

Interacción de partículas neutras con la materia

Módulo de Instrumentación

Reina Camacho (CNRS/CERN, Francia y Suiza)
Carlos Sandoval (UNAL, Colombia)



Latin American alliance for
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea





Interacciones de partículas cargadas:

- **Ionización:** colisión inelástica con los electrones de los átomos
- **Bremsstrahlung:** emisión de radiación de fotones por una interacción de carga acelerada
- **Dispersión múltiple:** colisión elástica con el núcleo
- **Efectos Cerenkov y de radiación de transición:** emisión de fotones
- **Interacciones nucleares (p, n, K):** procesos mediados por interacciones fuertes)

Interacciones de partículas neutras:

- Fotones: **efectos fotoeléctricos y Compton, producción de pares $e^+ e^-$**
- Hadrones neutros de alta energía con $\tau > \sim 10^{-10}$ s (n, K^0 , ..) : **interacciones nucleares**
- Neutrones de energía moderada/baja: **dispersión** (moderación), **absorción, fisión**
- Neutrinos: procesos mediados por **interacciones débiles**

Tras la interacción, las partículas pierden su energía y/o cambian de dirección o "desaparecen"



LOS FOTONES EN LA MATERIA

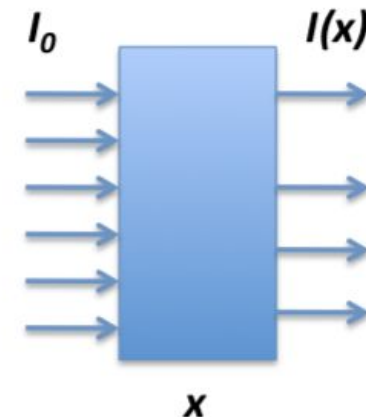
- Los fotones (γ) **son** partículas con $\mathbf{m}^\gamma = \mathbf{0}$, $\mathbf{q}^\gamma = \mathbf{0}$, $\mathbf{J}^{PC}(\gamma) = \mathbf{1}^{--}$
- Como $q^\gamma = 0$, los fotones **se detectan indirectamente**: en sus interacciones producen electrones y/o positrones que posteriormente interactúan electromagnéticamente con la materia
- Los **procesos principales**:
 - Efecto fotoeléctrico
 - Dispersión de Compton
 - Producción de pares $e^+ e^-$
- Los fotones **pueden ser absorbidos** (efecto fotoeléctrico o creación de pares e^+e^-) o **dispersados** (dispersión Compton). Su energía puede cambiar drásticamente
- Debido a las interacciones, el flujo de fotones en un material se reduce caracterizado por la **longitud de atenuación** (coeficiente de absorción $\mu = 1/\lambda$)



$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\mu = N \sigma = \frac{N_A}{A} \rho \sigma \equiv \frac{1}{\lambda}$$

μ coeficiente de absorción
 N átomos/ m^3
 A masa molar
 N_A número de Avogadro
 ρ densidad
 σ sección eficaz del fotón
 λ camino libre medio o longitud de absorción





EFECTO FOTOELÉCTRICO

- Absorción de fotones por el electrón ligado a un átomo y transferencia de su energía a este electrón
- Conservación de E:

$$E_e = E_\gamma - E_{\text{electron binding energy}} = h\nu - E_b$$

($E_b \sim 13,6 \text{ eV}$, energía de enlace del átomo)

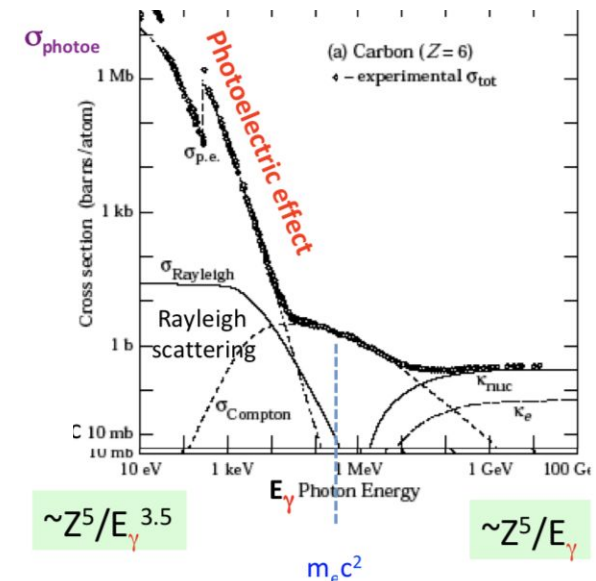
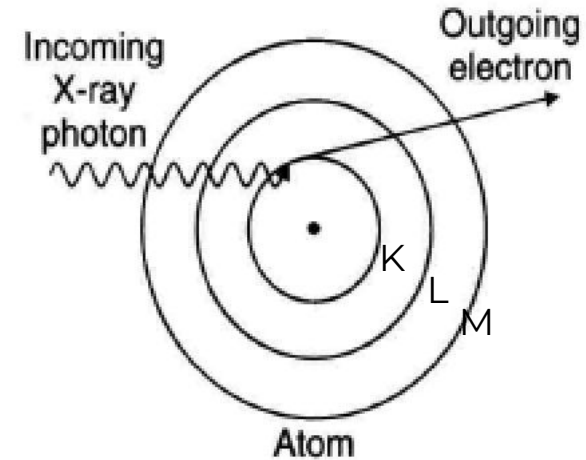
- Este efecto sólo puede tener lugar en electrones ligados ya que el proceso en electrones "libres" $\gamma e \rightarrow e$ no puede conservar el momento y la energía

- A « baja » energía ($I_0 \ll E_\gamma \ll m_e c^2$):

$$\sigma_{ph} = \frac{8}{3} \pi r_e^2 \alpha^4 Z^5 \sqrt{32} \left(\frac{m_e c^2}{E_\gamma} \right)^{7/2}$$

- A « alta » energía ($E_\gamma \gg m_e c^2$):

$$\sigma_{ph} = 4 \pi r_e^2 \alpha^4 Z^5 \left(\frac{m_e c^2}{E_\gamma} \right)$$



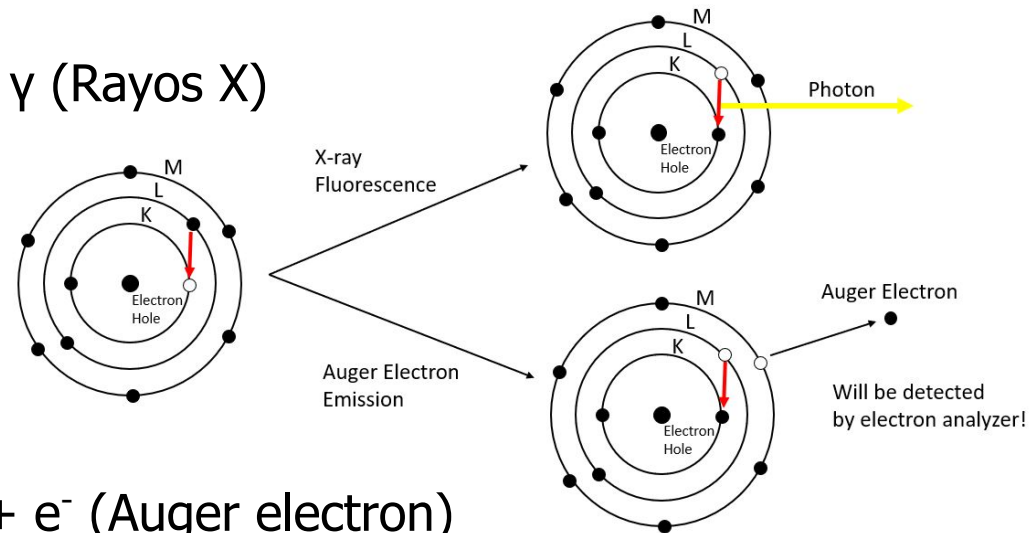
Fuerte dependencia con Z. Dominante a bajas energías ($E_\gamma < 100 \text{ keV}$)



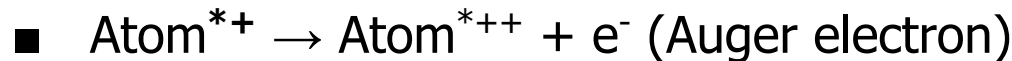
DESEXCITACIÓN DEL ÁTOMO (tras el efecto fotoeléctrico)

- Tras la emisión de un "fotoelectrón", el átomo se encuentra en un estado de excitación
- La desexcitación se produce mediante dos efectos (escala de tiempo: $\sim 10^{-16}$ s)

- Fluorescencia:



- Efecto Auger:



- Los e^- Auger depositan energía localmente (energía pequeña $< \sim 10$ KeV)
- El efecto de fluorescencia será muy útil cuando hablemos sobre detectores centalleadores
- El efecto Auger fue descubierto independientemente por Lise Meitner y Pierre Auger en los años 1920s

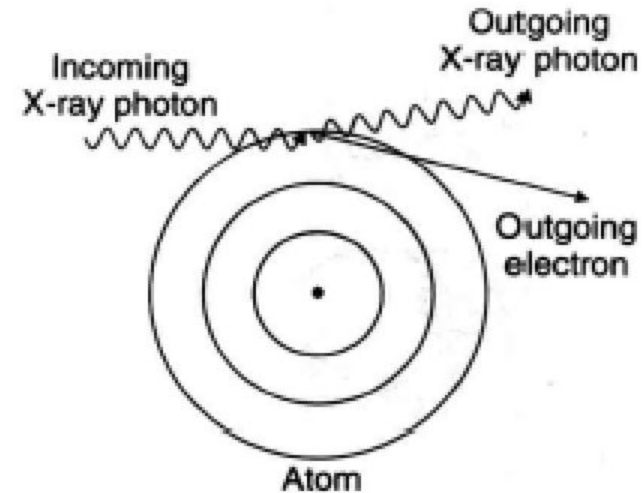


EFECTO COMPTON

- Dispersión del fotón incidente ($P_\gamma = (0, P_\gamma)$) por un electrón en reposo ($P_e = (m_e c^2, 0)$) \rightarrow cambio de frecuencia del fotón dispersado
- Por conservación del 4-momento la energía cinética transferida al e^- es:

$$T'_e = \frac{E_\gamma^2}{m_e c^2} \frac{1 - \cos \theta}{1 + (E_\gamma / m_e c^2)(1 - \cos \theta)}$$

θ es el ángulo de dispersión del fotón



- γ Forward scattering $\theta_\gamma = 0 \rightarrow E_{\gamma'} = E_{\gamma'}^{\max} = E_\gamma \rightarrow \mathbf{T}_e = \mathbf{0}$
 - El fotón mantiene su energía total
- γ Backward scattering $\theta_\gamma = \pi \rightarrow E_{\gamma'} = E_{\gamma'}^{\min} \rightarrow \mathbf{T}_e$ es máxima
 - El fotón no puede ser absorbido completamente



EFECTO COMPTON

- Dispersión del fotón incidente ($P_\gamma = (0, P_\gamma)$) por un electrón en reposo ($P_e = (m_e c^2, 0)$) \rightarrow cambio de frecuencia del fotón dispersado
- Por conservación del 4-momento la energía cinética transferida al e^- es:

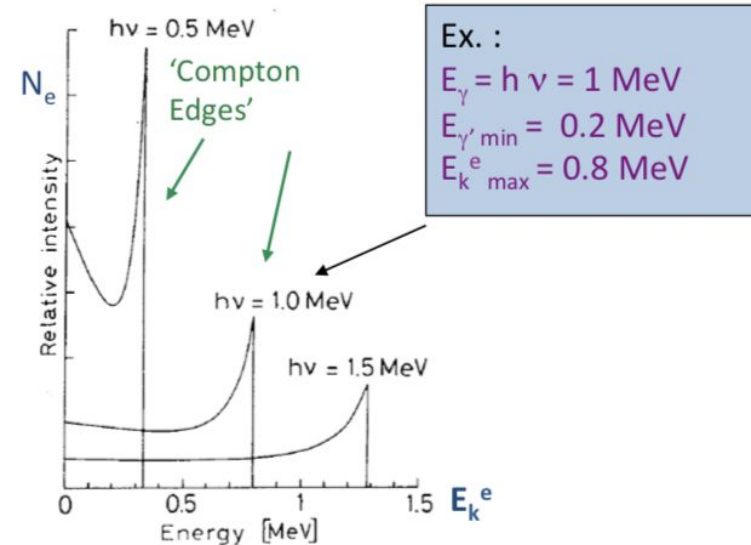
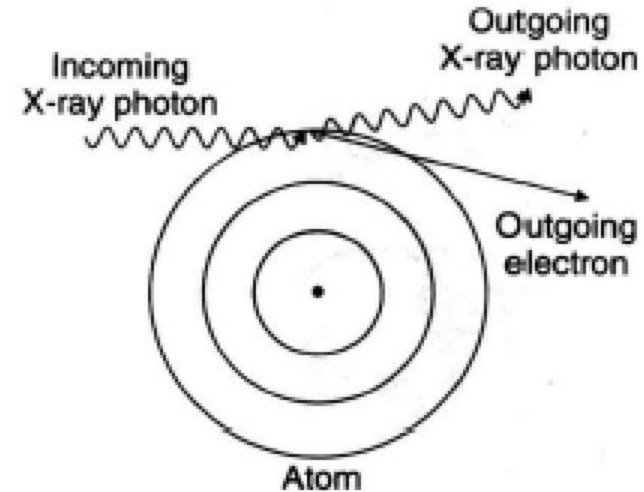
$$T'_e = \frac{E_\gamma^2}{m_e c^2} \frac{1 - \cos \theta}{1 + (E_\gamma / m_e c^2)(1 - \cos \theta)}$$

θ es el ángulo de dispersión del fotón

- γ Backward scattering $\theta_\gamma = \pi$. La máxima energía cinética transferida al electrón es:

$$T'_e(max) = \frac{E_\gamma^2}{m_e c^2} \frac{2}{1 + 2(E_\gamma / m_e c^2)}$$

La transferencia de la energía total de γ al e^- por Compton no es posible. De ahí que haya un corte brusco en T'_e^{max} dando lugar al borde Compton



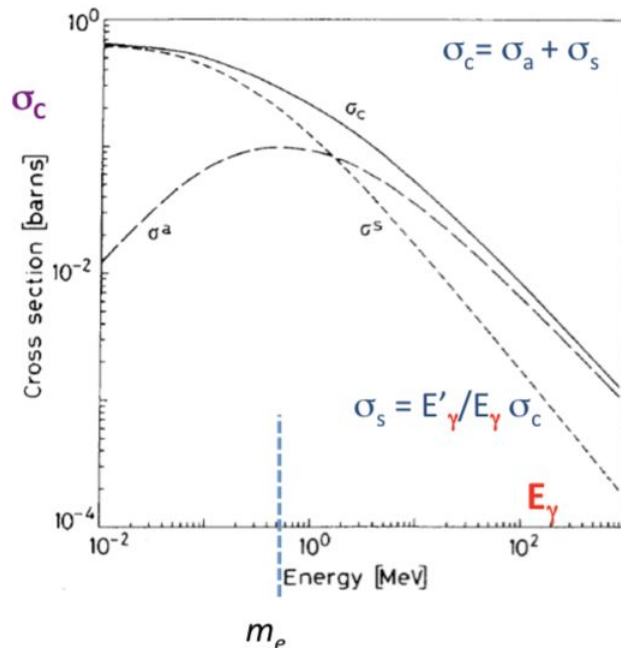


EFECTO COMPTON

- La dispersión Compton es el proceso electromagnético más conocido
 - Sección transversal de dispersión Klein-Nishima

$$\sigma_c = 2 \pi r_e^2 \left\{ \left(\frac{1+\epsilon}{\epsilon^2} \right) \left[\frac{2(\epsilon+1)}{1+2\epsilon} - \frac{1}{\epsilon} \ln(1+2\epsilon) \right] + \frac{1}{2\epsilon} \ln(1+2\epsilon) - \frac{1+3\epsilon}{(1+2\epsilon)^2} \right\} \quad \epsilon = E_\gamma / m_e c^2$$

$$\sigma_c \approx \frac{8}{3} \pi r_e^2 (1-\epsilon) \quad \text{for } E_\gamma \ll m_e c^2 \quad \sigma_c \approx \pi r_e^2 \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{1}{2} + \ln 2\epsilon \right) \quad \text{for } E_\gamma \gg m_e c^2$$



@ Small photon energy ($E_\gamma \ll m_e c^2$)

$$\sigma_c = \sigma_{Th} (1 - E_\gamma / (m_e c^2)) \quad \sigma_{Th} = 8\pi/3 r_e^2 = 0.66 \text{ barn} \quad (\sigma_{Th}) = \text{Thomson } \sigma$$

@ Large photon energy ($E_\gamma \gg m_e c^2$)

$$\sigma_c \sim (\ln E_\gamma) / E_\gamma$$

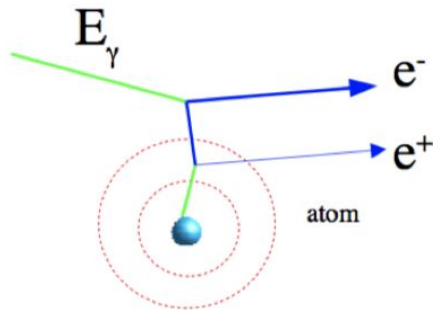
Cross section per atom:

$$\sigma_c^{atom.} = Z \sigma_c^e$$

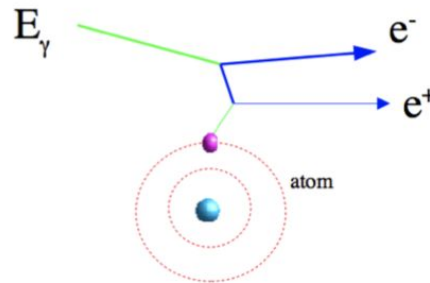


PRODUCCIÓN DE PARES (o conversión de fotones)

- Debido a la conservación de la energía-momento este proceso no puede tener lugar en el "vacío", es necesario una interacción con un campo electromagnético



Pair production in the field of the nucleus



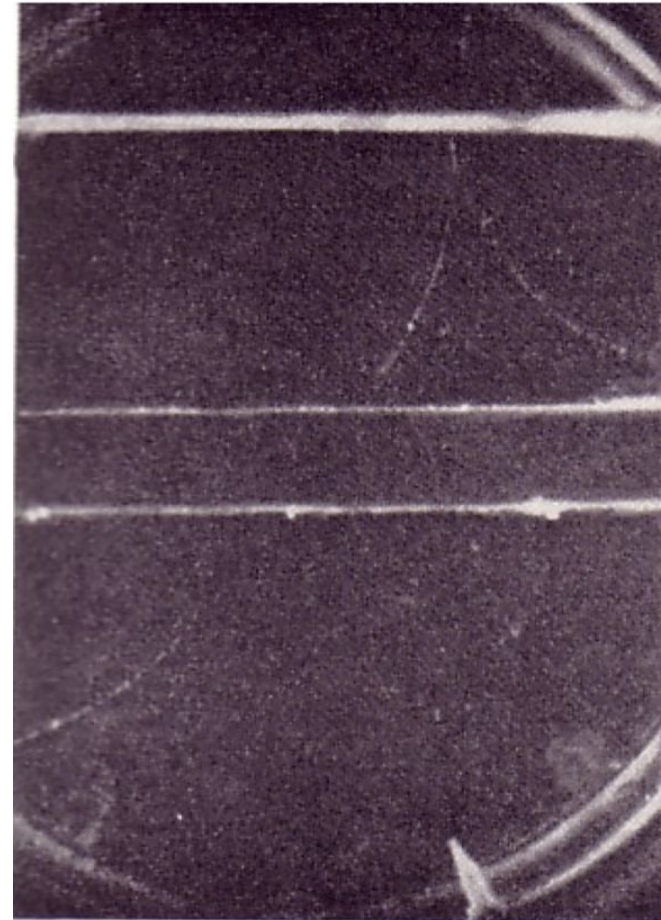
Pair production in the field of an electron (smaller probability $\sim 1/Z$)

- La producción de un par e^-e^+ por un fotón es posible cuando E_γ supera el umbral

$$E_\gamma > 2 m_e c^2 (1 + m_e / m_x)$$

El segundo término corresponde a la energía cinética transferida al target (bien sea un núcleo o un electrón)

- Producción de pares en un Pb plate \longrightarrow





PRODUCCIÓN DE PARES (o conversión de fotones)

- Sección eficaz de la producción de pares:

$$\epsilon = \frac{E_\gamma}{m_e}$$

$$1 \ll \epsilon < \frac{1}{\alpha Z^{1/3}}$$

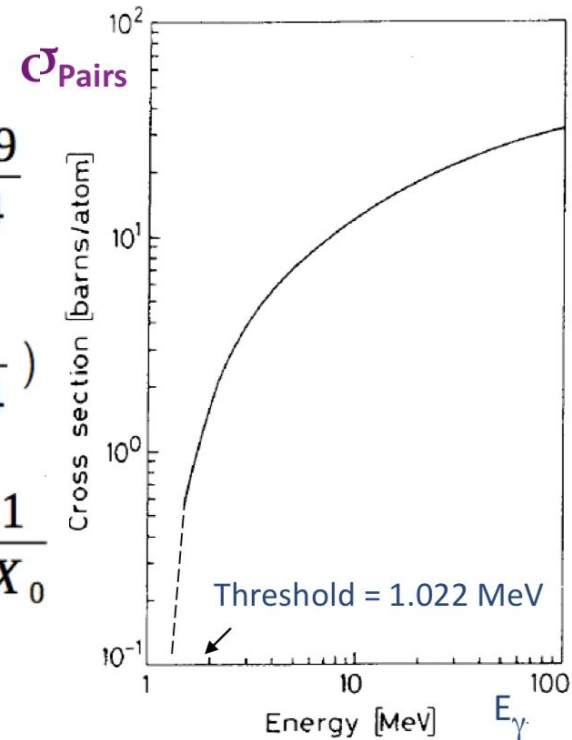
$$\sigma_{pair}^{atom.} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left(\frac{7}{9} \ln(2\epsilon) - \frac{109}{54} \right)$$

$$\epsilon \gg \frac{1}{\alpha Z^{1/3}}$$

$$\sigma_{pair}^{atom.} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left(\frac{7}{9} \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) - \frac{1}{54} \right)$$

A altas energías ($E_\gamma \rightarrow \infty$) la sección eficaz es independiente de E_γ (precisión de % hasta energías tan bajas como 1 GeV, en particular para materiales de alta Z)

$$\sigma_{pair}^{atom.} \simeq \frac{7}{9} \frac{A}{N_A} \frac{1}{X_0}$$



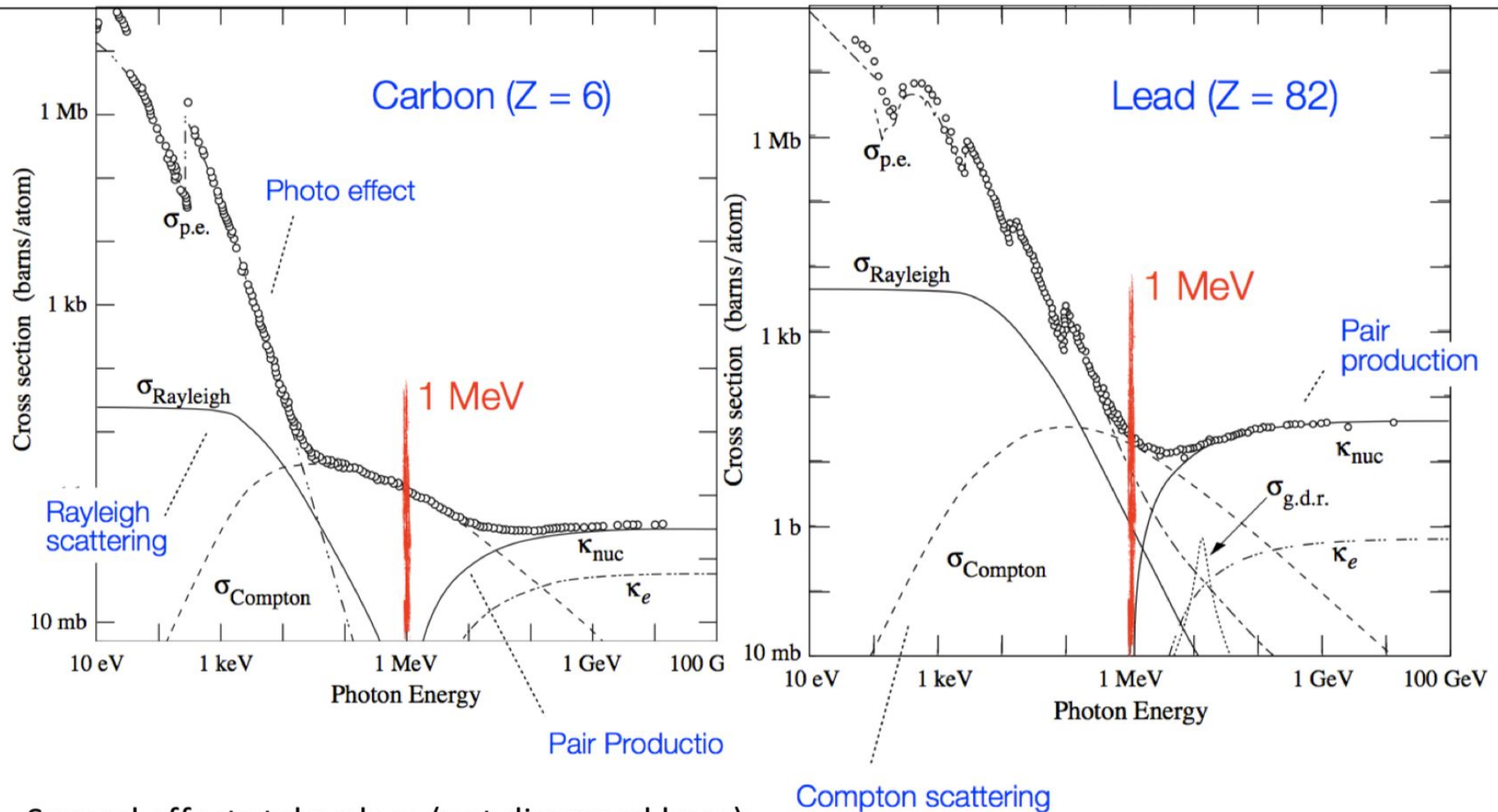
- Entonces la probabilidad dw de conversión del fotón en una trayectoria pequeña dx es aproximadamente:

$$dw = \frac{7}{9} \frac{dx}{X_0} \Rightarrow N_{pair}(x) = N(0) e^{-(7/9)x/X_0} \quad \begin{array}{l} X_0 \text{ longitud de radiación} \\ \text{Bremsstrahlung (cm)} \end{array}$$

- La probabilidad de producción de creación de pares en $1 X_0$ es $\exp(-7/9)$.
El camino libre medio de un fotón antes de crear un par e^-e^+ es $\lambda = (9/7)X_0$



RESÚMEN INTERACCIONES DE FOTONES CON LA MATERIA



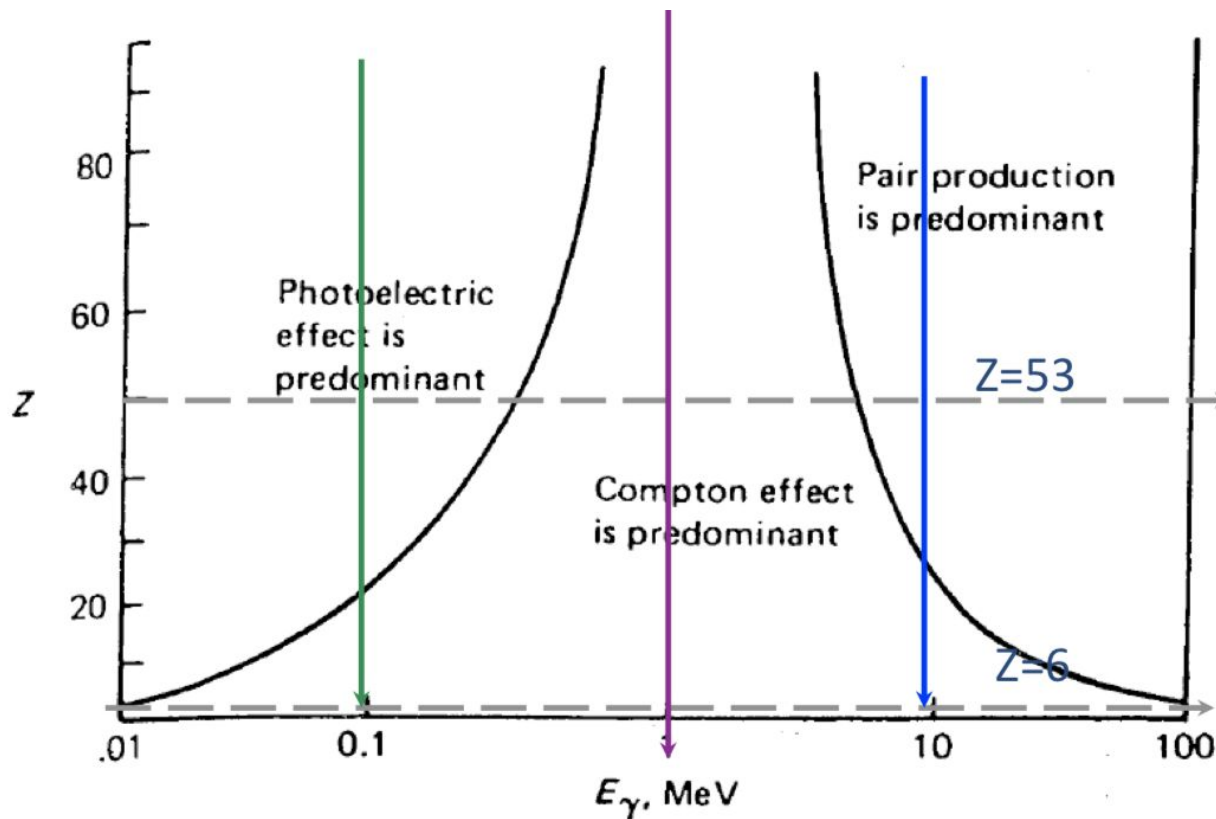
Several effects take place (not discussed here):

Rayleigh Scattering

Photo Nuclear Interactions (giant dipole resonance).



DEPENDENCIA EN Z Y ENERGÍA



- $E_\gamma = 0,1$ MeV

en C ($Z=6$) El efecto Compton es dominante

en I ($Z=53$) El efecto fotoeléctrico es dominante

- $E_\gamma = 1$ MeV

El efecto Compton es dominante

- $E_\gamma = 10$ MeV

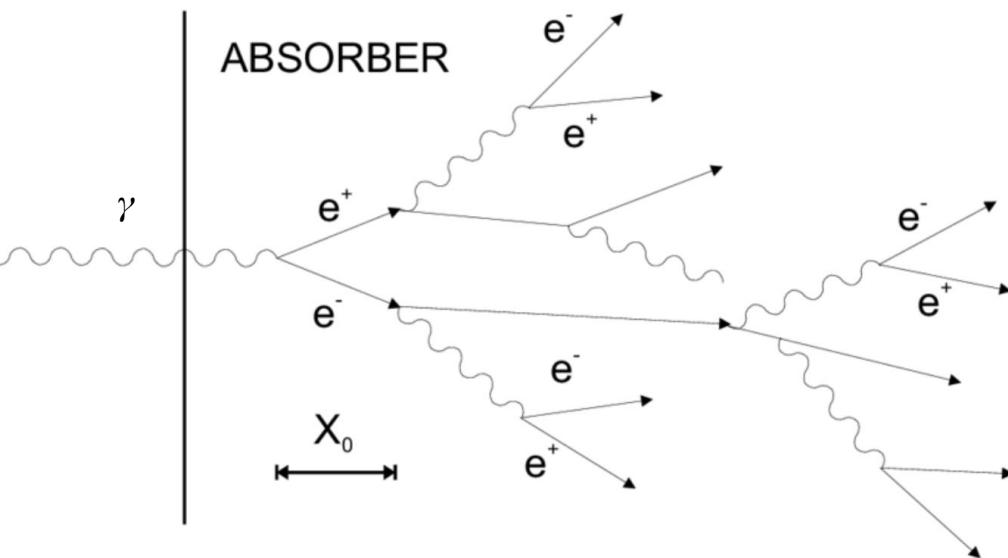
en C ($Z=6$) El efecto Compton es dominante

en I ($Z=53$) la producción de pares es dominante



CASCADAS ELECTROMAGNÉTICAS

- Electrones y fotones con altas energías producen cascadas electromagnéticas cuando interactúan con el material del detector



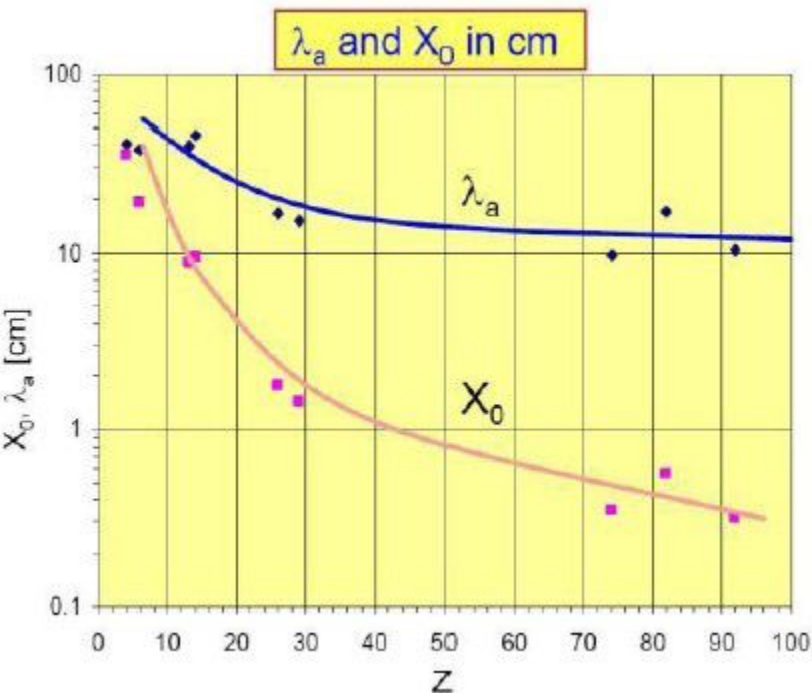
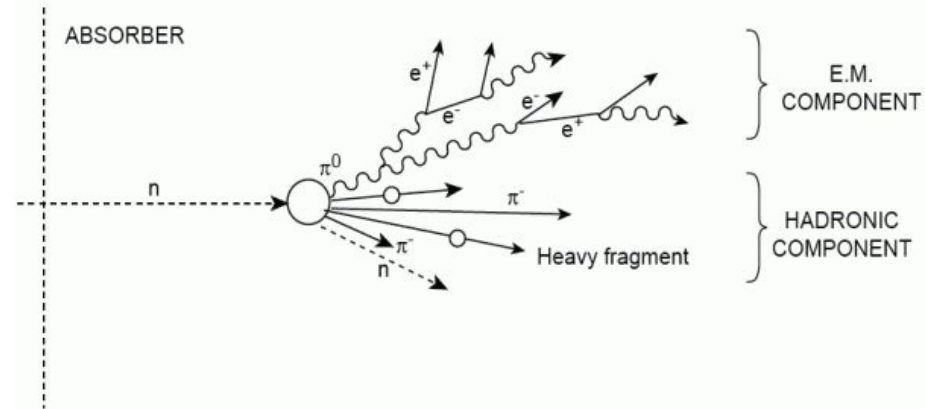
- El fotón de alta energía produce pares e-e+ (producción de pares).
- Los e- y e+ emiten más γ 's, que producen pares e+e-, etc, etc
- La multiplicación de partículas continúa hasta que la energía media energía de las partículas es igual a la energía crítica, ϵ_c .
- Por debajo de ese valor los electrones pierden su energía principalmente por colisiones con los átomos y moléculas de la materia material, dando lugar a la ionización y a la excitación térmica; los fotones pierden su energía a través de la dispersión Compton y el efecto fotoeléctrico
- Si la partícula penetrante es un electrón, la lluvia comienza con la emisión de un fotón de bremsstrahlung

- Aprenderemos más sobre cómo caracterizar estas cascadas en la clase de calorimetría!



INTERACCIONES DE HADRONES

- La interacción de hadrones de alta energía a través de la materia implica interacciones nucleares
 - Excitación
 - Ruptura nuclear → producción de partículas secundarias + fragmentos



- Para $E > 1 \text{ GeV}$ $\sigma \sim \sigma_0 A^{0.7}$, con $\sigma_0 = 35 \text{ mb}$, $\sigma_0 \sim$ a la sección eficaz nuclear geométrica
- Principalmente independiente del tipo de partícula: p, K, \dots
- Cuando hablamos de cascadas hadrónicas es conveniente para introducir la longitud de interacción (absorción) hadrónica, λ_I

$$\lambda_I = \frac{A}{N_A \sigma_{nuc}^{tot}} \propto A^{1/3} \Rightarrow N(x) = N_0 e^{-x/\lambda_I}$$

En materiales de alto A $\lambda_I > X_0$ → los calorímetros de hadrones se instalan después de los electromagnéticos



INTERACCIÓN DE NEUTRONES

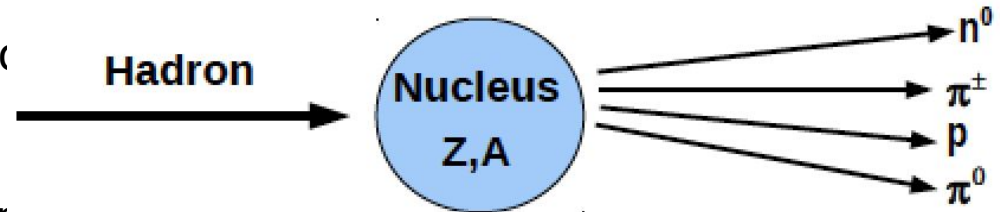
- Los neutrones son partículas neutras
- Sólo se pueden detectar a través de partículas cargadas producidas en interacciones fuertes (o débiles) → Interacción de corto alcance → gran λ_T → partículas muy penetrantes
- Las principales interacciones de neutrones para $E < \sim 100$ MeV son conversiones y dispersión elástica. Algunos ejemplos

- $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + {}^3\text{H}$
- $n + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^3\text{H}$
- $n + p \rightarrow n + p$



Detección mediante la producción de partículas secundarias: $p + \alpha$


- En el caso de $E > \sim 100$ MeV se producen cascadas hadrónicas:

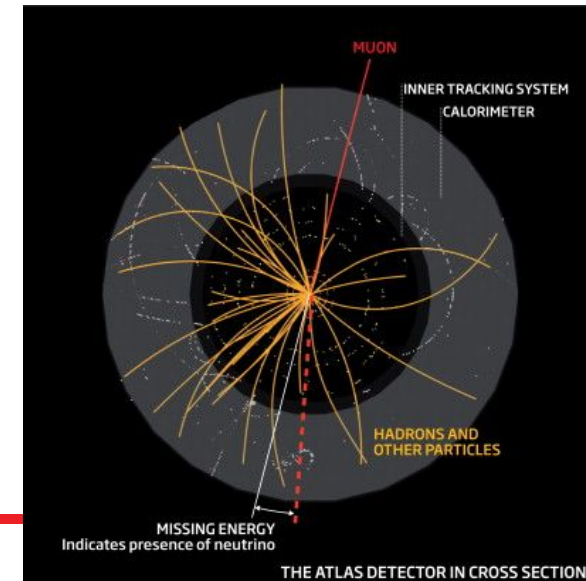


- Los neutrones pueden viajar a veces r electrónica
- Muchos neutrones producidos en experimentos de colisión (por ejemplo, el LHC). Interactúan con todo el detector -> fuerte restricción en la tecnología y la electrónica
 - Envejecimiento en los detectores gaseosos
 - Pérdida de luz (transparencia) en los centelleadores/Cherenkov
 - Desplazamiento de átomos en detectores semiconductores



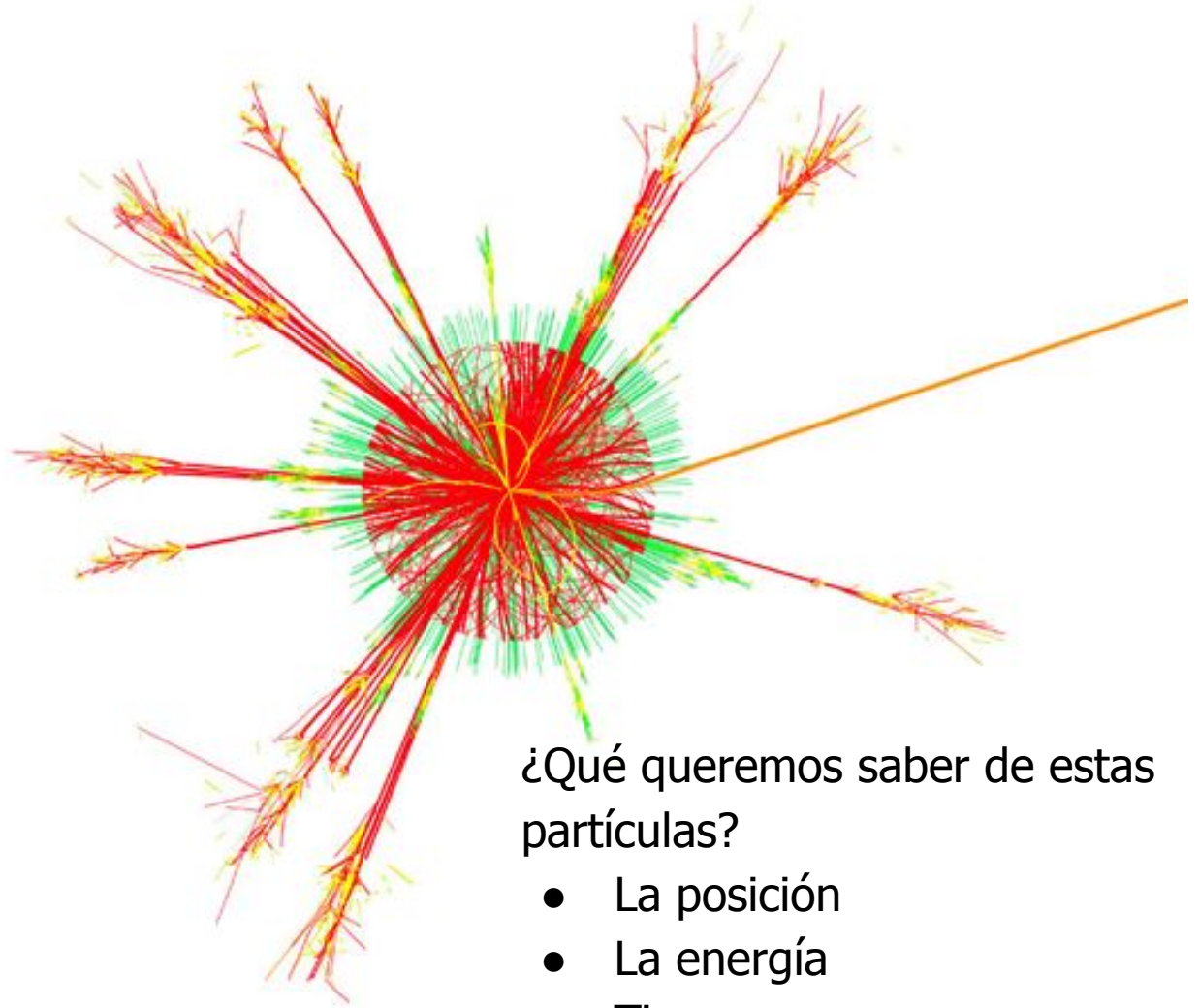
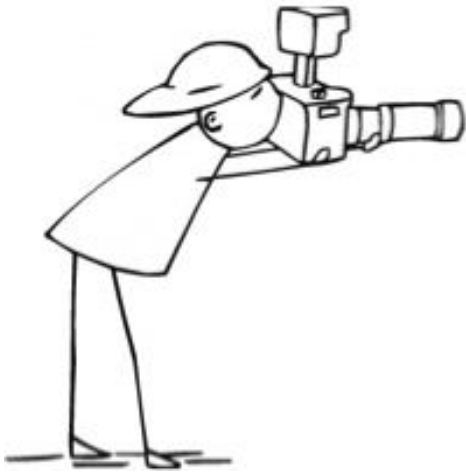
INTERACCIÓN DE NEUTRINOS

- Los neutrinos son partículas neutras
 - Los neutrinos sólo interactúan mediante la interacción débil
 - Sólo se detectan a través la producción de partículas secundarias cargadas. Algunos ejemplos:
 - $\nu + n \rightarrow e^-/\mu^- + p$
 - $\nu + p \rightarrow e^-/\mu^- + n$
-  **Detección del leptón cargado y el p/n**
- Sección eficaz de interacción muy débil → longitud de trayectoria muy larga
 - Por ejemplo, la probabilidad de interacción de neutrinos en $\sim 1\text{m}$ de hierro es de aproximadamente 6×10^{-17}
 - Los detectores de neutrinos serían realmente enormes
 - En el experimento de los colisionadores los neutrinos pueden ser detectados indirectamente
 - Detector casi totalmente hermético
 - Sumar toda la energía/momento visible
 - Utilizar el conocimiento de la energía del haz
 - Los neutrinos se detectan como un desequilibrio energético en el detector





¿POR QUÉ NECESITAMOS DETECTORES DE PARTÍCULAS?

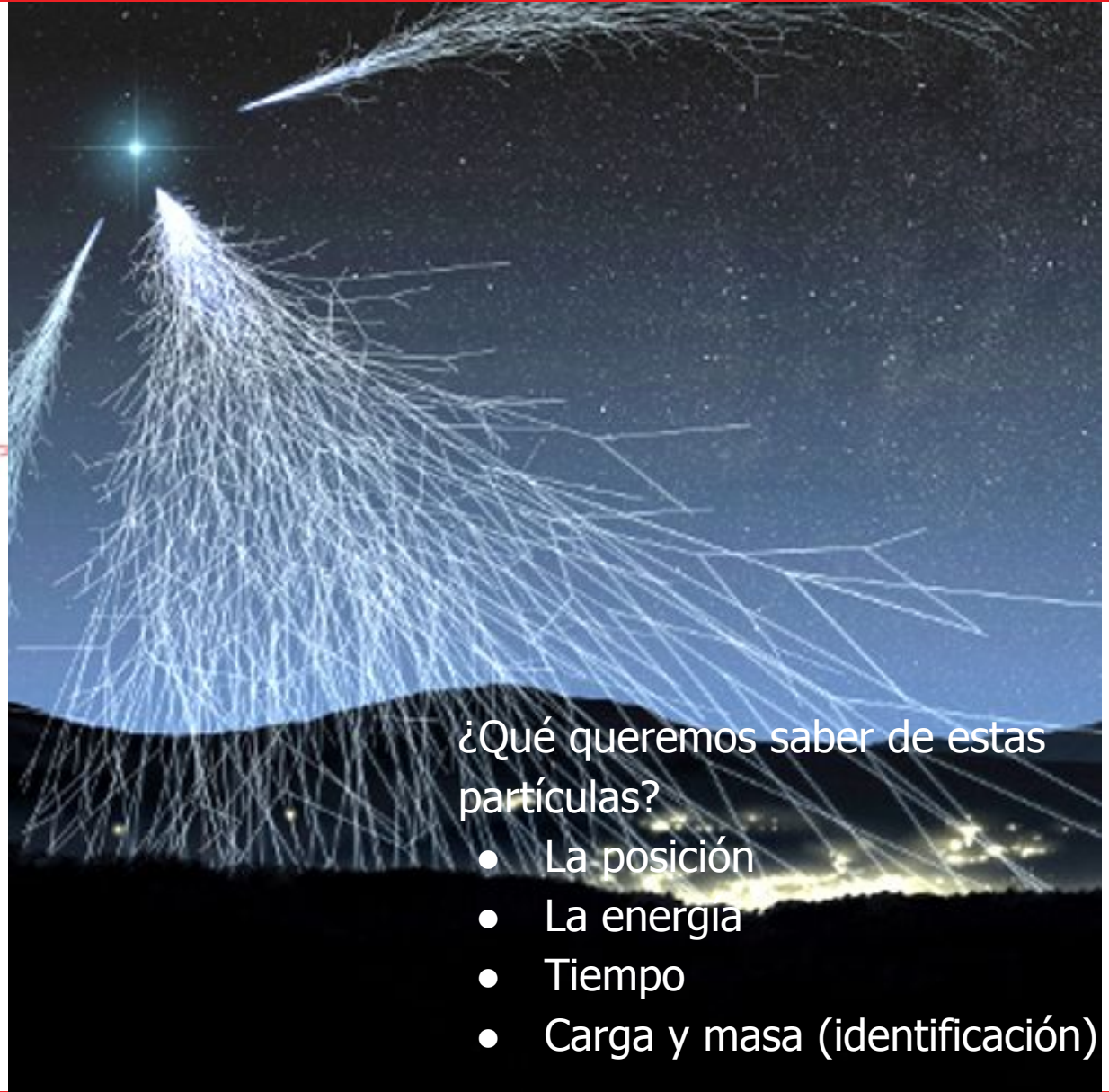
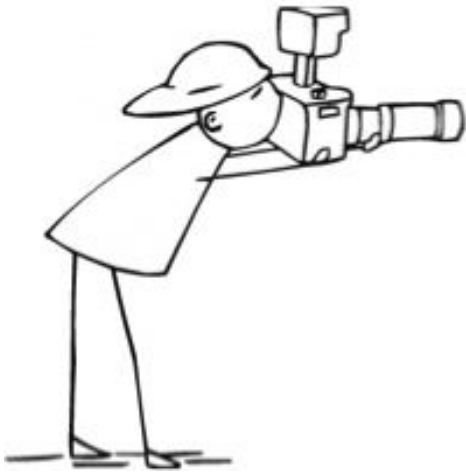


¿Qué queremos saber de estas partículas?

- La posición
- La energía
- Tiempo
- Carga y masa (identificación)



¿POR QUÉ NECESITAMOS DETECTORES DE PARTÍCULAS?



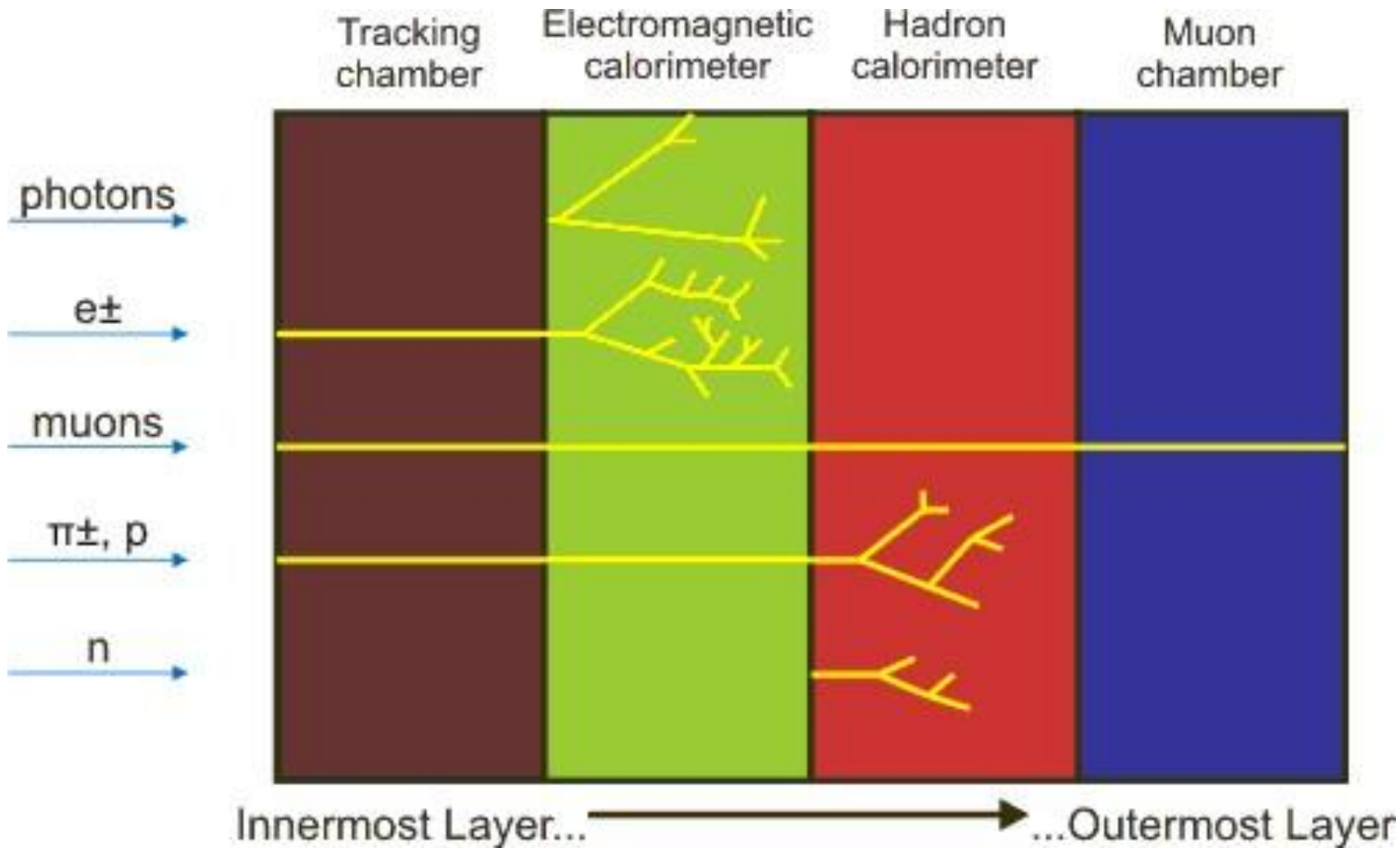
¿Qué queremos saber de estas partículas?

- La posición
- La energía
- Tiempo
- Carga y masa (identificación)



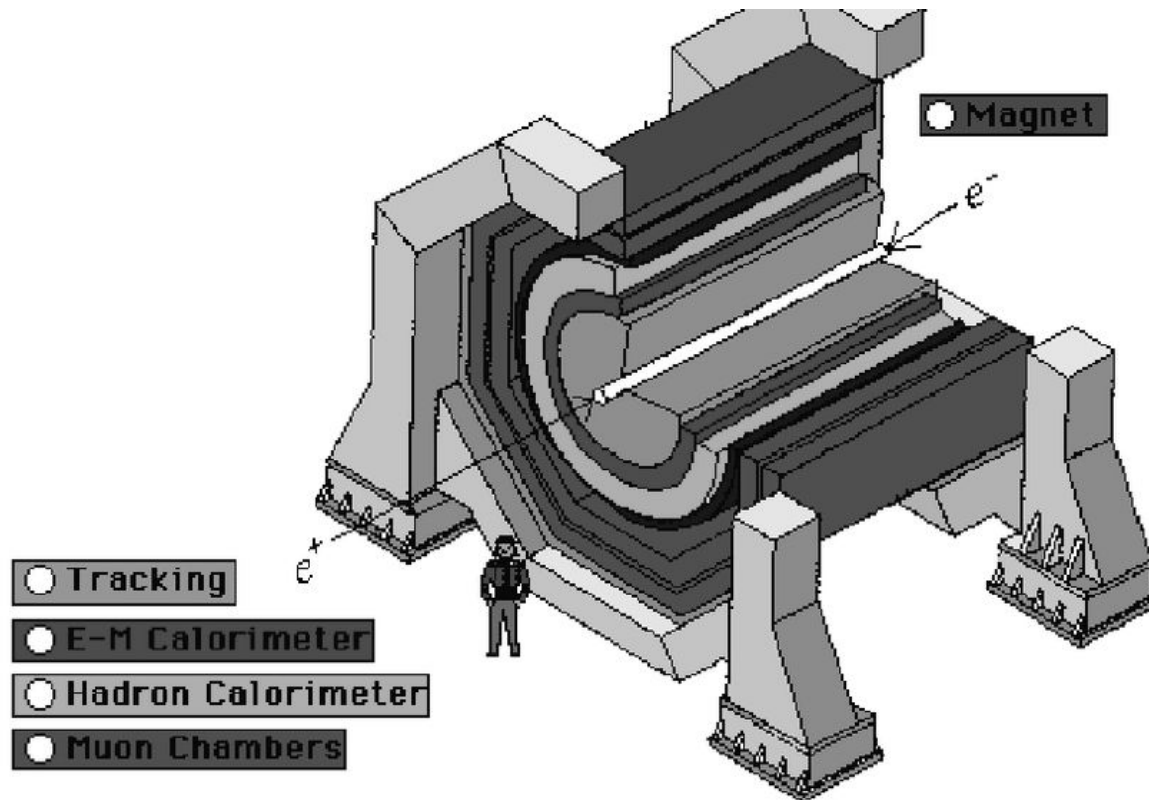
DETECTORES DE PARTÍCULAS

- Capas diseñadas para detectar cada tipo de partícula



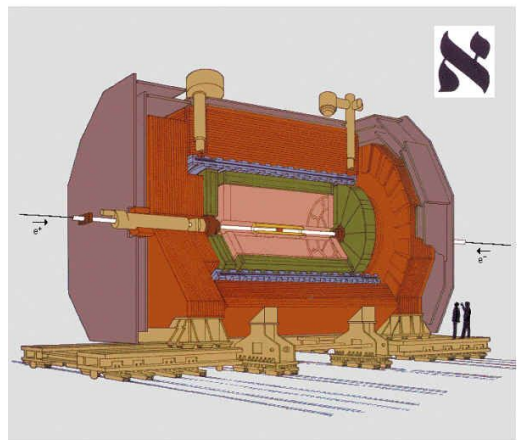
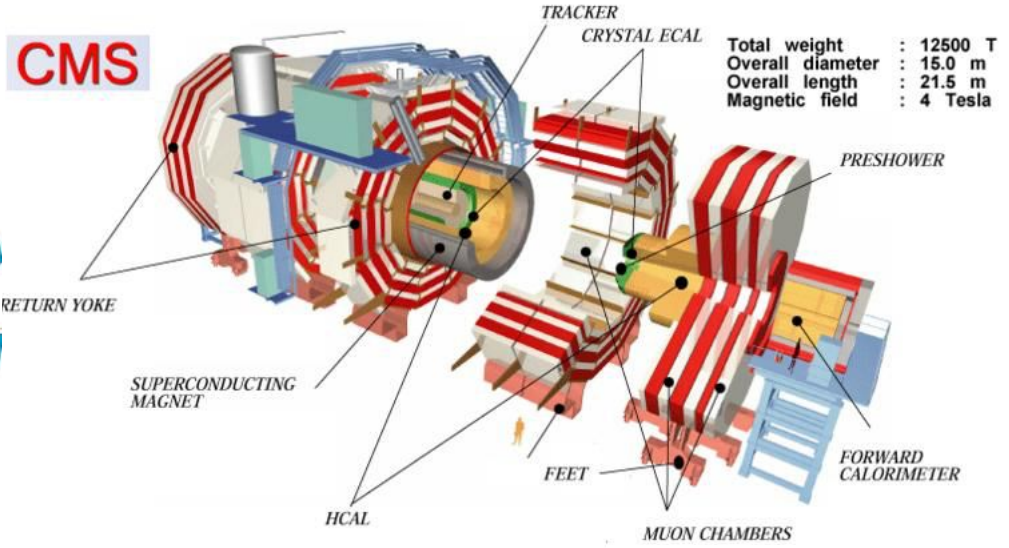
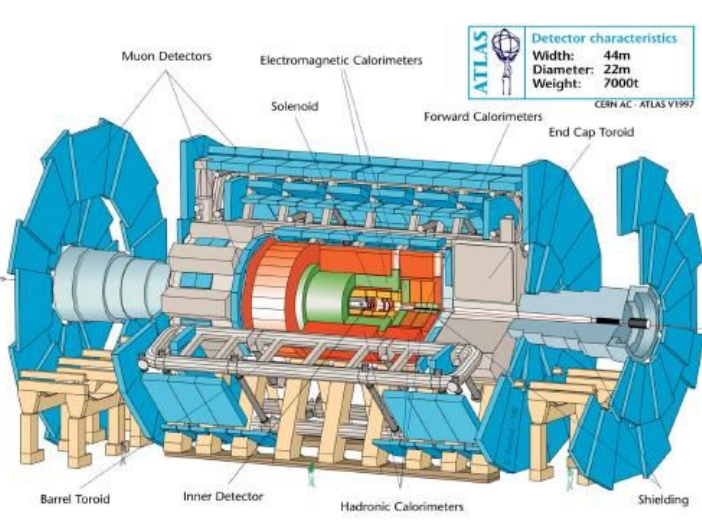


DETECTORES DE PARTÍCULAS



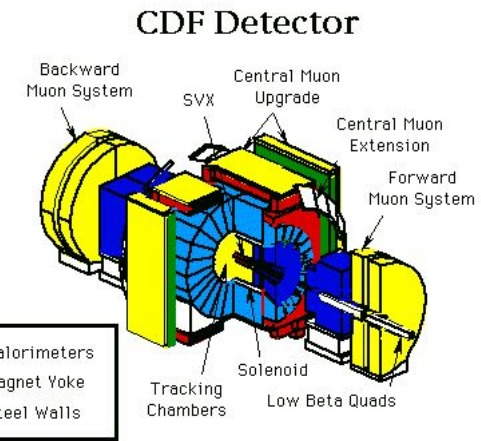
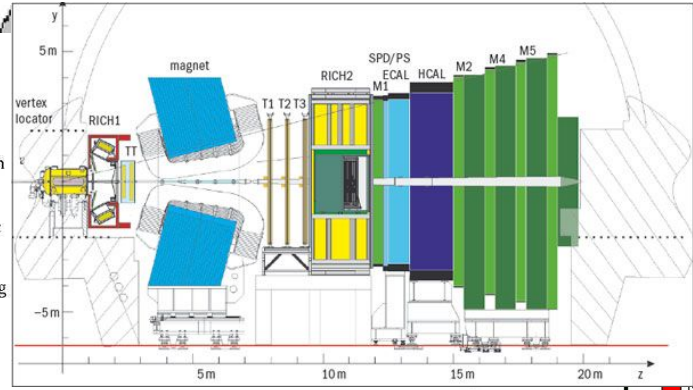


DETECTORES DE PARTÍCULAS



The ALEPH Detector

- Vertex Detector
- Inner Tracking Chamber
- Time Projection Chamber
- Electromagnetic Calorimeter
- Superconducting Magnet Coil
- Hadron Calorimeter
- Muon Chambers
- Luminosity Monitors



- Magnet Yoke
- Steel Walls



EJERCICIO

Determinen ¿qué proceso domina en la interacción fotón-materia para las siguientes reacciones?:

1. Fotones de 1 MeV sobre Al;
2. Fotones de 100 keV sobre H₂;
3. Fotones de 100 keV sobre el Fe;
4. Fotones de 10 MeV sobre el C;
5. Fotones de 10 MeV sobre el Pb;



Determinen ¿qué proceso domina en la interacción fotón-materia para las siguientes reacciones?:

1. Fotones de 1 MeV sobre Al;

Un fotón de 1MeV está justo por debajo del umbral de producción de pares. El aluminio tiene $Z = 13$ entre el carbono y el plomo, por lo que la dispersión Compton tiene que ser, con mucho, dominante a esa energía. De hecho, $\sigma_{\text{Comp}} \approx 3 \text{ barn}$ y $\sigma_{\text{p.e.}} \approx 10^{-3} \text{ barn}$.

2. Fotones de 100 keV sobre H_2 ;

Un fotón de 100 keV en hidrógeno no va en producción de pares. Dado que la dispersión Compton domina la interacción fotón-materia a esta energía para el carbono, será a fortiori dominante en el hidrógeno, ya que la sección transversal fotoeléctrica disminuye en función de Z mucho más rápido en comparación con la sección transversal Compton. De hecho, $\sigma_{\text{Comp}} \approx 0,5 \text{ barn}$ y $\sigma_{\text{p.e.}} \approx 10^{-6} \text{ barn}$.



3. Fotones de 100 keV sobre el Fe;

Un fotón de 100 keV en el hierro no puede sufrir la producción de pares. La sección transversal fotoeléctrica (Compton) en el plomo a esa energía es de alrededor de 103 barn (10 barn), por lo que, asumiendo un escalado $\sim Z^5$ ($\sim Z$), deberíamos esperar aproximadamente las mismas secciones transversales. En efecto, tenemos $\sigma_{\text{Comp}} \approx 12$ barn y $\sigma_{\text{p.e.}} \approx 20$ barn.

4. Fotones de 10 MeV sobre el C;

Un fotón de 10 MeV puede sufrir producción de pares, pero la dispersión Compton es considerable a esa energía. encontramos $\sigma_{\text{Comp}} \approx 0,3$ barn y $\sigma_{\text{pair}} \approx 0,8 \times 10^{-1}$ barn.

5. Fotones de 10 MeV sobre el Pb;

Como antes, cabe esperar que las secciones transversales de producción de pares y de Compton sean del mismo orden. Esta vez, es la primera la que es mayor debido a la escala $\sim Z^2$ en comparación con sólo una escala $\sim Z$ de la dispersión Compton. En efecto, tenemos $\sigma_{\text{Comp}} \approx 4$ barn y $\sigma_{\text{pair}} \approx 12$ barn.



REFERENCIAS

- Particle detectors, 2nd Edition, Claus Grupen and Boris Shwartz
- Dan Green, The physics of particle detectors. Cambridge University Press
- William R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. Springer
- Particle Data Group (PDG): <http://pdg.lbl.gov/>, Reviews, Tables, Plots. Experimental Methods and Colliders
- Luis Alejandro Perez, "Lecture 1: Physics Foundations for Particle and Radiation Detection", Oct 2014, CEVALE2VE: <http://www.cevale2ve.org>
- Programa para estudiantes de verano CERN 2013: Sesión sobre detectores (Bortoletto, Daniela) Link: <https://indico.cern.ch/event/243645/>
- European School in Instrumentation for Particle and Astroparticle Physics 2018: Interactions of Particles/Radiation with Matter (Lucia Di Ciaccio): <https://indico.cern.ch/event/686191/>
- CERN Fermilab Hadron Collider Physics Summer School 2019: Advances Detector Technologies (Werner Riegler): <https://indico.cern.ch/event/795313/>



BACKUP



LONGITUD DE ABSORCIÓN

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

$$I(x) = I_0 e^{-\mu' x'}$$

$$x' \equiv x \rho$$

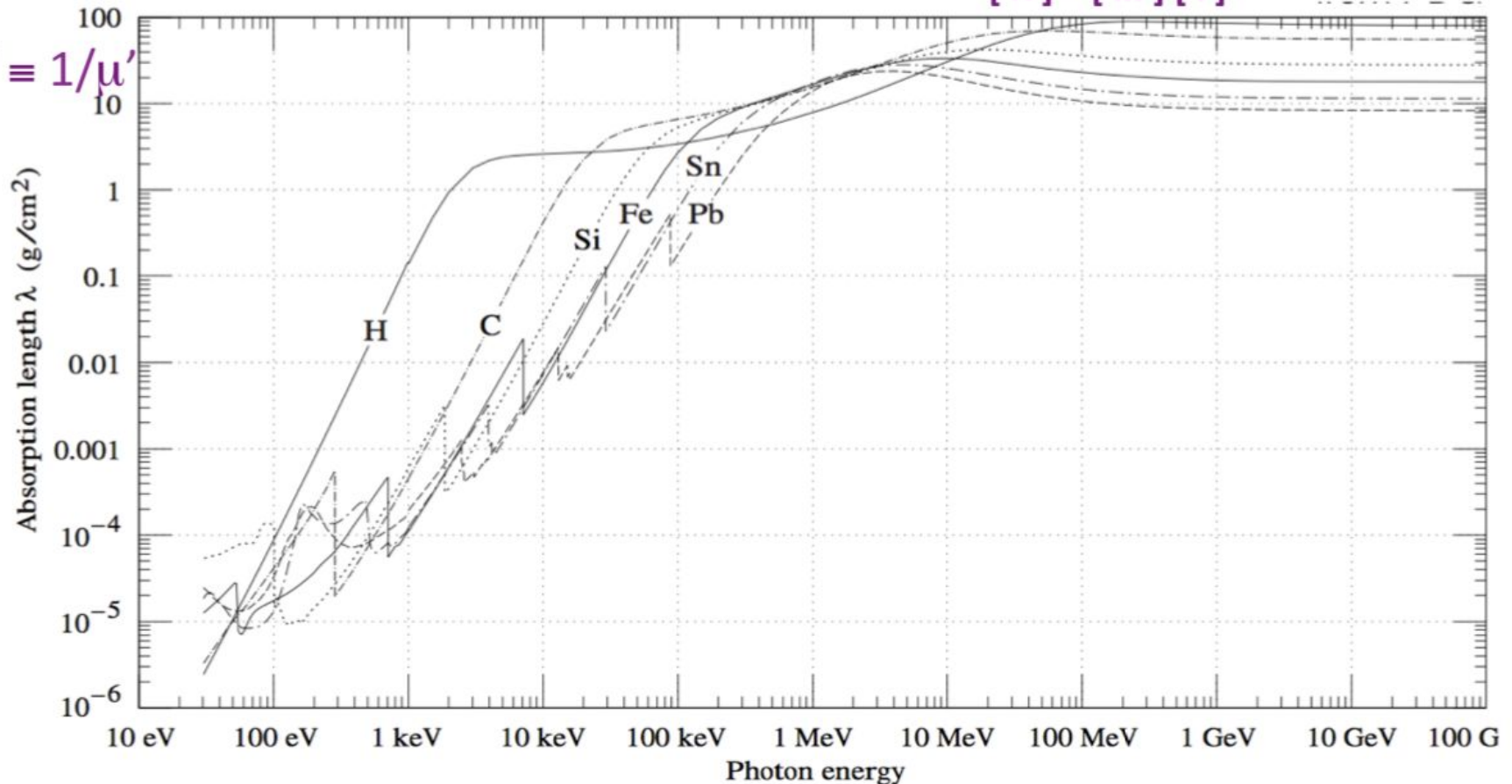
$$\mu' \equiv \mu/\rho$$

$$[x'] = [m] [l]^{-2}$$

$$[\mu'] = [m]^{-1} [l]^2$$

$$[\lambda] = [m] [l]^{-2}$$

$$\lambda' \equiv 1/\mu'$$





PROPIEDADES ATÓMICAS Y NUCLEARES DE LOS MATERIALES

6. ATOMIC AND NUCLEAR PROPERTIES OF MATERIALS

Table 6.1. Abridged from pdg.lbl.gov/AtomicNuclearProperties by D. E. Groom (2007). Quantities in parentheses are for NTP (20° C and 1 atm), and square brackets indicate quantities evaluated at STP. Boiling points are at 1 atm. Refractive indices n are evaluated at the sodium D line blend (589.2 nm); values $\gg 1$ in brackets are for $(n - 1) \times 10^6$ (gases).

Material	Z	A	$\langle Z/A \rangle$	Nucl.coll. length λ_T {g cm ⁻² }	Nucl.inter. length λ_I {g cm ⁻² }	Rad.len. X_0 g cm ⁻² }	$dE/dx _{\min}$ { MeV g ⁻¹ cm ² }	Density {g cm ⁻³ {(gℓ ⁻¹)}	Melting point (K)	Boiling point (K)	Refract. index (@ Na D)
H ₂	1	1.00794(7)	0.99212	42.8	52.0	63.04	(4.103)	0.071(0.084)	13.81	20.28	1.11[132.]
D ₂	1	2.01410177803(8)	0.49650	51.3	71.8	125.97	(2.053)	0.169(0.168)	18.7	23.65	1.11[138.]
He	2	4.002602(2)	0.49967	51.8	71.0	94.32	(1.937)	0.125(0.166)		4.220	1.02[35.0]
Li	3	6.941(2)	0.43221	52.2	71.3	82.78	1.639	0.534	453.6	1615.	
Be	4	9.012182(3)	0.44384	55.3	77.8	65.19	1.595	1.848	1560.	2744.	
C diamond	6	12.0107(8)	0.49955	59.2	85.8	42.70	1.725	3.520			2.42
C graphite	6	12.0107(8)	0.49955	59.2	85.8	42.70	1.742	2.210			
N ₂	7	14.0067(2)	0.49976	61.1	89.7	37.99	(1.825)	0.807(1.165)	63.15	77.29	1.20[298.]
O ₂	8	15.9994(3)	0.50002	61.3	90.2	34.24	(1.801)	1.141(1.332)	54.36	90.20	1.22[271.]
F ₂	9	18.9984032(5)	0.47372	65.0	97.4	32.93	(1.676)	1.507(1.580)	53.53	85.03	[195.]
Ne	10	20.1797(6)	0.49555	65.7	99.0	28.93	(1.724)	1.204(0.839)	24.56	27.07	1.09[67.1]
Al	13	26.9815386(8)	0.48181	69.7	107.2	24.01	1.615	2.699	933.5	2792.	
Si	14	28.0855(3)	0.49848	70.2	108.4	21.82	1.664	2.329	1687.	3538.	3.95
Cl ₂	17	35.453(2)	0.47951	73.8	115.7	19.28	(1.630)	1.574(2.980)	171.6	239.1	[773.]
Ar	18	39.948(1)	0.45059	75.7	119.7	19.55	(1.519)	1.396(1.662)	83.81	87.26	1.23[281.]
Ti	22	47.867(1)	0.45961	78.8	126.2	16.16	1.477	4.540	1941.	3560.	
Fe	26	55.845(2)	0.46557	81.7	132.1	13.84	1.451	7.874	1811.	3134.	
Cu	29	63.546(3)	0.45636	84.2	137.3	12.86	1.403	8.960	1358.	2835.	
Ge	32	72.64(1)	0.44053	86.9	143.0	12.25	1.370	5.323	1211.	3106.	
Sn	50	118.710(7)	0.42119	98.2	166.7	8.82	1.263	7.310	505.1	2875.	
Xe	54	131.293(6)	0.41129	100.8	172.1	8.48	(1.255)	2.953(5.483)	161.4	165.1	1.39[701.]
W	74	183.84(1)	0.40252	110.4	191.9	6.76	1.145	19.300	3695.	5828.	
Pt	78	195.084(9)	0.39983	112.2	195.7	6.54	1.128	21.450	2042.	4098.	
Au	79	196.966569(4)	0.40108	112.5	196.3	6.46	1.134	19.320	1337.	3129.	
Pb	82	207.2(1)	0.39575	114.1	199.6	6.37	1.122	11.350	600.6	2022.	
U	92	[238.02891(3)]	0.38651	118.6	209.0	6.00	1.081	18.950	1408.	4404.	



PROPIEDADES ATÓMICAS Y NUCLEARES DE LOS MATERIALES

Material	Z	A	$\langle Z/A \rangle$	Nucl.coll. length λ_T {g cm ⁻² }	Nucl.inter. length λ_I {g cm ⁻² }	Rad.len. X_0 {g cm ⁻² }	$dE/dx _{\min}$ { MeV g ⁻¹ cm ² }	Density {g cm ⁻³ } ({gℓ ⁻¹ })	Melting point (K)	Boiling point (K)	Refract. index (@ Na D)
Air (dry, 1 atm)			0.49919	61.3	90.1	36.62	(1.815)	(1.205)		78.80	
Shielding concrete			0.50274	65.1	97.5	26.57	1.711	2.300			
Borosilicate glass (Pyrex)			0.49707	64.6	96.5	28.17	1.696	2.230			
Lead glass			0.42101	95.9	158.0	7.87	1.255	6.220			
Standard rock			0.50000	66.8	101.3	26.54	1.688	2.650			
Methane (CH ₄)			0.62334	54.0	73.8	46.47	(2.417)	(0.667)	90.68	111.7	[444.]
Ethane (C ₂ H ₆)			0.59861	55.0	75.9	45.66	(2.304)	(1.263)	90.36	184.5	
Butane (C ₄ H ₁₀)			0.59497	55.5	77.1	45.23	(2.278)	(2.489)	134.9	272.6	
Octane (C ₈ H ₁₈)			0.57778	55.8	77.8	45.00	2.123	0.703	214.4	398.8	
Paraffin (CH ₃ (CH ₂) _n ≈23CH ₃)			0.57275	56.0	78.3	44.85	2.088	0.930			
Nylon (type 6, 6/6)			0.54790	57.5	81.6	41.92	1.973	1.18			
Polycarbonate (Lexan)			0.52697	58.3	83.6	41.50	1.886	1.20			
Polyethylene ([CH ₂ CH ₂] _n)			0.57034	56.1	78.5	44.77	2.079	0.89			
Polyethylene terephthalate (Mylar)			0.52037	58.9	84.9	39.95	1.848	1.40			
Polymethylmethacrylate (acrylic)			0.53937	58.1	82.8	40.55	1.929	1.19			1.49
Polypropylene			0.55998	56.1	78.5	44.77	2.041	0.90			
Polystyrene ([C ₆ H ₅ CHCH ₂] _n)			0.53768	57.5	81.7	43.79	1.936	1.06			1.59
Polytetrafluoroethylene (Teflon)			0.47992	63.5	94.4	34.84	1.671	2.20			
Polyvinyltoluene			0.54141	57.3	81.3	43.90	1.956	1.03			1.58
Aluminum oxide (sapphire)			0.49038	65.5	98.4	27.94	1.647	3.970	2327.	3273.	1.77
Barium fluoride (BaF ₂)			0.42207	90.8	149.0	9.91	1.303	4.893	1641.	2533.	1.47
Carbon dioxide gas (CO ₂)			0.49989	60.7	88.9	36.20	1.819	(1.842)			[449.]
Solid carbon dioxide (dry ice)			0.49989	60.7	88.9	36.20	1.787	1.563	Sublimes at 194.7 K		
Cesium iodide (CsI)			0.41569	100.6	171.5	8.39	1.243	4.510	894.2	1553.	1.79
Lithium fluoride (LiF)			0.46262	61.0	88.7	39.26	1.614	2.635	1121.	1946.	1.39
Lithium hydride (LiH)			0.50321	50.8	68.1	79.62	1.897	0.820	965.		
Lead tungstate (PbWO ₄)			0.41315	100.6	168.3	7.39	1.229	8.300	1403.		2.20
Silicon dioxide (SiO ₂ , fused quartz)			0.49930	65.2	97.8	27.05	1.699	2.200	1986.	3223.	1.46
Sodium chloride (NaCl)			0.55509	71.2	110.1	21.91	1.847	2.170	1075.	1738.	1.54
Sodium iodide (NaI)			0.42697	93.1	154.6	9.49	1.305	3.667	933.2	1577.	1.77
Water (H ₂ O)			0.55509	58.5	83.3	36.08	1.992	1.000(0.756)	273.1	373.1	1.33
Silica aerogel			0.50093	65.0	97.3	27.25	1.740	0.200	(0.03 H ₂ O, 0.97 SiO ₂)		



<http://laconga.redclara.net>



contacto@laconga.redclara.net



lacongaphysics



Latin American alliance for
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido, el cual refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.