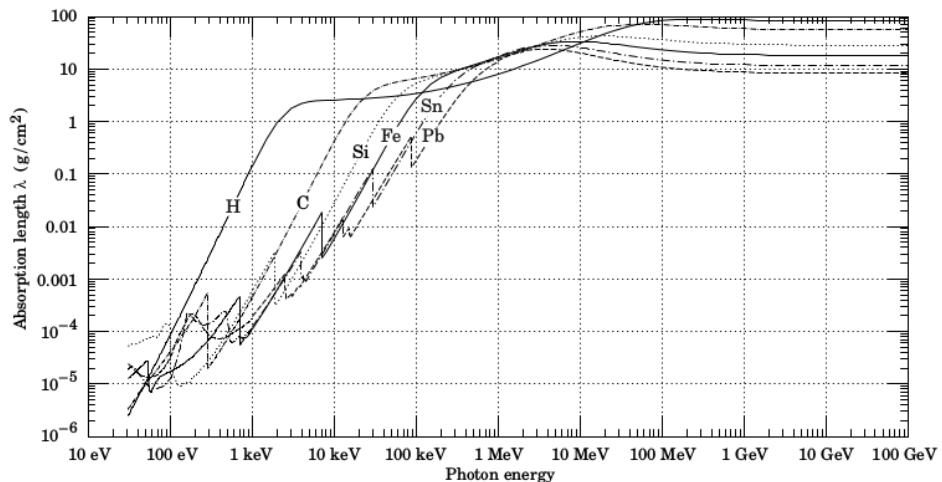
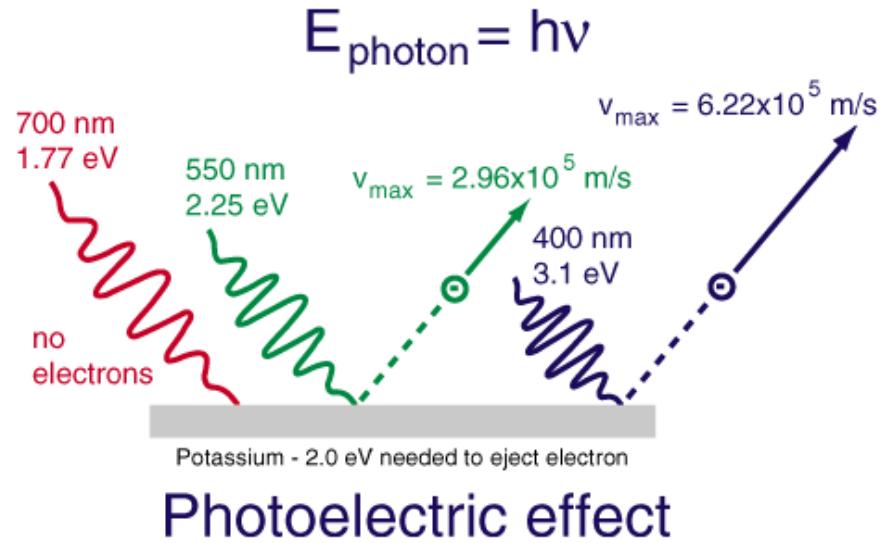
- 1) Producción de pares: un fotón puede producir un par que produzca señal
- 2) Compton: por scattering compton un electrón puede ser promovido

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

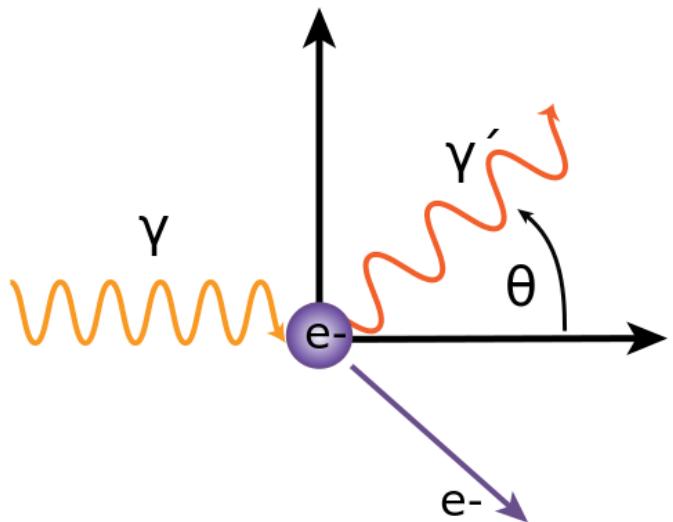


Efecto Compton

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

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

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



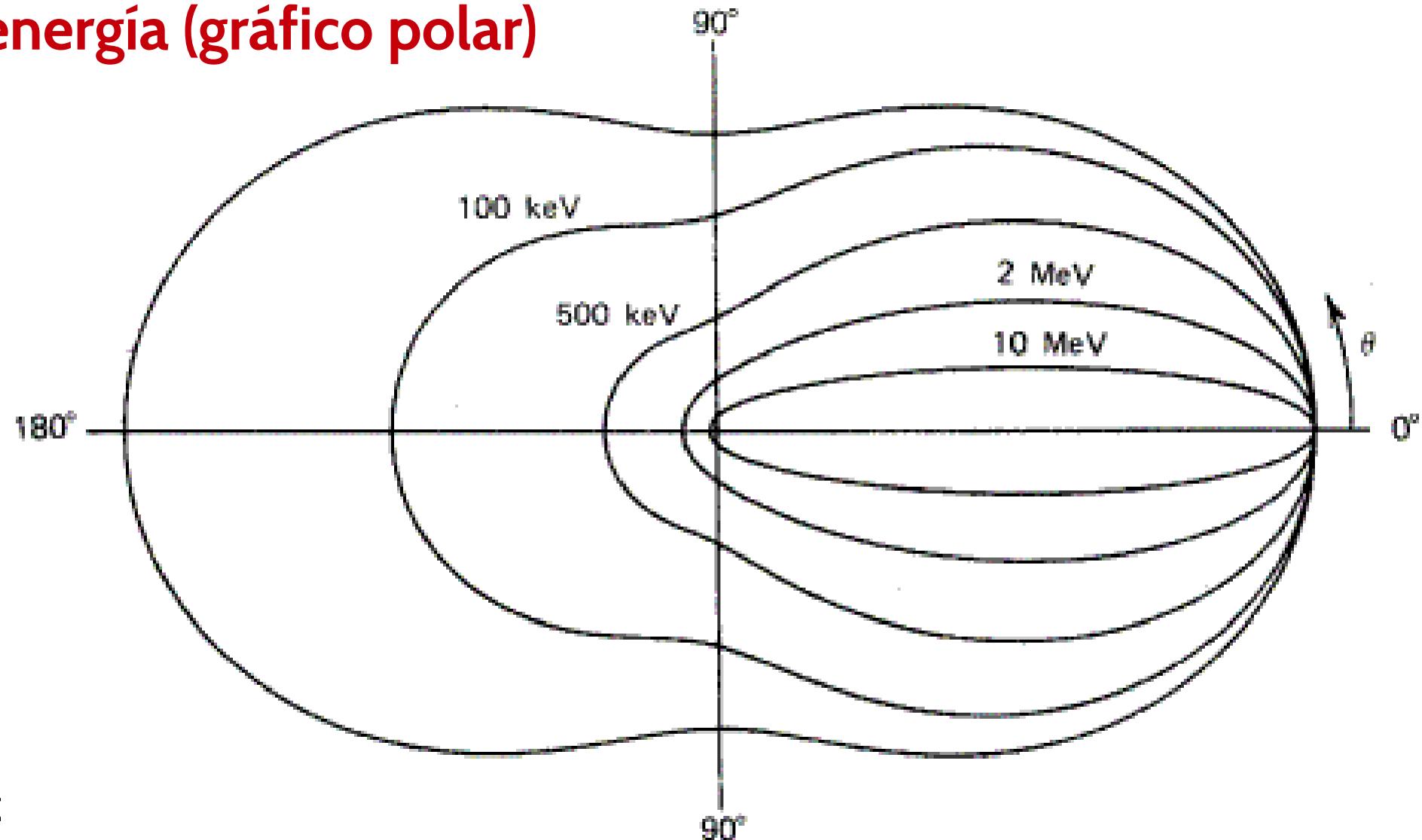
- La energía transferida depende de θ , máximo:

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

Formula de Klein-Nishina

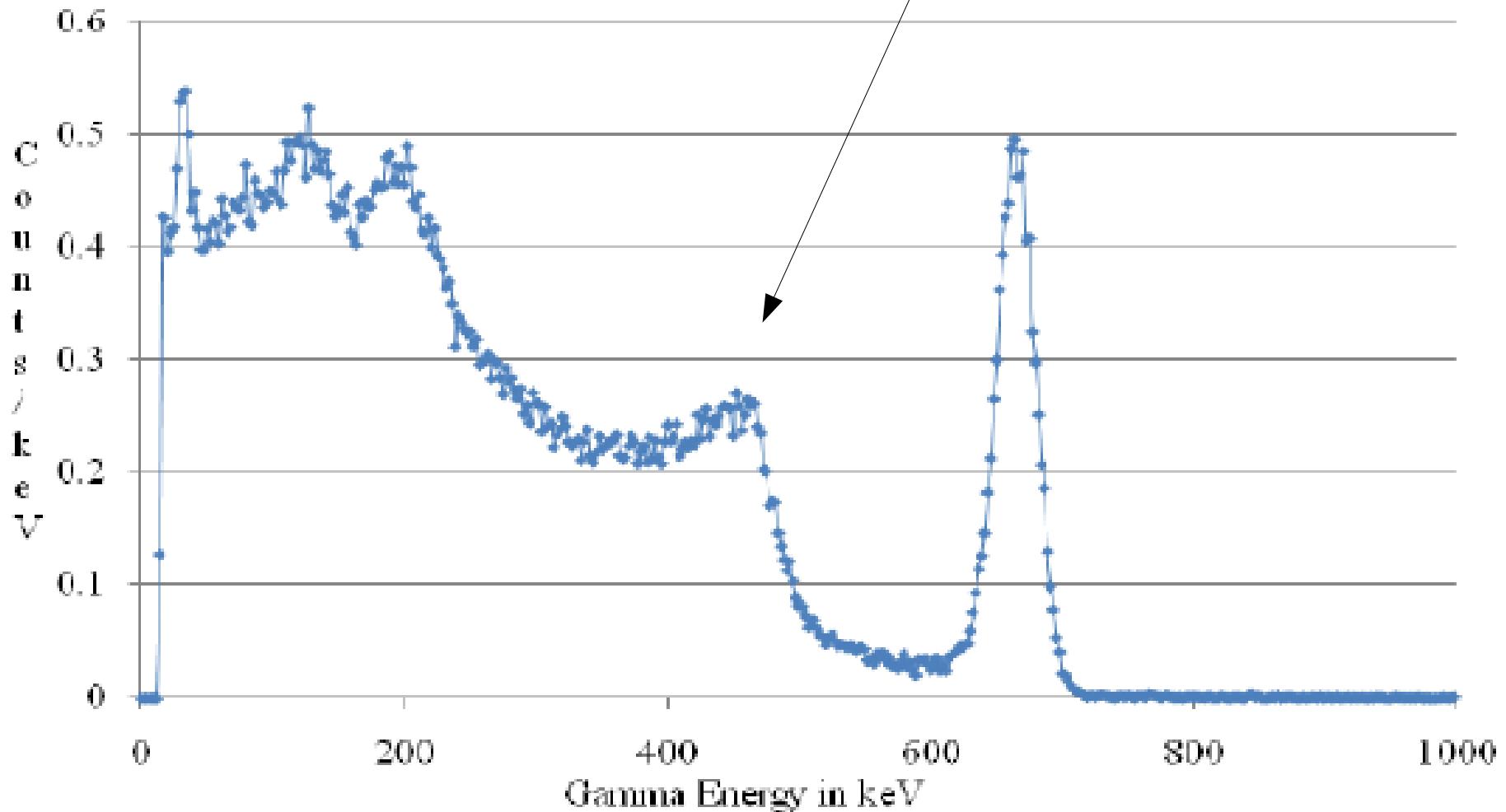
Sección eficaz diferencial

Compton como función de
la energía (gráfico polar)



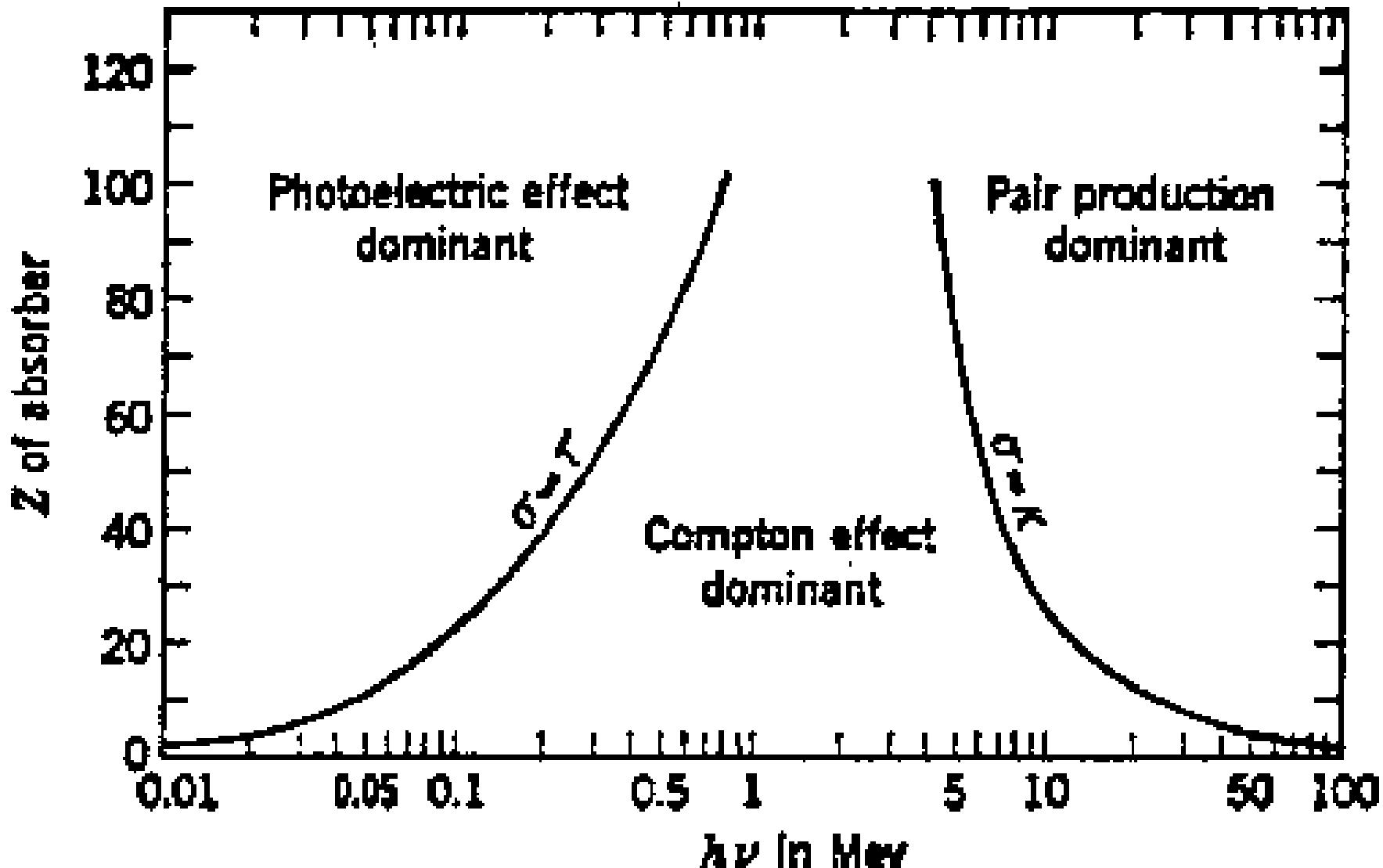
Talón de Compton (Compton edge)

Cesium - 137 Photopeak and 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

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

σ_R es Rayleigh, τ es fotoeléctrico, σ es Compton, y κ es creación de pares.

- El **camino libre medio, λ , será la distancia promedio entre dos interacciones,**
- Luego, para un haz de intensidad I_0 que atraviesa un medio de espesor l :

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

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

Coeficiente de atenuación másico

- μ 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 ρ :

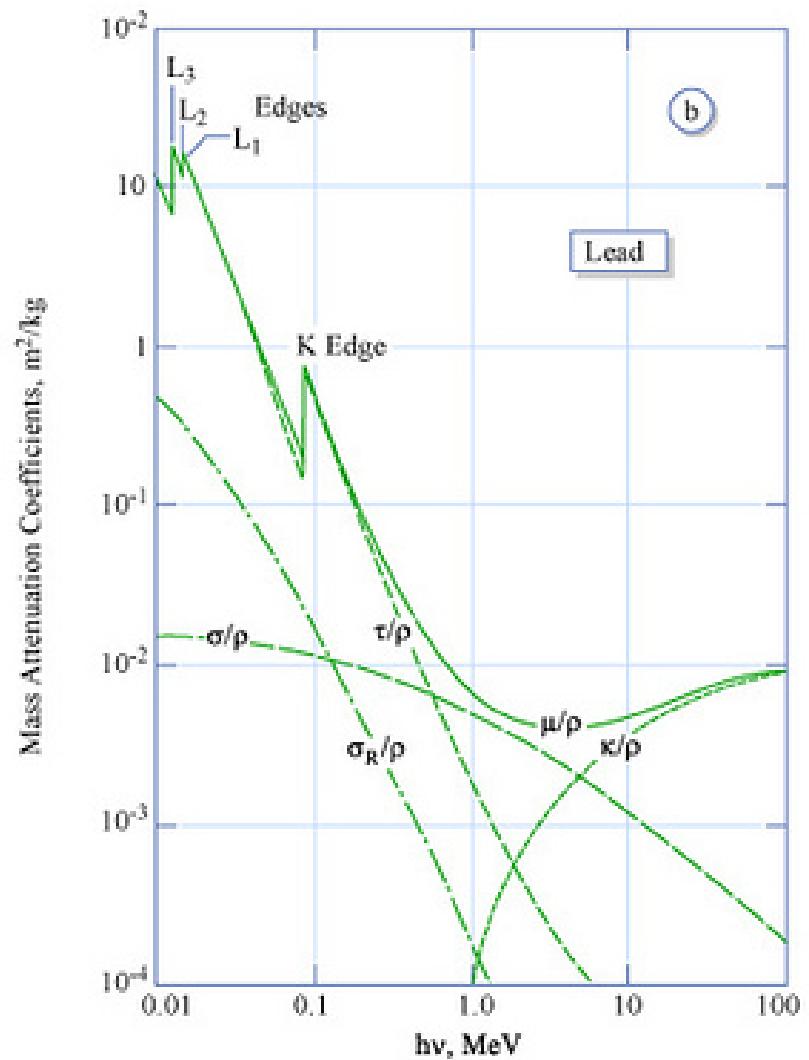
$$\left(\frac{\mu}{\rho} \right), \quad \left[\frac{\mu}{\rho} \right] = \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$$

- Y luego,

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

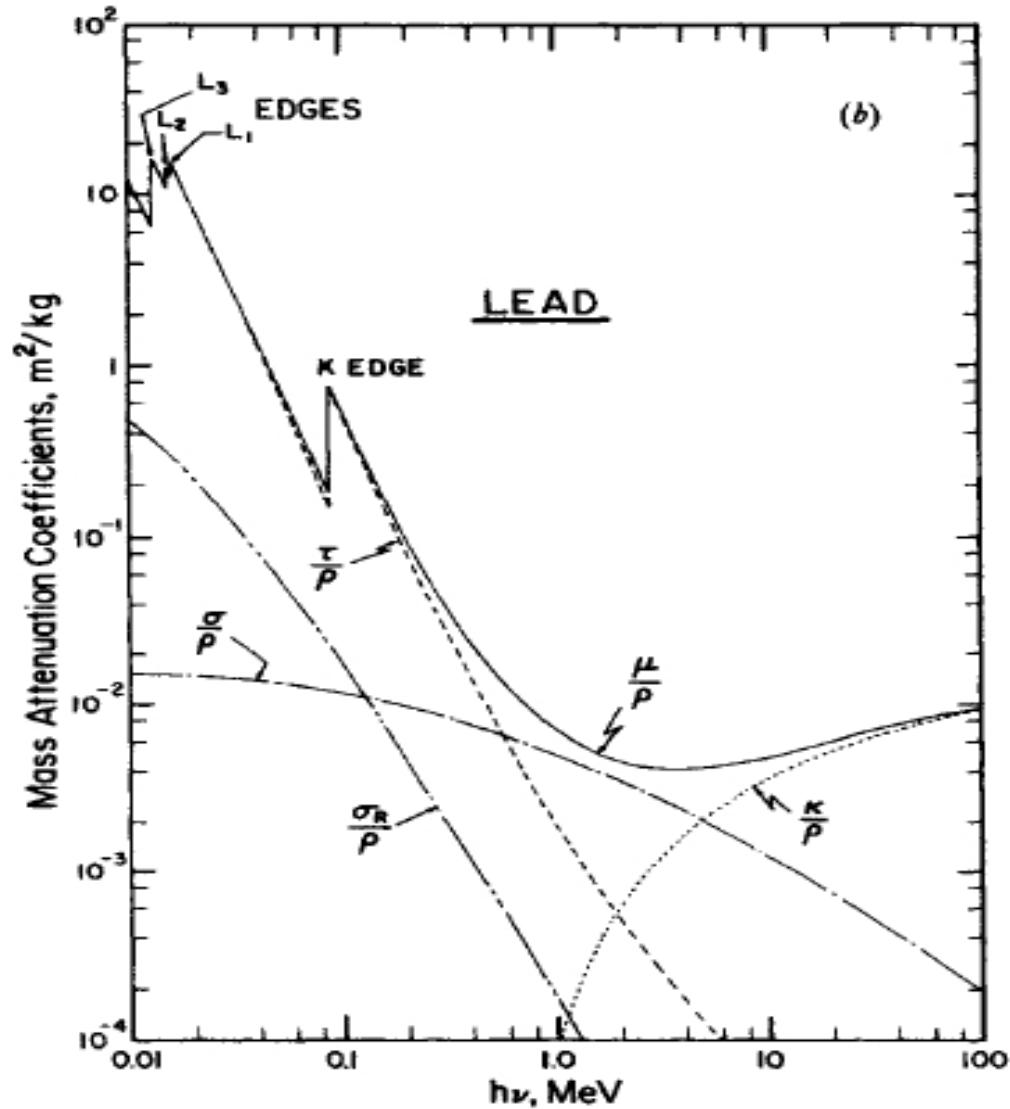
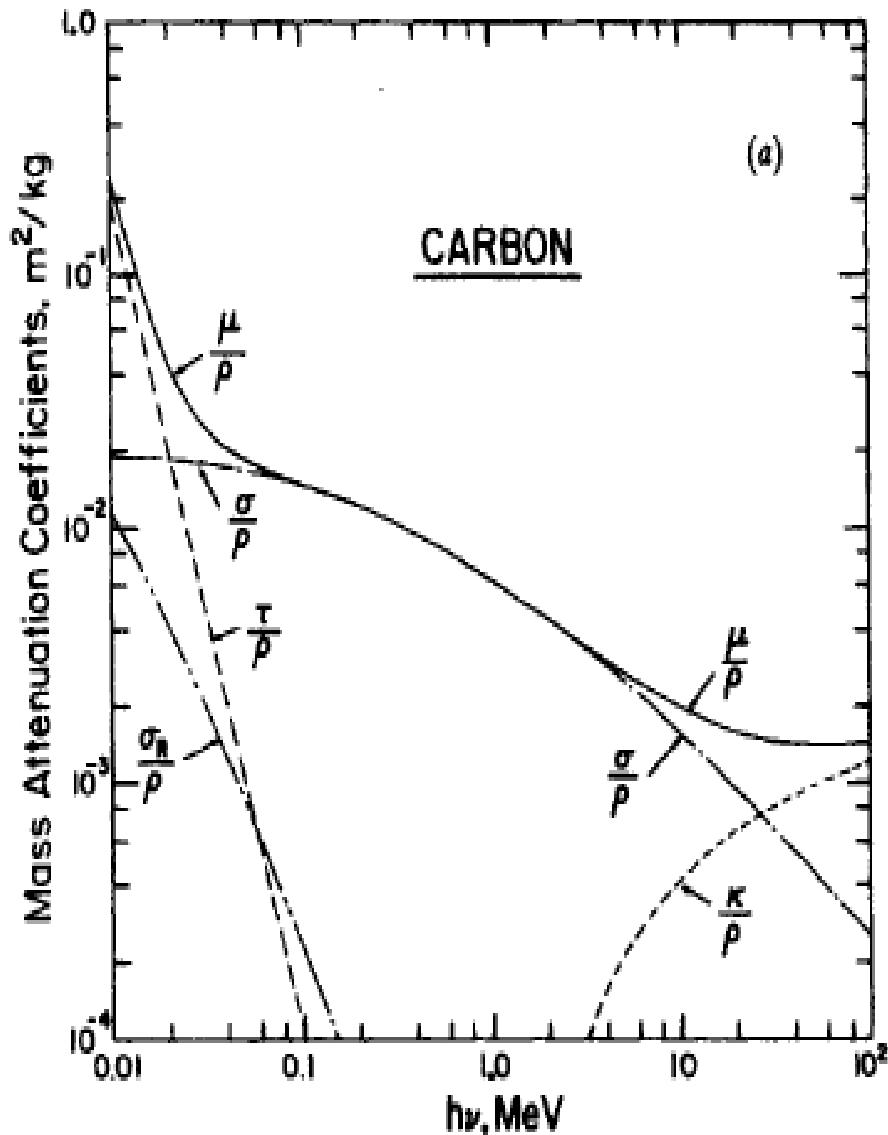
- El término de Rayleigh (dispersión elástica) se incluye para haces estrechos (la dispersión afecta el haz)

Coeficiente de atenuación másico

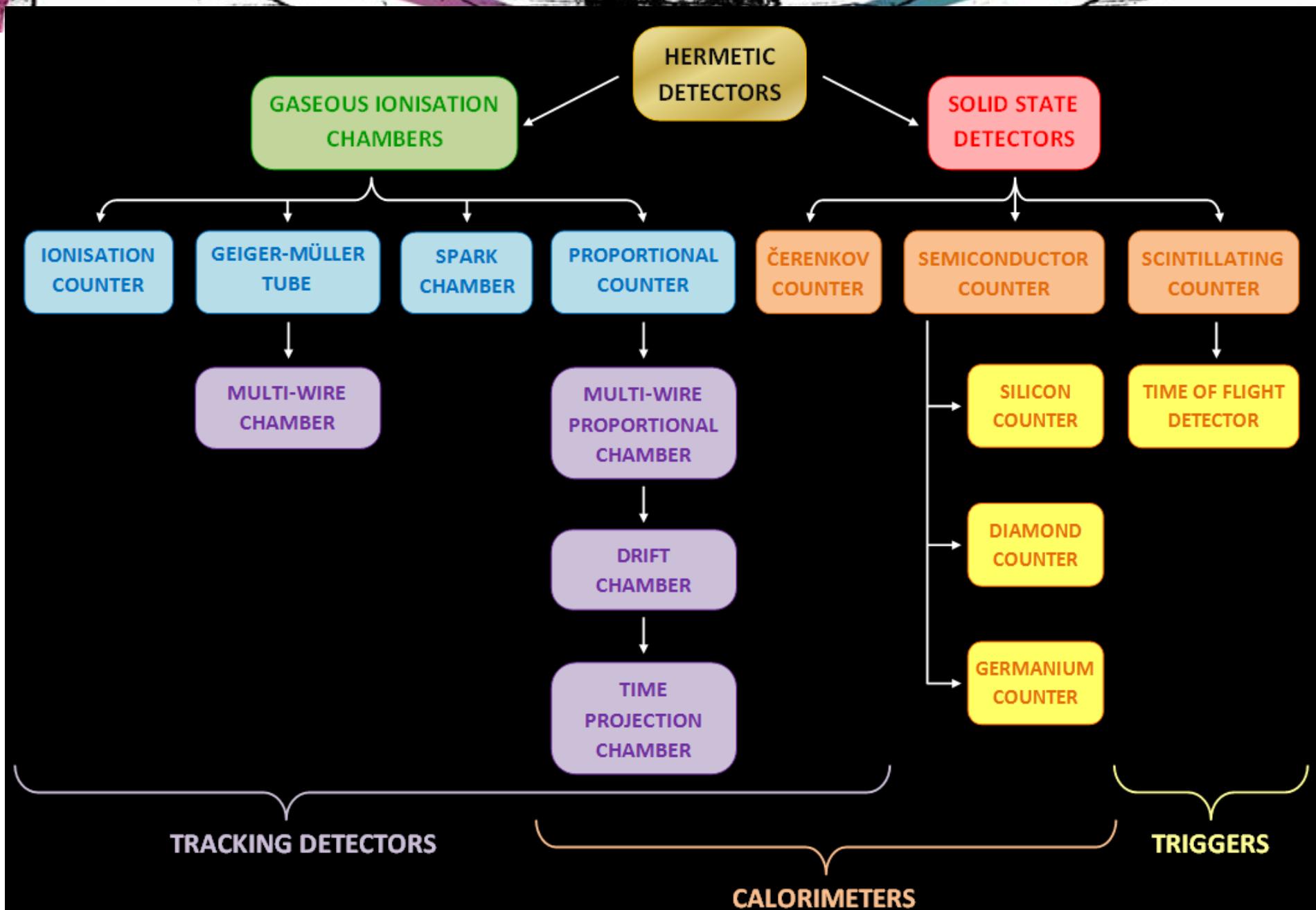


Mass attenuation coefficients for carbon (a) and lead (b). τ/ρ indicates the contribution of the photoelectric effect, σ/ρ is that of the Compton effect, κ/ρ that of pair production, and σ_R/ρ that of Rayleigh (coherent) scattering. μ/ρ is their sum, which is closely approximated in Pb by the τ/ρ curve below $h\nu = 0.1 \text{ MeV}$.

Coeficiente de atenuación másico: efecto del Z

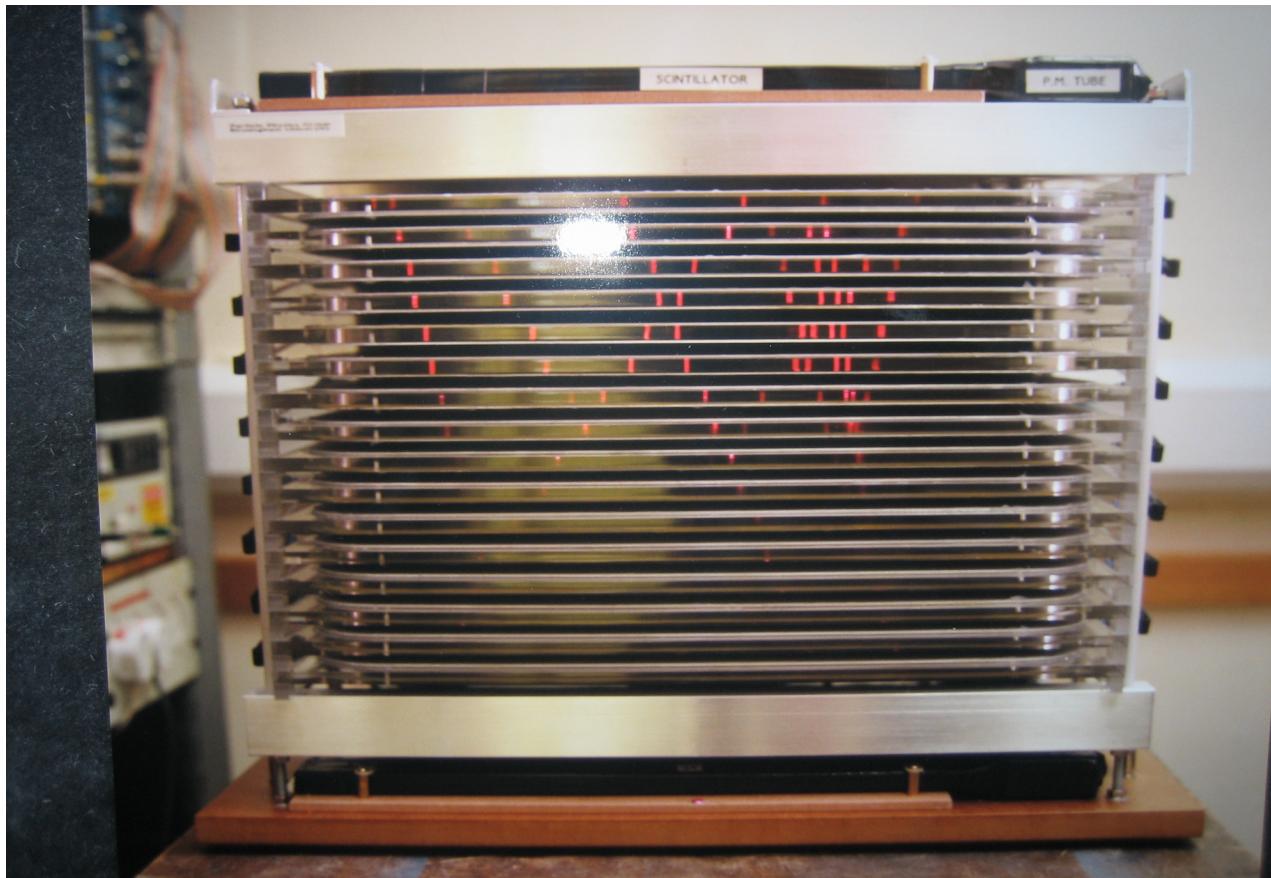
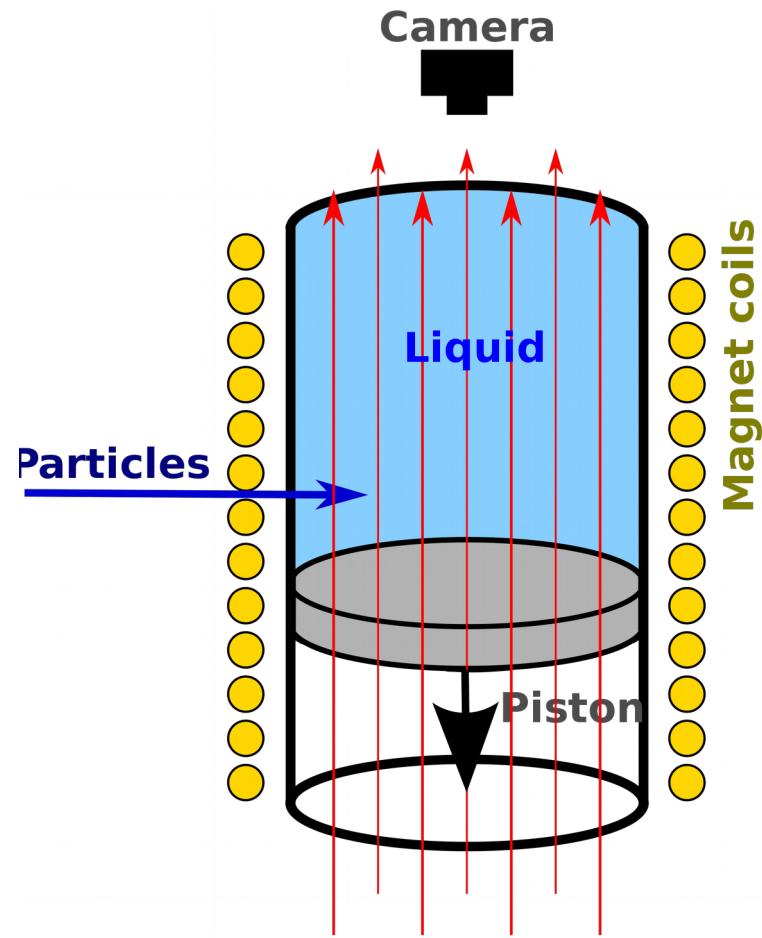


Detectores de radiación y partículas



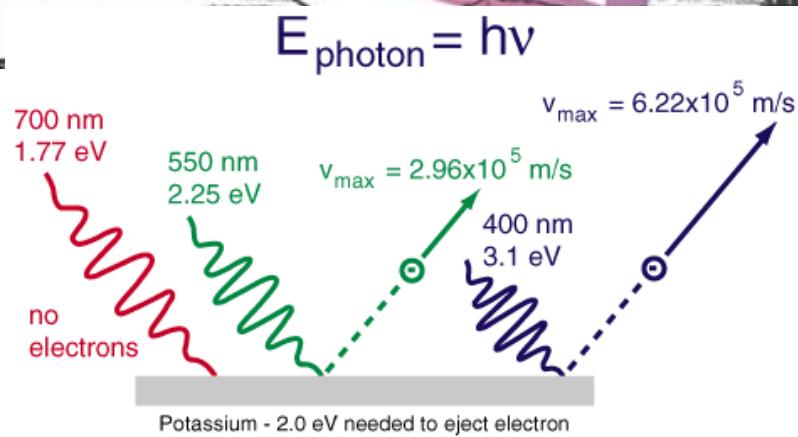
Detectores Knoll cap. 4

- Registro o inferencia de
 - Posición, tiempo de arribo, Tipo (carga, masa), Energía

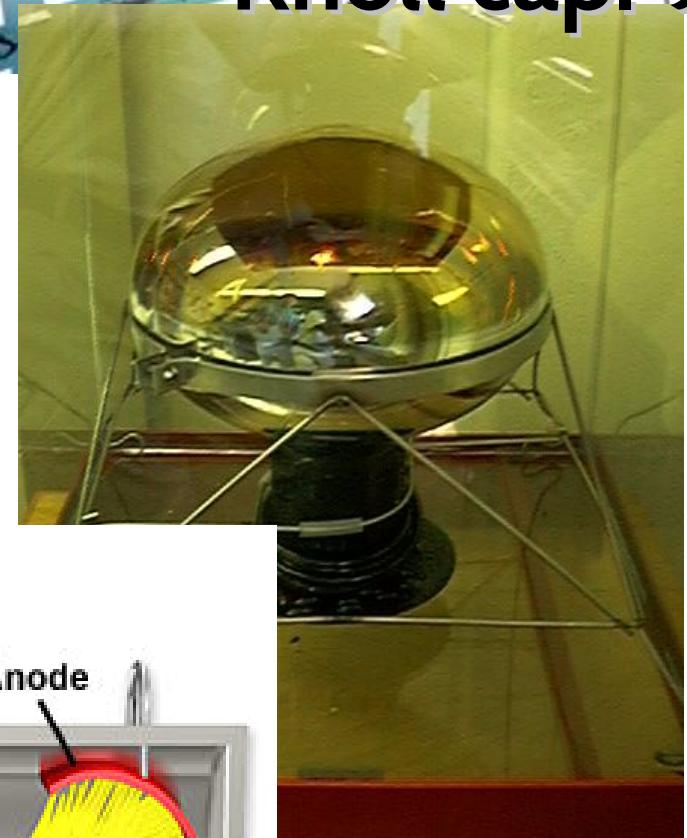
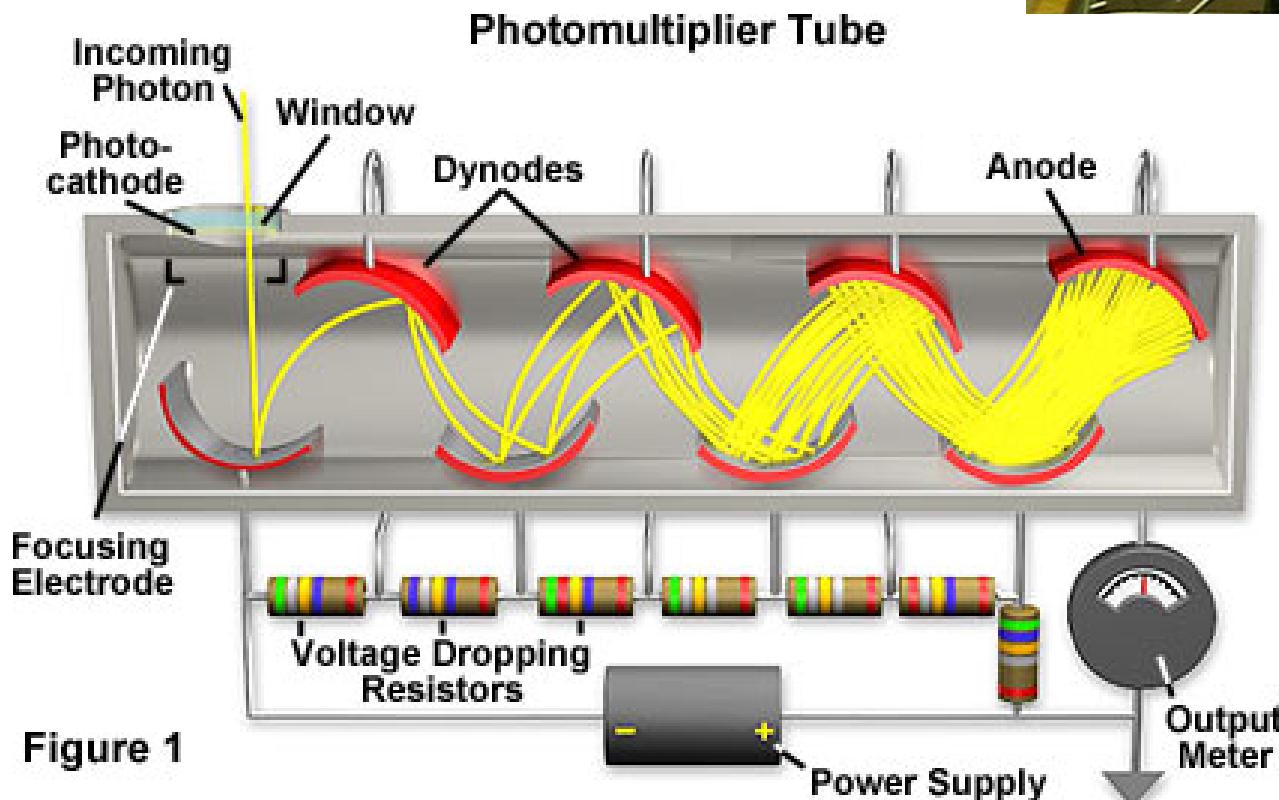


Fotomultiplicador, AKA fototubo, AKA “PMT”

Knoll cap. 9



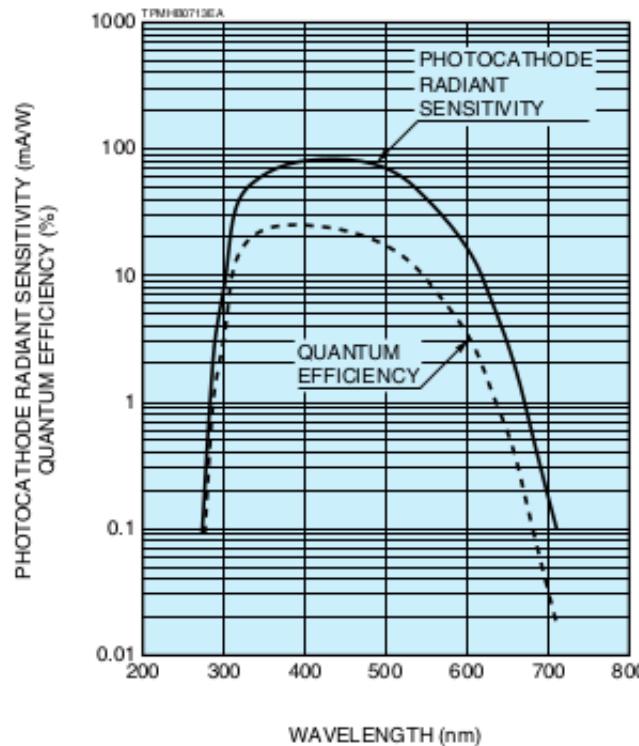
Photoelectric effect



Hamamatsu R5912

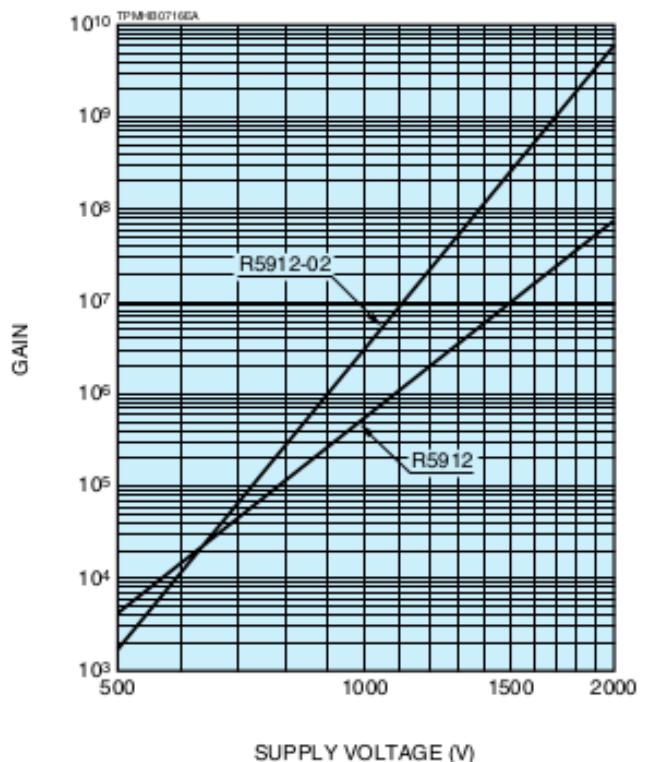
SPECTRAL RESPONSE

- R5912, R5912-02
- R7081, R7081-20



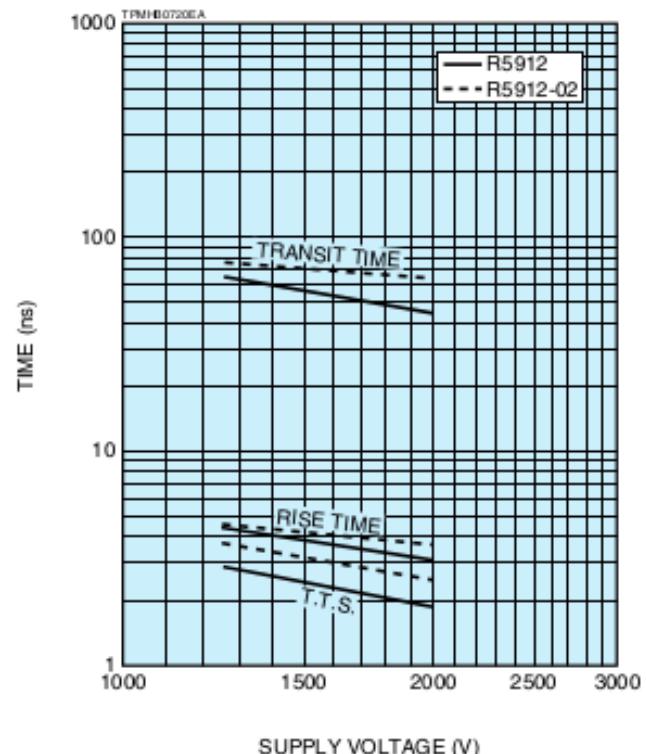
GAIN

- R5912, R5912-02



TYPICAL TIME RESPONSE

- R5912, R5912-02



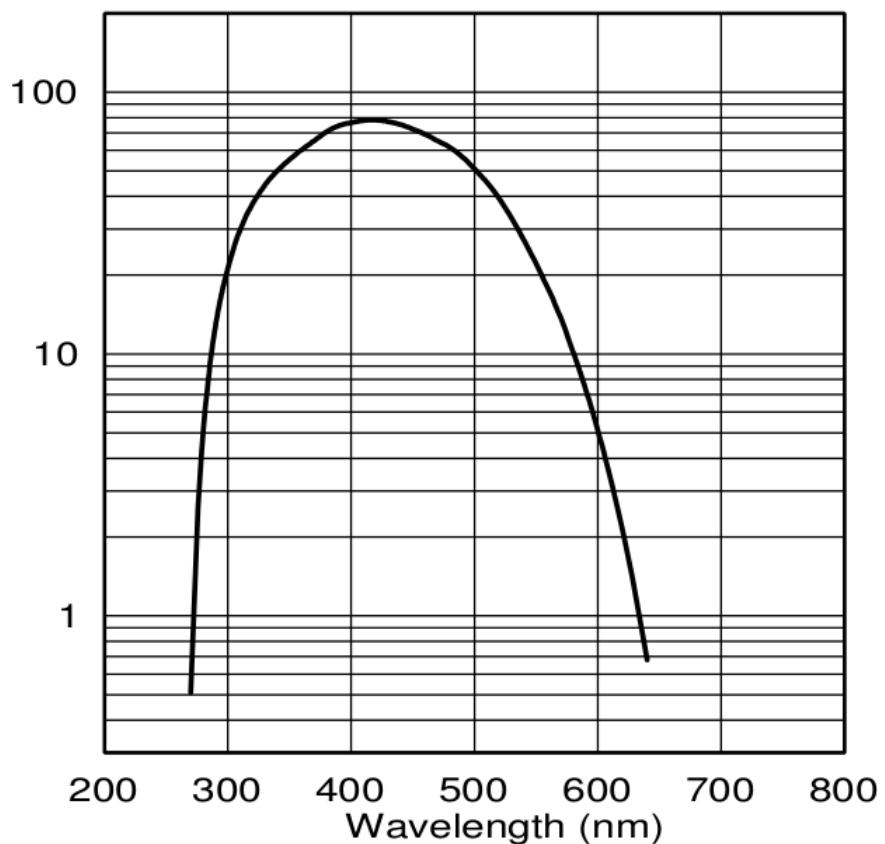
SPECIFICATIONS

Type No.	Diameter (mm) / (inch)	Minimum Effective Area (mm)	Surface Area		Dynode		Weight (g)
			Min. (cm ²)	Typ. (cm ²)	Structure	Number of Stages	
R5912	202 / 8	φ190	330	380	Box & Line	10	approx. 1100
R5912-02	202 / 8	φ190	330	380	Box & Line	14	approx. 1100

Photonis XP-1805, 202 mm diámetro

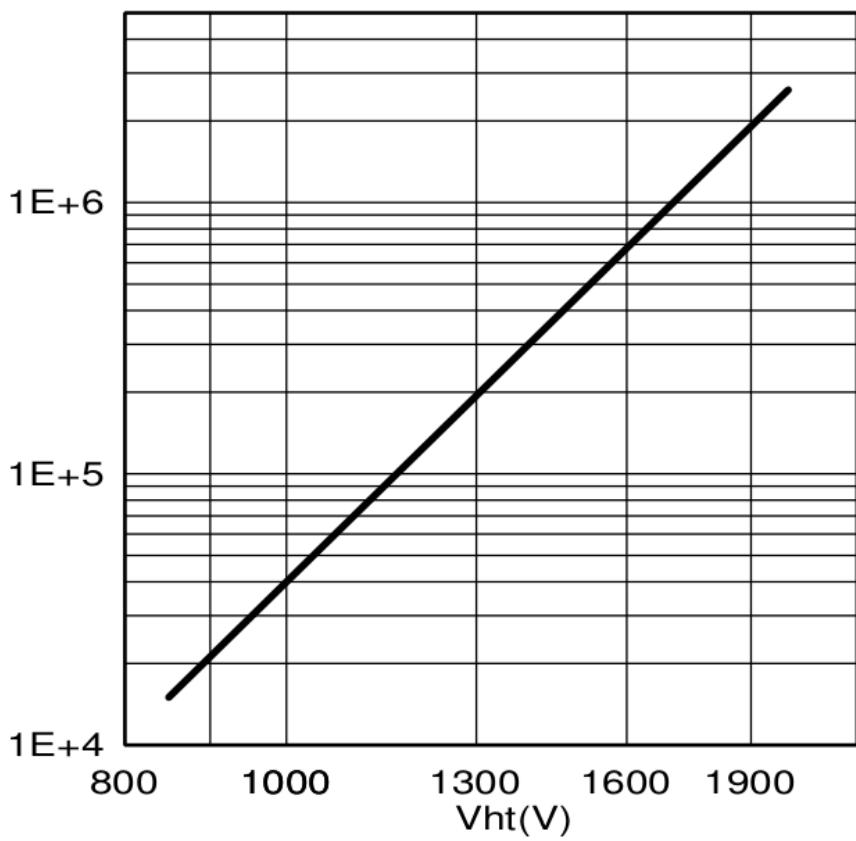
Sk (mA/W)

Typical spectral

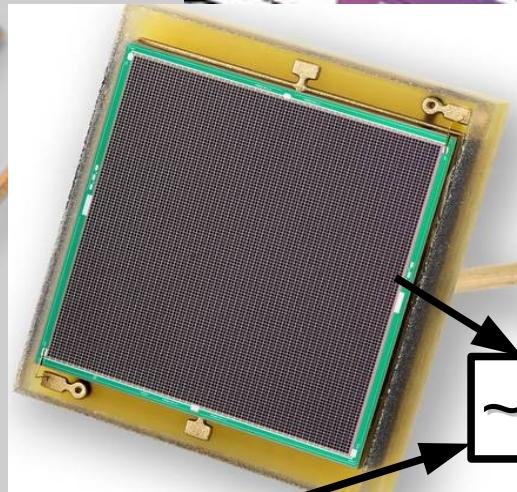
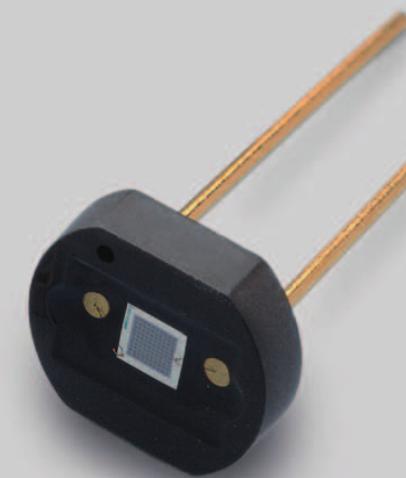


Gain

Typical gain curve



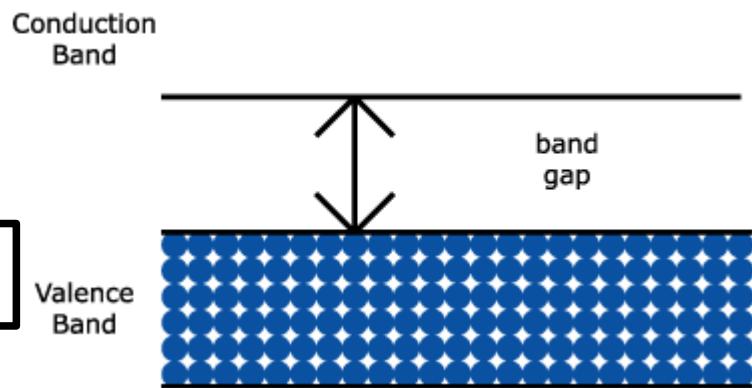
Silicon PhotoMultiplier (SiPM)



~ 3600

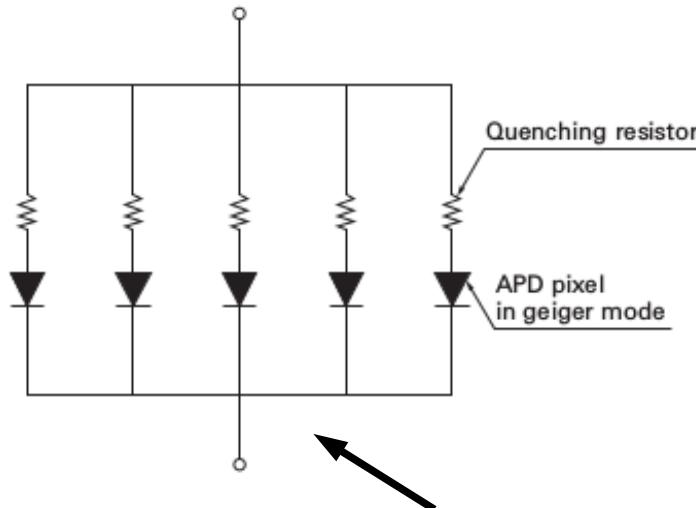
(50 μ m)

- Semiconductor



- Muchas celdas

- Diodo polarizado en inversa

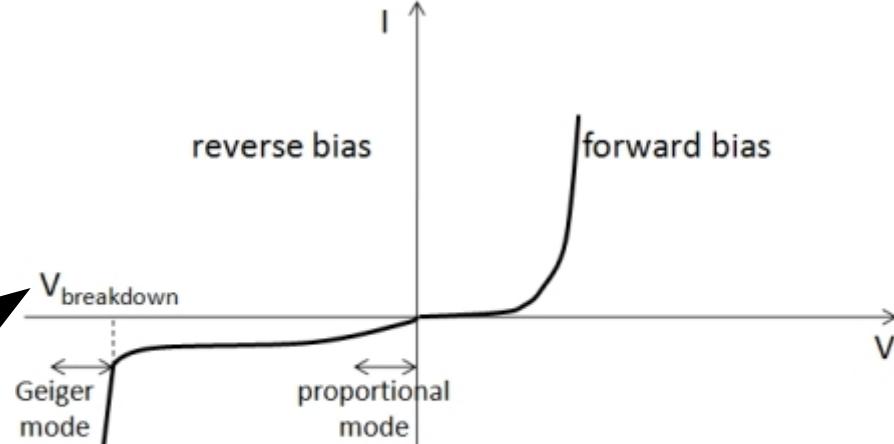


$$V_{overvoltage} \equiv V_{bias} - V_{breakdown}$$

Oct, 2016

Asorey - Balseiro 2016 Física M

Tensión a la que empieza a conducir

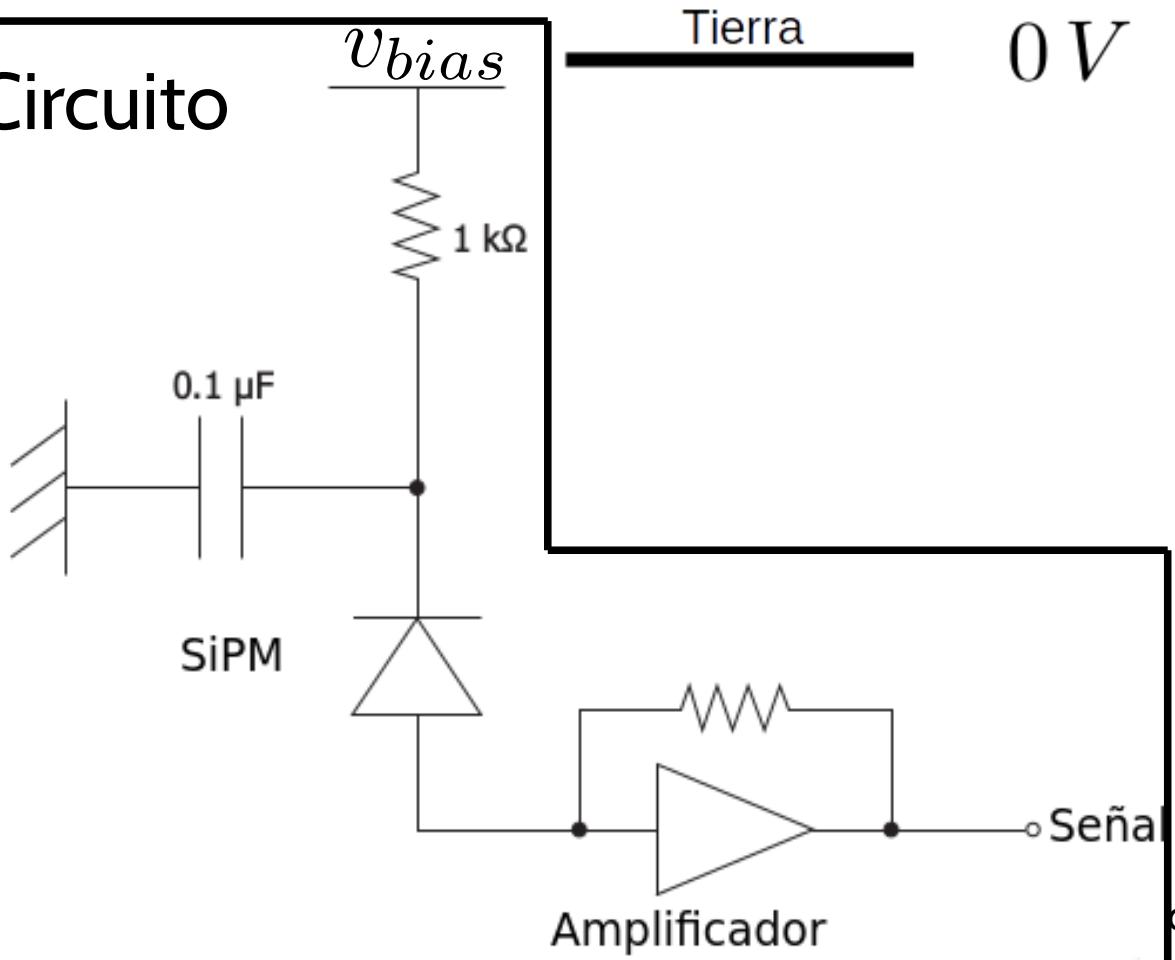


Electrónica

Aplicada
Conduce

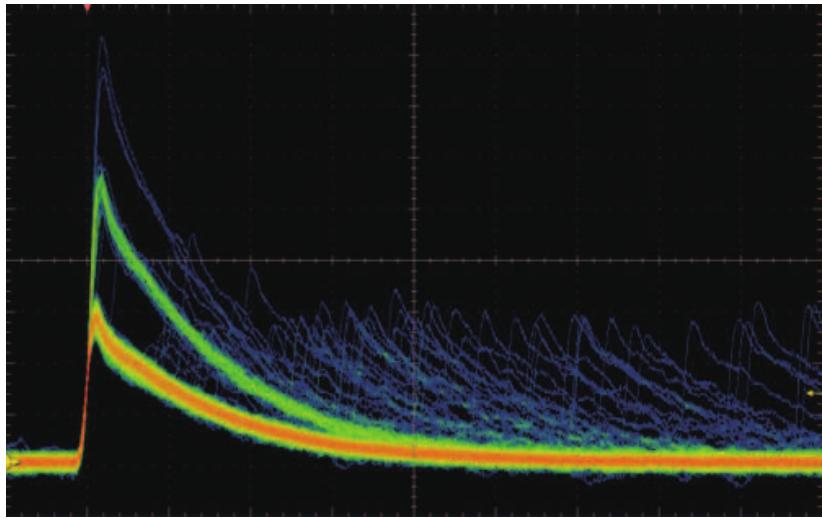
$$v_{bias} \sim 60 V \\ v_{bd} \sim 55 V \quad } v_{ov} \sim 5 V$$

Circuito



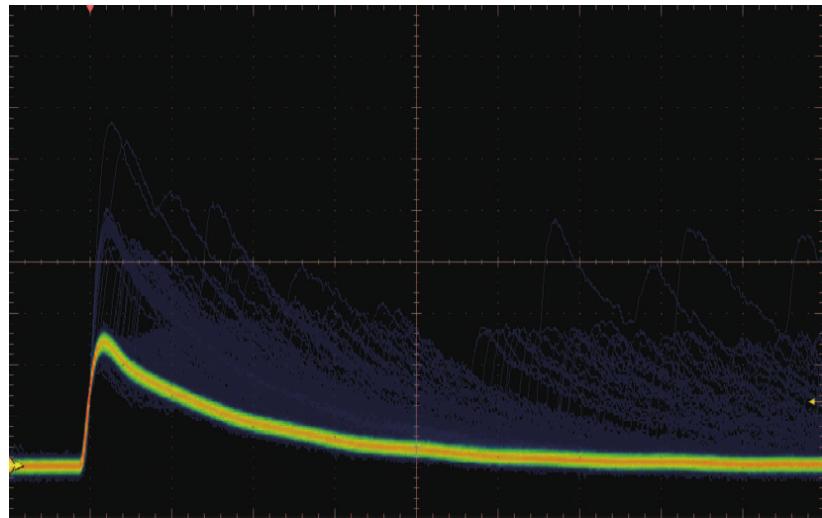
Output: Pulsos

- S11



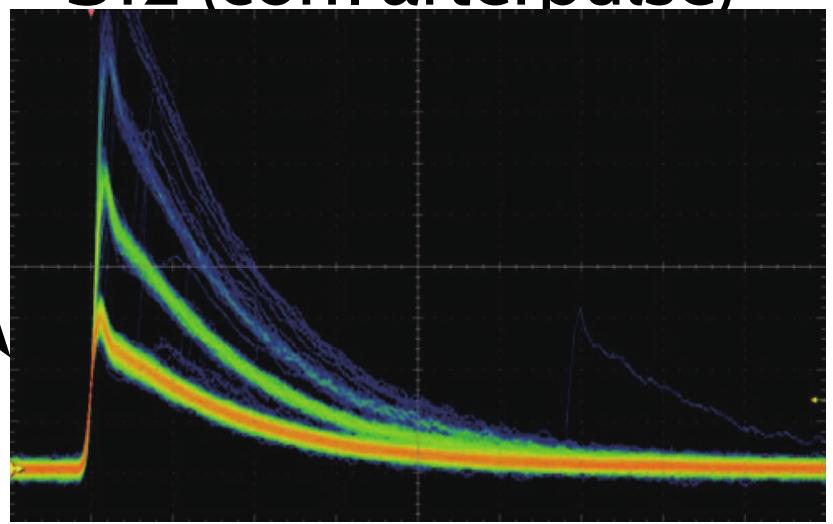
Datasheet

- S13 (corr. crosstalk)

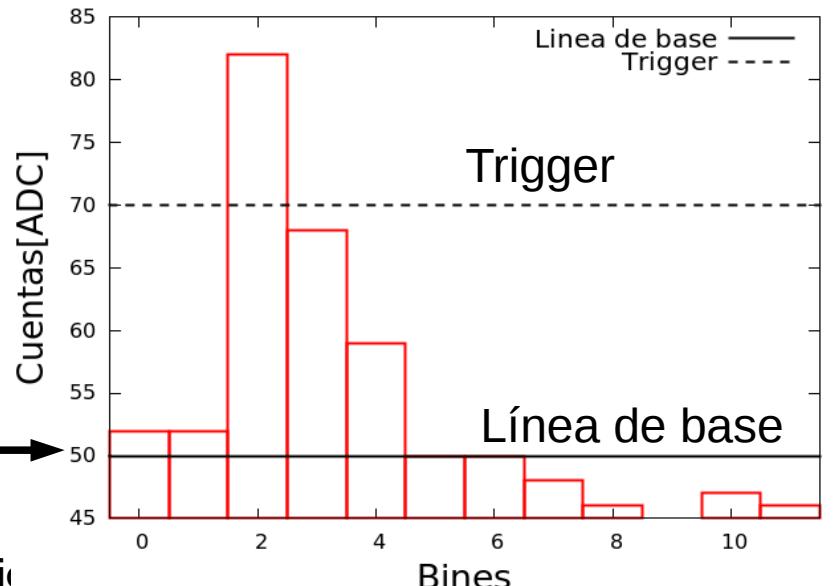


Datos

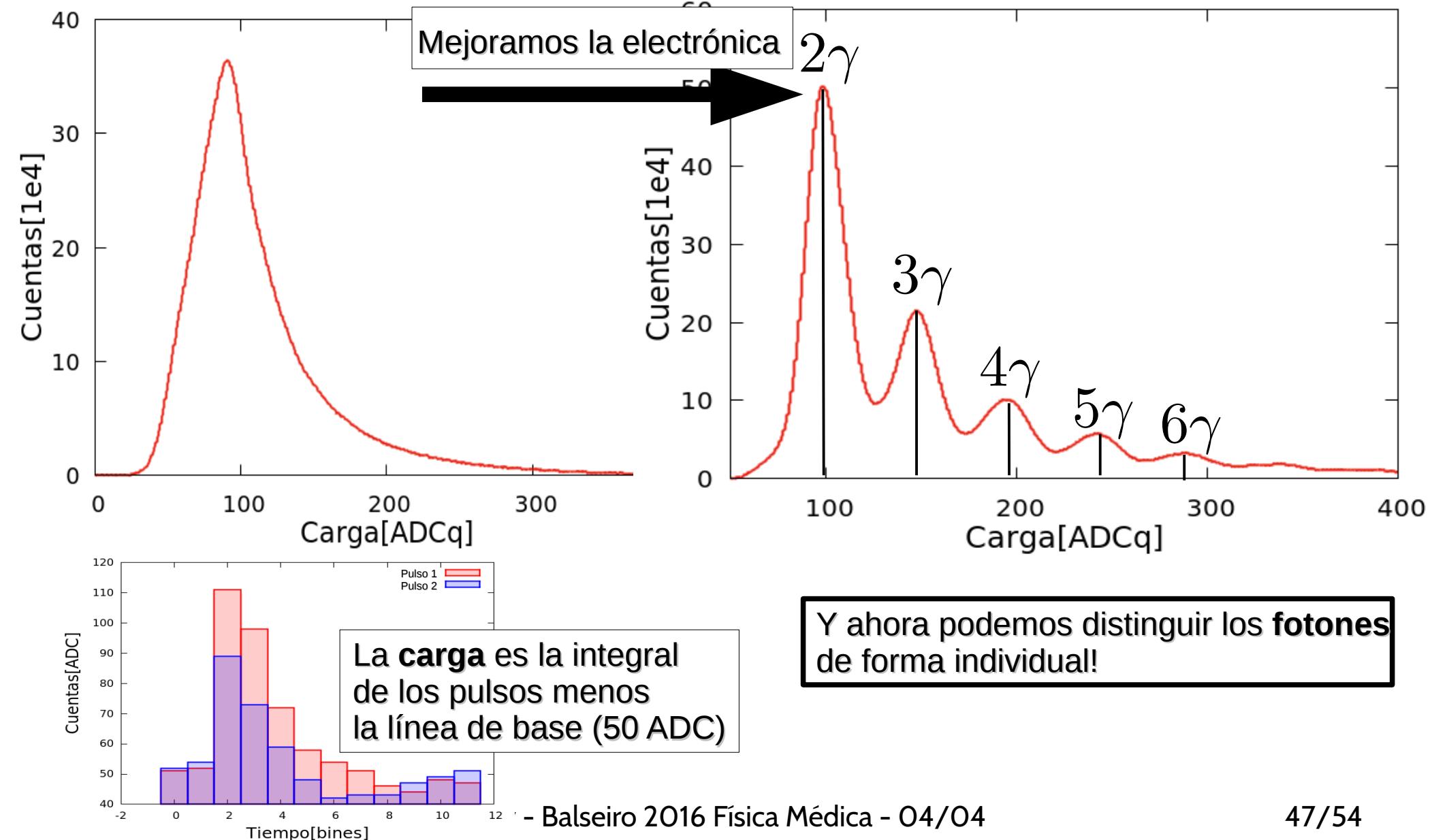
- S12 (corr. afterpulse)



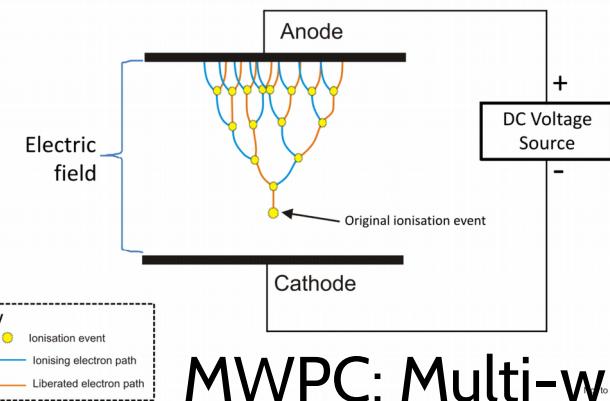
- Discretizado



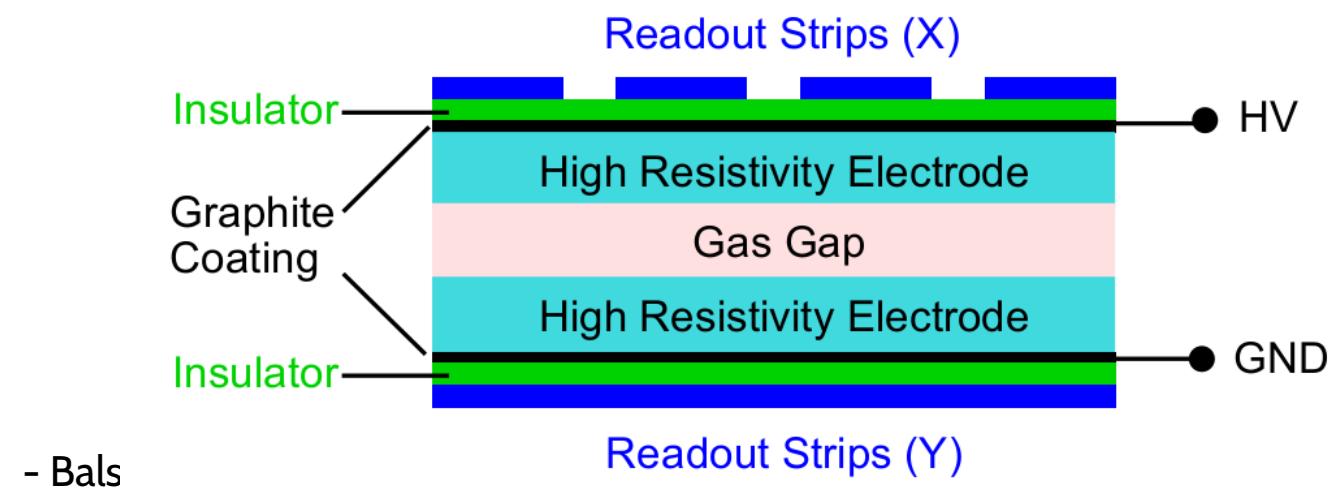
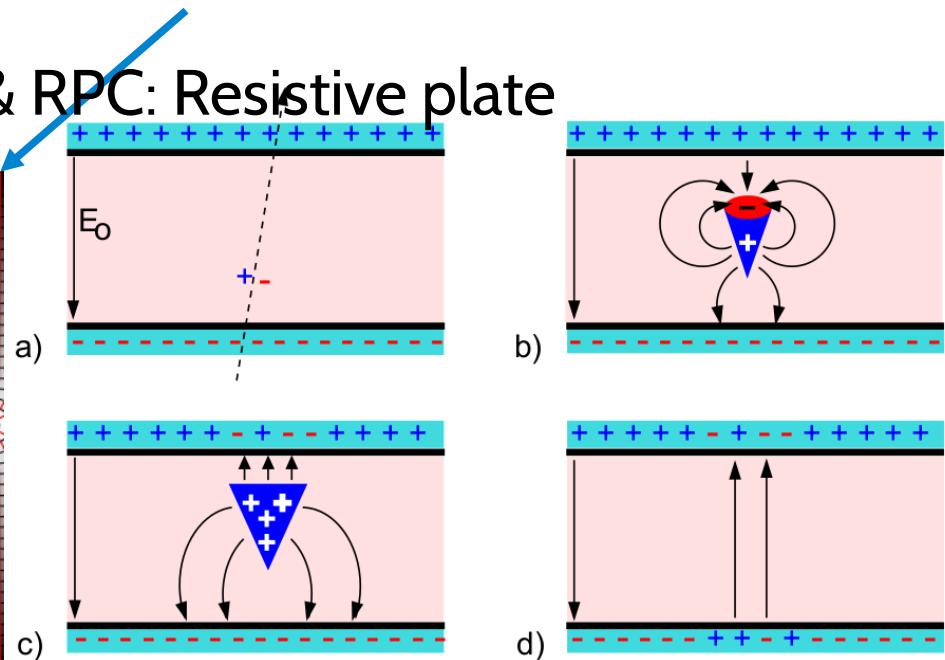
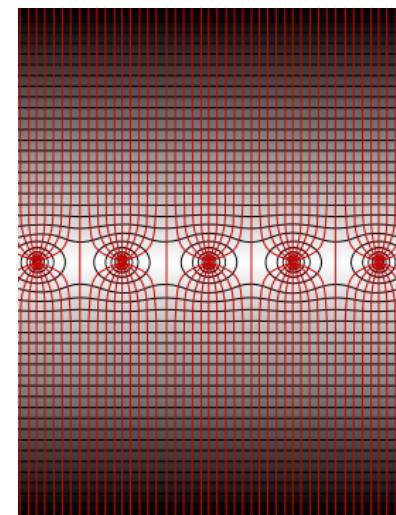
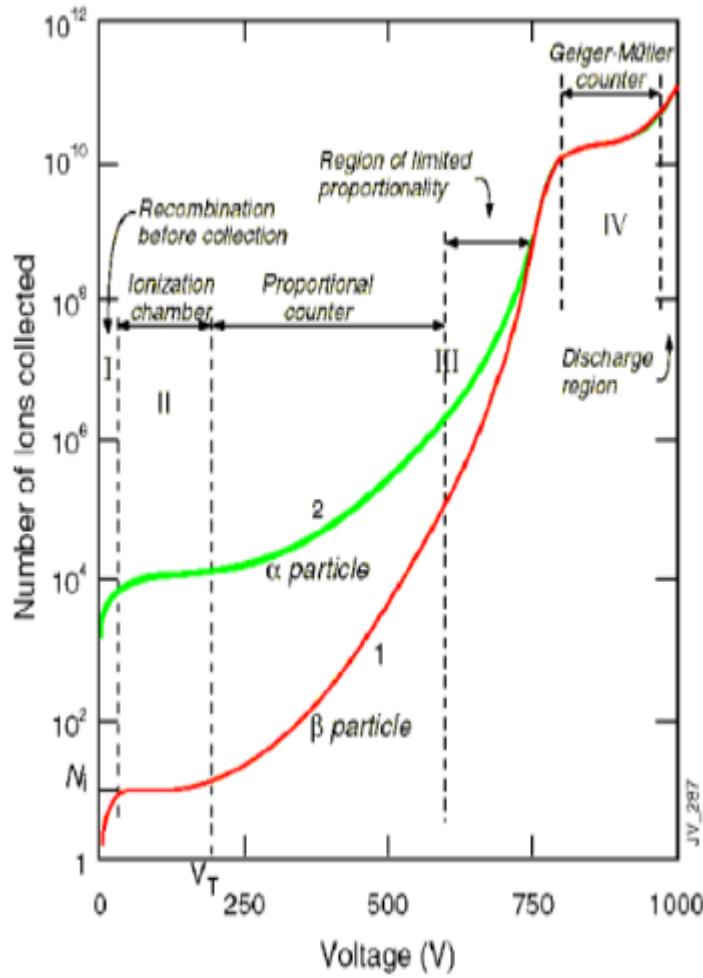
Histogramas de carga: Serie S12



Visualisation of a Townsend Avalanche

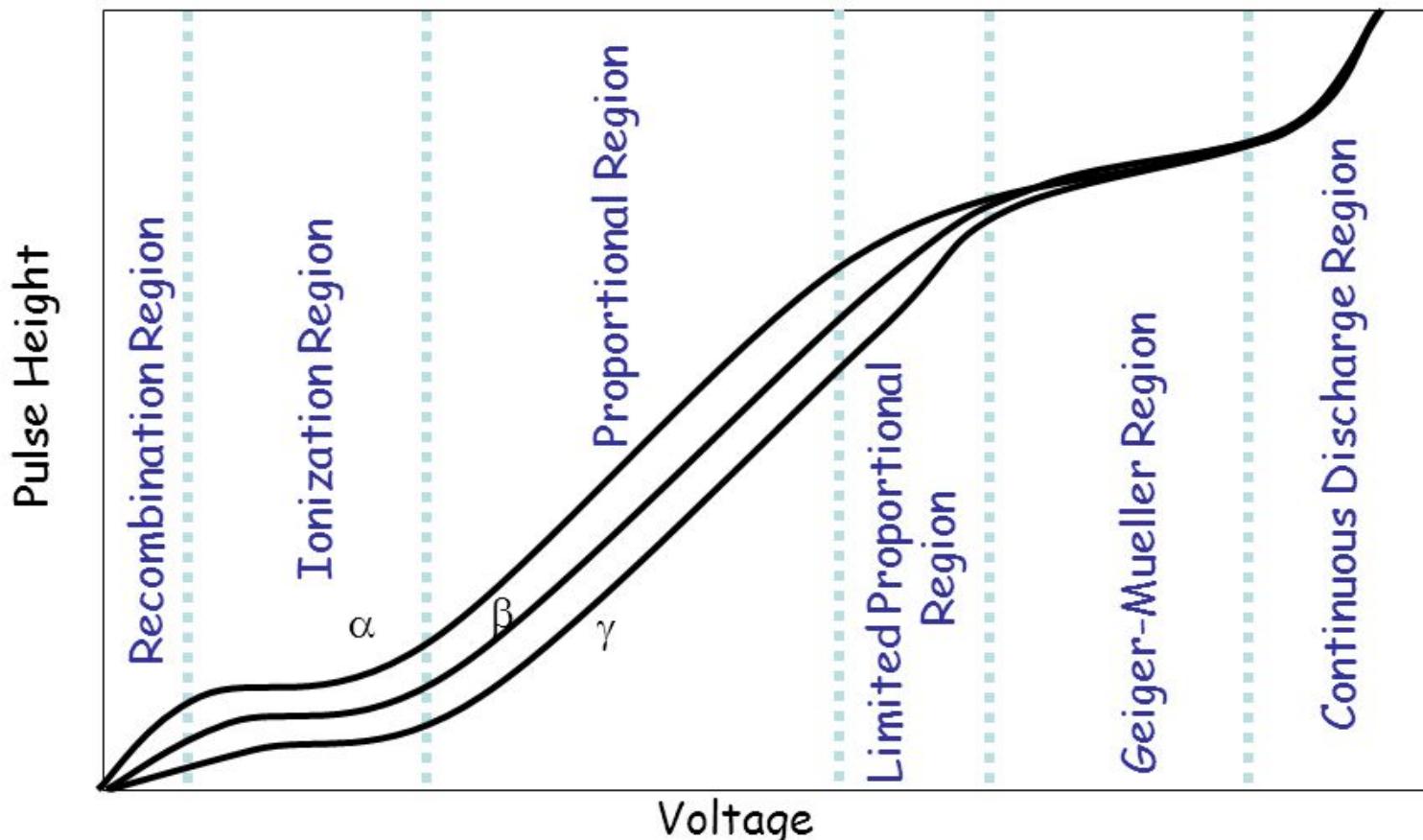


MWPC: Multi-wire proportional & RPC: Resistive plate



Ionización, reonización, avanlancha

Operating Regions of Gas-Filled Detectors



Centelladores plásticos Knoll cap. 8 y 10

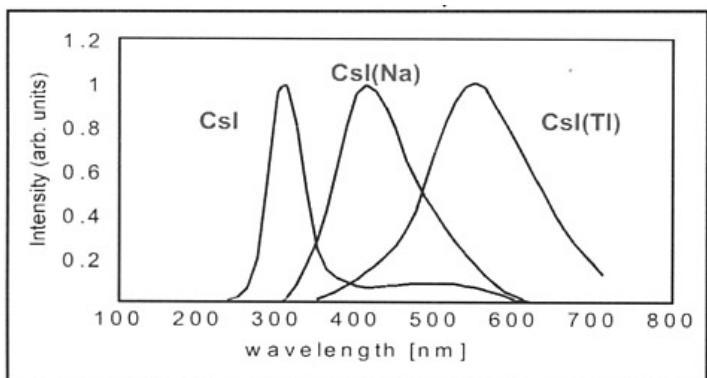
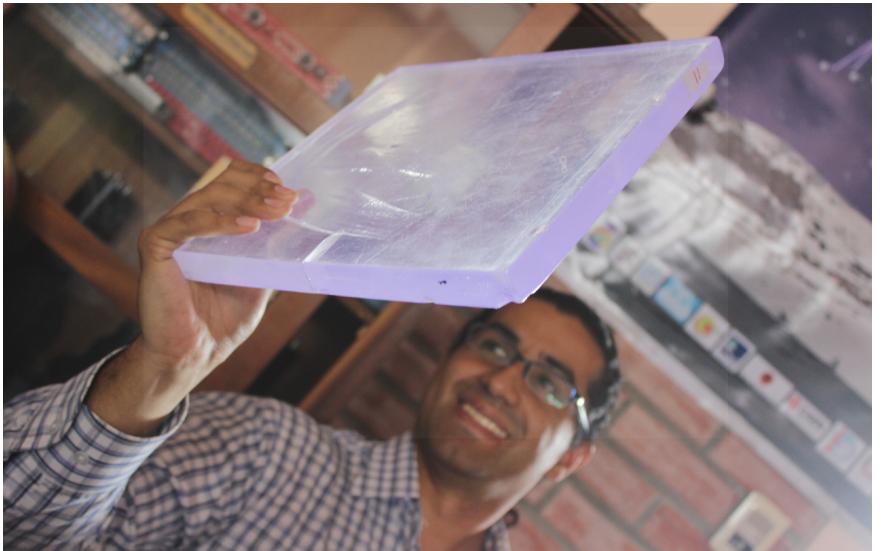
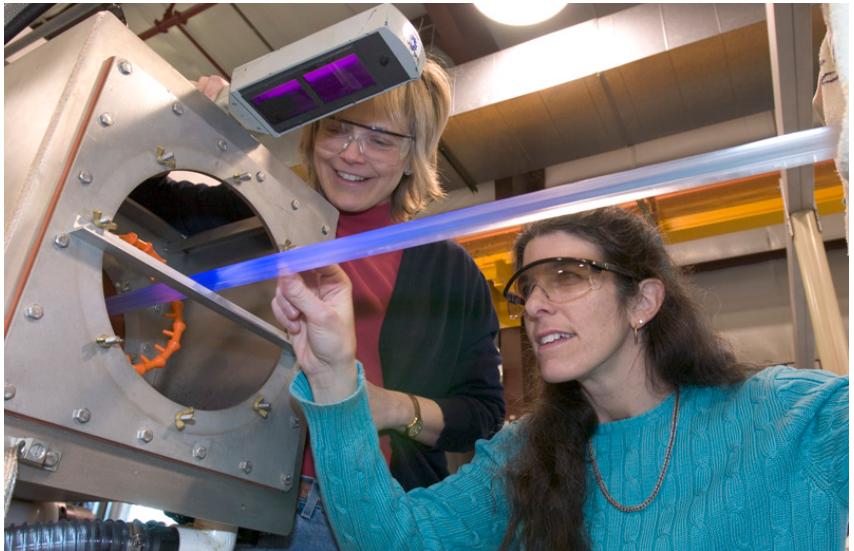
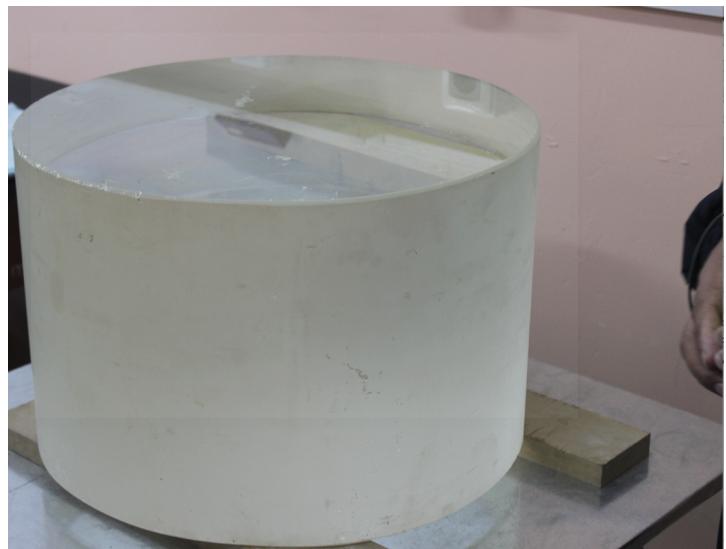
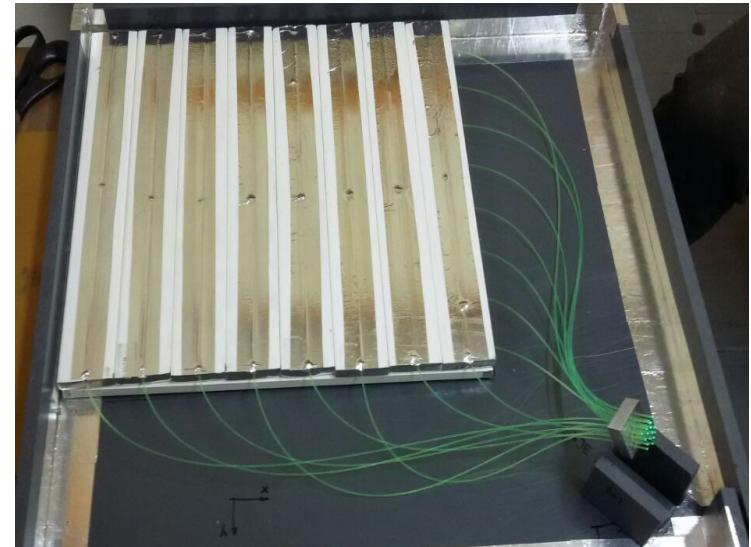
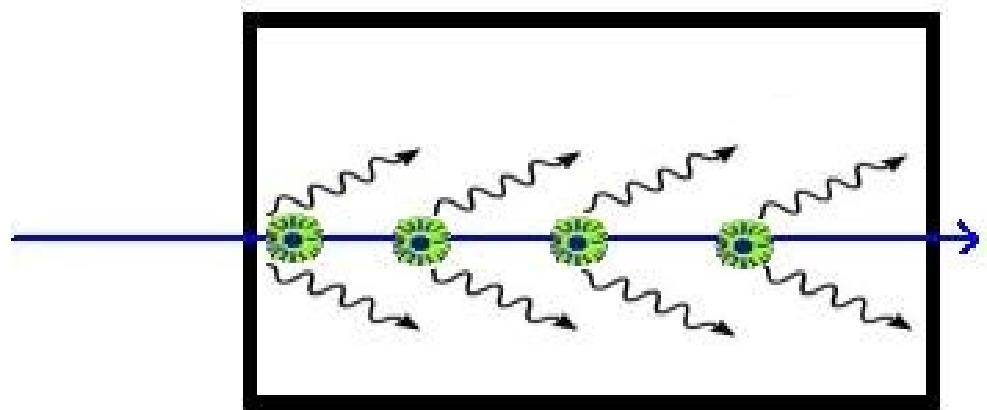
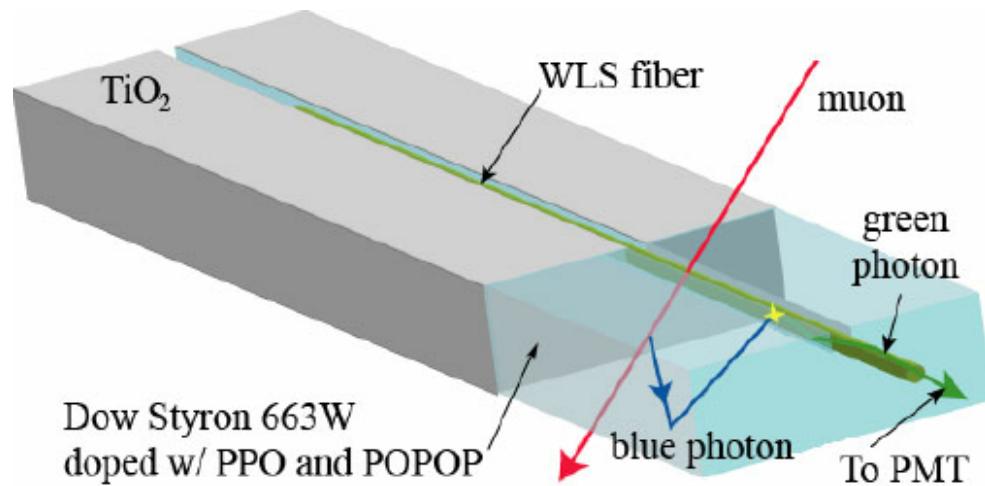


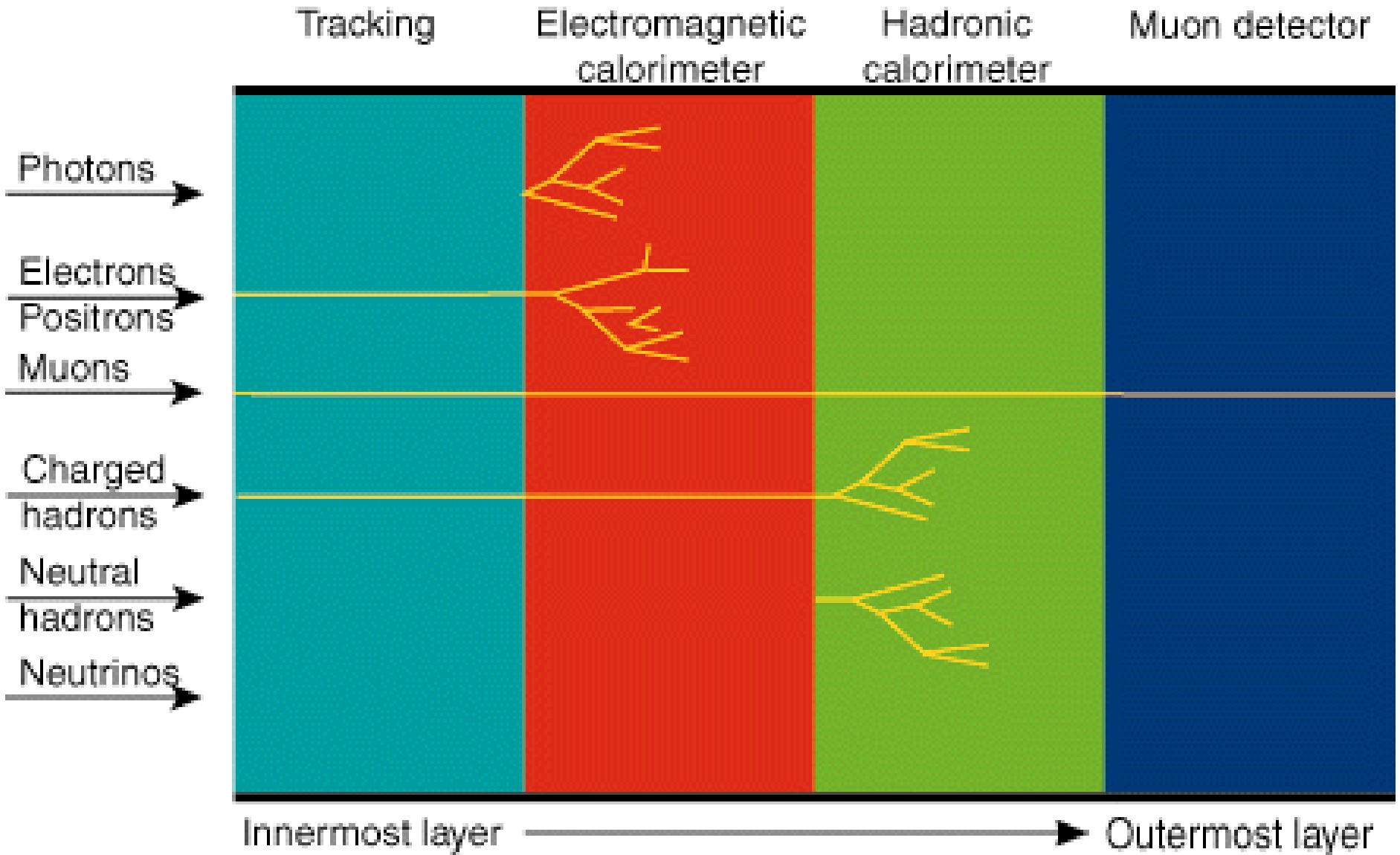
Fig. 3.2 Emission spectra of CsI, CsI(Na) and CsI(Tl) scaled on maximum emission intensity. Also a typical quantum efficiency curve of a bialkali photocathode is shown.



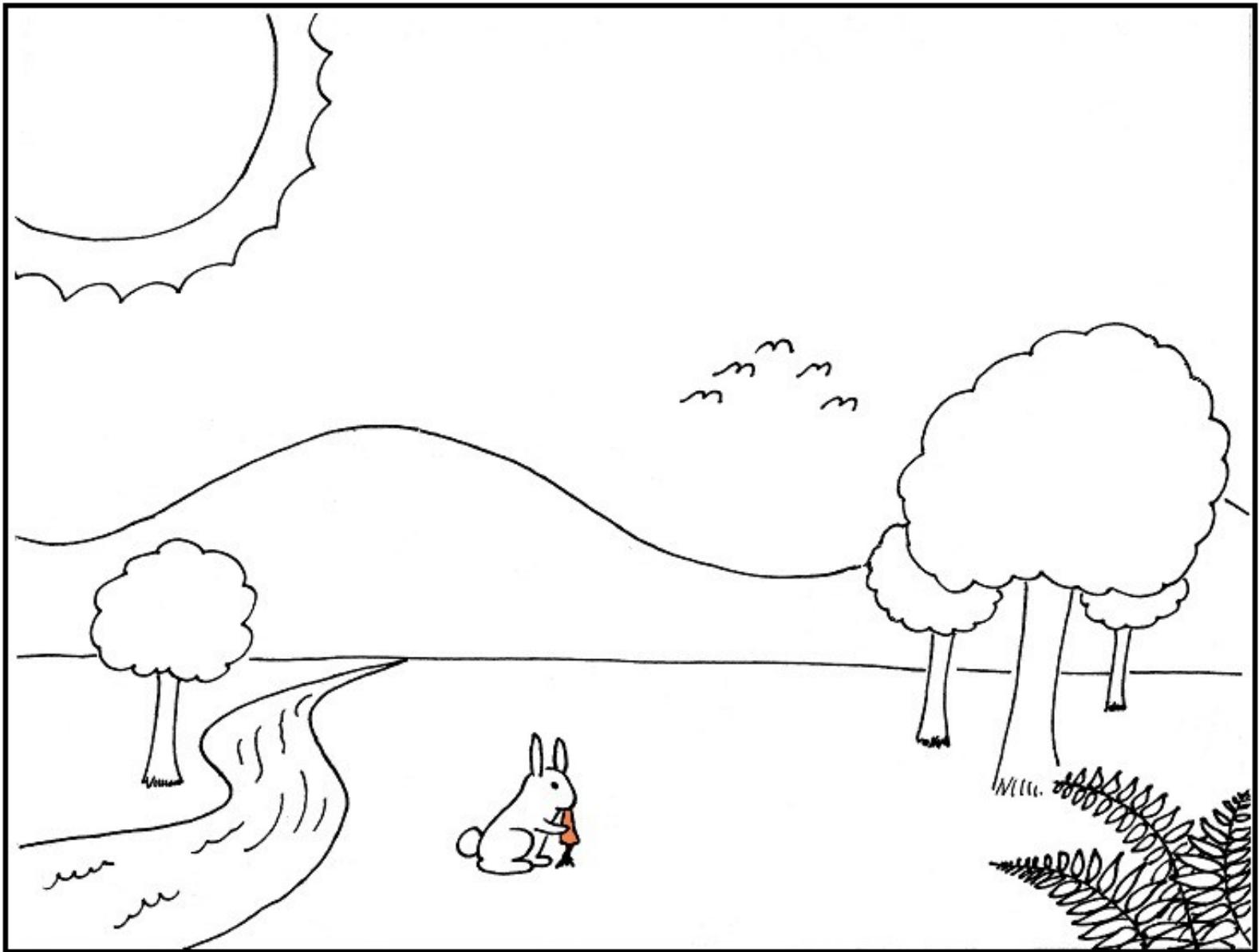
Centelladores plásticos



calorímetros



Tratamos de describir la naturaleza



Hacemos lo que podemos

