

DETECCIÓN DE RADIACIONES NUCLEARES

1. Interacción de la radiación con la materia

2. Detectores gaseosos

3. Detectores de centelleo

4. Detectores semiconductores

INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA

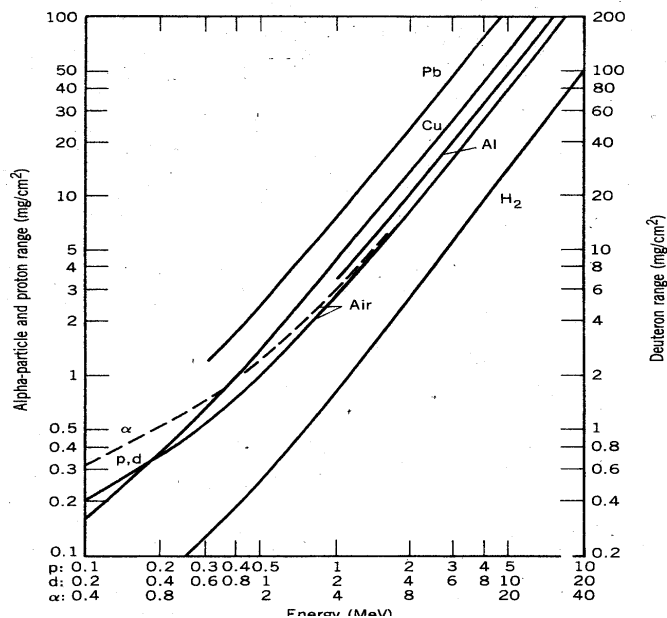
(PARTICULAS PESADAS)

- Efectos principales que sufre una partícula cuando atraviesa un medio material:
 - a) pérdida de energía
 - b) desviación respecto de la trayectoria inicial
- Los procesos responsables son:
 - a) colisiones inelásticas con los electrones atómicos del medio
 - b) colisiones elásticas con los núcleos
- Otros procesos: radiación Cherenkov, reacciones nucleares y bremsstrahlung.
- La contribución de estos procesos es diferente según se trate de
 - a) electrones y positrones
 - b) partículas pesadas: partículas α , núcleos ligeros, muones, piones, protones, etc.
- Para partículas pesadas el proceso principal, con diferencia, es el de colisiones inelásticas con electrones ($\sigma \approx 10^7 - 10^8 b$)
- Cuando una partícula pesada de masa M y energía cinética T choca frontalmente con un electrón de masa m en reposo pierde una energía

$$\Delta T = \left(\frac{4m}{M} \right) T$$
- Por ejemplo, una partícula α de 5 MeV pierde, como máximo, $2,7 \text{ KeV}$ cuando interacciona con un electrón

INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA (PARTICULAS PESADAS)

- Antes de perder toda su energía se producen miles de colisiones
- La partícula masiva continúa su trayectoria sin ser apenas deflectada por los electrones
- La pérdida de energía es gradual, pero continua. Al cabo de una cierta distancia (**alcance**) $E=0$.
- El alcance depende de la partícula, de su energía y del medio.
- Las colisiones atómicas pueden provocar
 - ✓ excitación (*soft collisions*)
 - ✓ ionización (*hard collisions*): → ionización secundaria por rayos delta



Alcance versus Energía para varios materiales

INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA

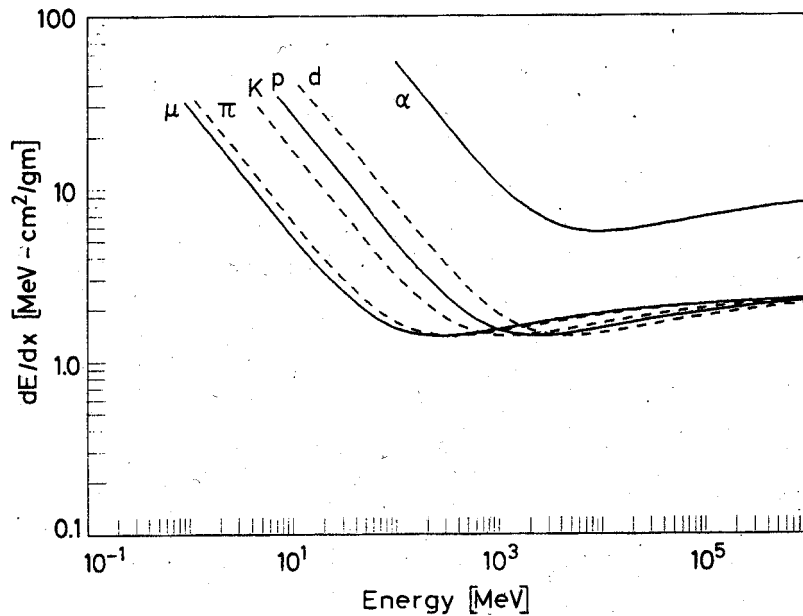
(PARTICULAS PESADAS)

- **Poder de frenado** (pérdida de energía por unidad de longitud recorrida) o *fórmula de Bethe-Bloch*

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{4\pi z^2 N_0}{mv^2} \frac{\rho Z}{A} \left[\ln \left(\frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

- E es la energía cinética de la partícula y x la distancia recorrida
- v es la velocidad de la partícula de carga ze
- Z , A y ρ son el número atómico, peso atómico y densidad del material atravesado.
- N_0 es el número de Avogadro
- m es la masa del electrón
- I representa la energía de excitación media de los electrones atómicos (en la práctica una constante empírica $I \approx 10Z(eV)$)
- La pérdida de energía es independiente de la masa M de la partícula y proporcional al cuadrado de la carga
- Varía con v^{-2} a velocidades no relativistas
- Después de pasar un mínimo ($E \approx 3M$) la pérdida de energía aumenta logaritmicamente con $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$
- La dependencia con el medio es muy débil ($\frac{Z}{A} \approx 0,5$) si expresamos el recorrido en unidades de densidad superficial: $t = \rho x$ (gcm^{-2}) (*espesor másico*)
- $\left(\frac{dE}{dt} \right)_{\min} \approx 1-1,5 \text{ MeV} \frac{cm^2}{g}$

INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA (PARTICULAS PESADAS)



Poder de frenado en función de la energía para diferentes partículas

- El alcance puede calcularse como

$$R = \int_T^0 \left(-\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE = Mz^{-2} \int f(v) dv$$

- Para el mismo material, diferentes partículas con igual velocidad

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{M_1 z_2^2}{M_2 z_1^2}$$

INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA (ELECTRONES Y POSITRONES)

- Electrones (y positrones) sufren **colisiones inelásticas** con los electrones del medio, pero
 - ✓ Son relativistas (en particular los electrones de procesos β)
 - ✓ Se desvían mucho de su trayectoria inicial
 - ✓ Pueden perder una buena parte de su energía en una única colisión
 - ✓ En consecuencia, pueden perder energía en forma de **radiación de frenado** (*bremsstrahlung*).

- Pérdida de energía por unidad de longitud recorrida en **colisiones**

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_c = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{2\pi N_0}{mc^2 \beta^2} \frac{\rho Z}{A} \times$$

$$\times \left[\ln\left(\frac{T(T+mc^2)^2 \beta^2}{2I^2 mc^2}\right) + (1-\beta^2) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right]$$

- ✓ Aumenta logarítmicamente con la energía y linealmente con Z
- Pérdida de energía por unidad de longitud recorrida por **bremsstrahlung** (a energías relativistas):

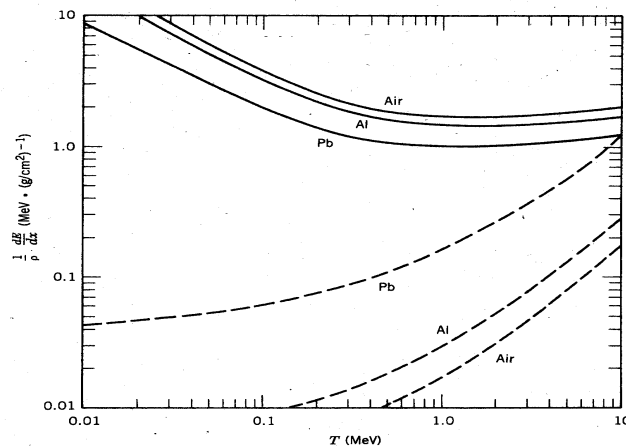
$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_r = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{N_0(T+mc^2)}{137m^2c^4} \frac{\rho Z^2}{A} \left[4 \ln \frac{2(T+mc^2)}{mc^2} - \frac{4}{3} \right]$$

- ✓ Aumenta linealmente con T y cuadráticamente con Z

INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA (ELECTRONES Y POSITRONES)

- Contribución relativa:

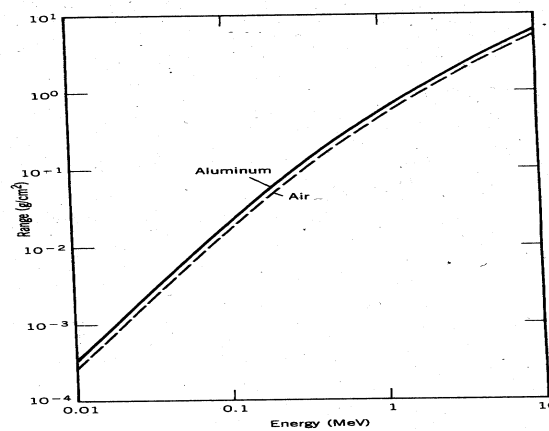
$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_r}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_c} \approx \frac{T + mc^2}{mc^2} \frac{Z}{1600}$$



Pérdida de energía para electrones: por colisiones (continuo) y radiación (discontinuo)

- El **alcance de electrones** se obtiene de datos empíricos de absorción de electrones monoenergéticos (las enormes fluctuaciones en la transferencia de energía no permiten obtener

el alcance como $R = \int_T^0 \left(-\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dx$



Alcance vs. Energía para electrones en aire y en aluminio

INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA (FOTONES)

1. EFECTO FOTOELÉCTRICO

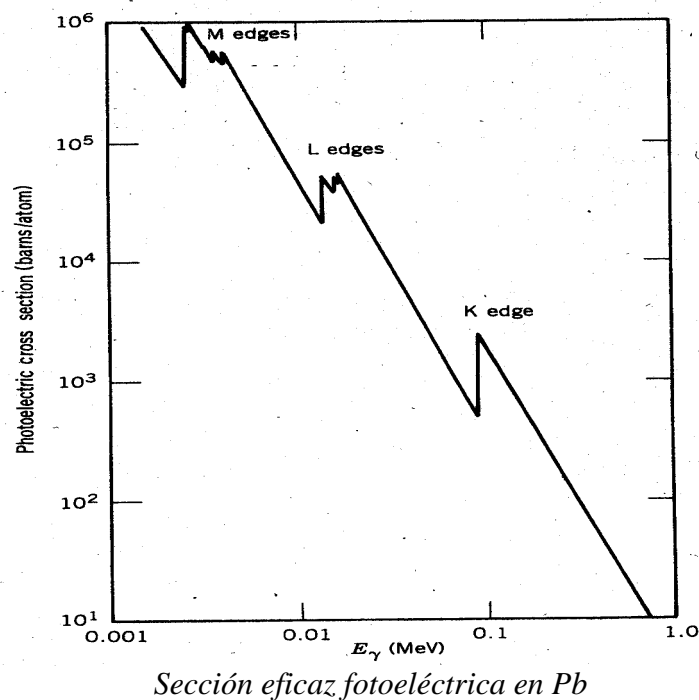
- El fotón incidente es absorbido por el átomo y libera un electrón (*fotoelectrón*) de energía

$$T_e = E_\gamma - B_e$$

energía del fotón incidente ↙

energía de enlace del electrón ←

- La probabilidad de absorción fotoeléctrica:
 - ✓ Significativa a bajas energías ($\sim 100\text{KeV}$)
 - ✓ Aumenta con Z^4 del material
 - ✓ Disminuye rápidamente con E_γ^{-3}
 - ✓ Aumenta bruscamente a energías iguales a las de ligadura de las capas atómicas



INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA (FOTONES)

2. DISPERSIÓN COMPTON

- El fotón cambia de dirección y de energía al interactuar con un electrón libre, el cuál se lleva la energía perdida por el fotón

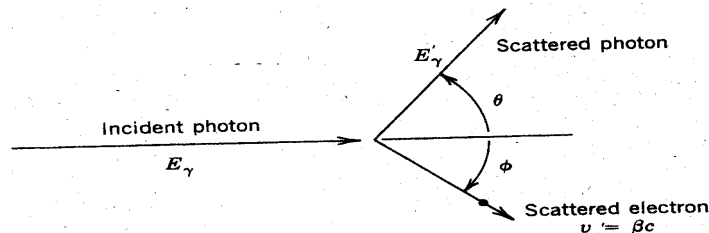


Figure 7.6 The geometry of Compton scattering.

- La energía del fotón dispersado a ángulo θ es:

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

✓ A $\theta \approx 0$, $E'_\gamma \approx E_\gamma$

✓ A $\theta \approx \pi$, $E'_\gamma \approx \frac{1}{2}mc^2 = 0,25MeV$

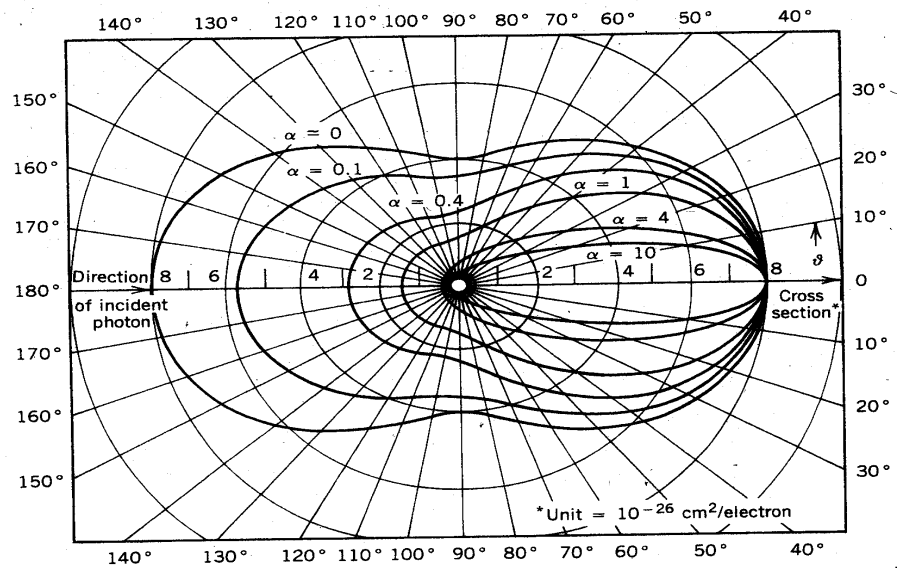
- La distribución angular viene dada por la *fórmula de Klein-Nishina* que da la sección eficaz diferencial por electrón:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right]^3 \left[\frac{1 + \cos\theta}{2} \right] \left[1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right]$$

$$\alpha \equiv \frac{E_\gamma}{mc^2}$$

$$r_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 mc^2} = 2,818 fm$$

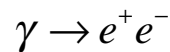
INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA (FOTONES)



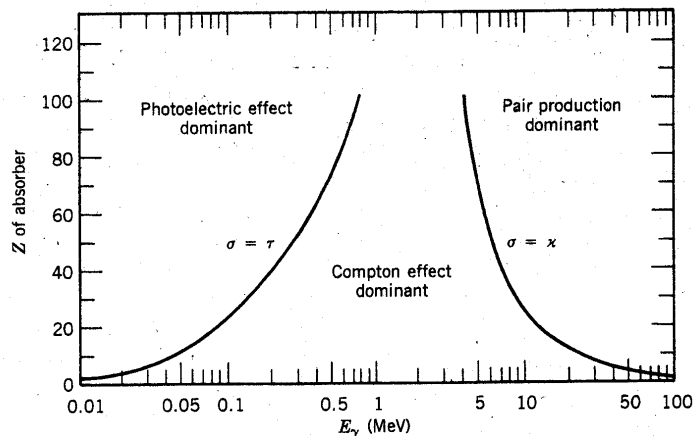
Sección eficaz Compton para distintas energías

3. PRODUCCIÓN DE PARES

- Un fotón, en presencia de un átomo, puede desaparecer creando un par electrón-positrón:



- Energía umbral: $E_{\min} = 2mc^2 = 1,022\text{MeV}$
- Proceso solo significativo a energías grandes ($> 5\text{MeV}$)



INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA (FOTONES)

- Coeficiente de atenuación lineal μ : da la probabilidad por unidad de longitud de que un fotón sea eliminado de un haz monoenergético atravesando un medio material:

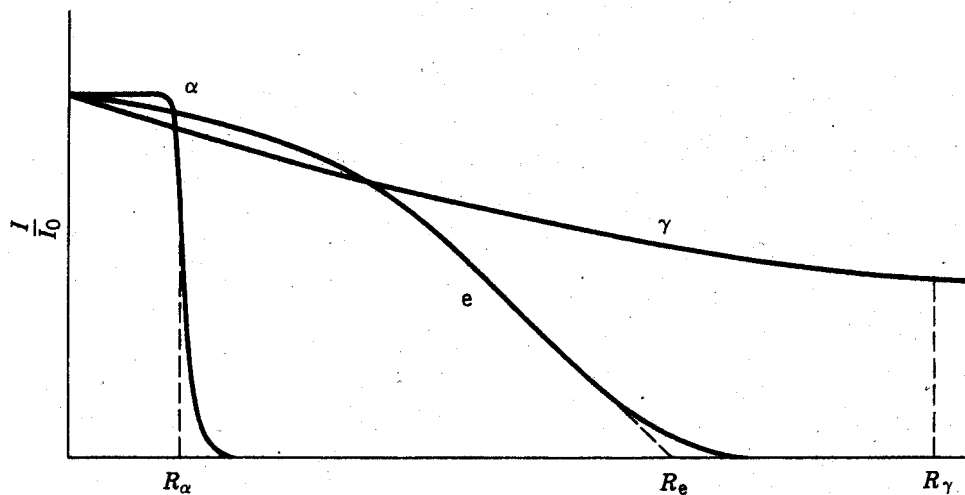
$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$

- ✓ τ es la probabilidad de absorción fotoeléctrica
- ✓ σ es la probabilidad de dispersión Compton
- ✓ κ es la probabilidad de producir pares e^+e^-

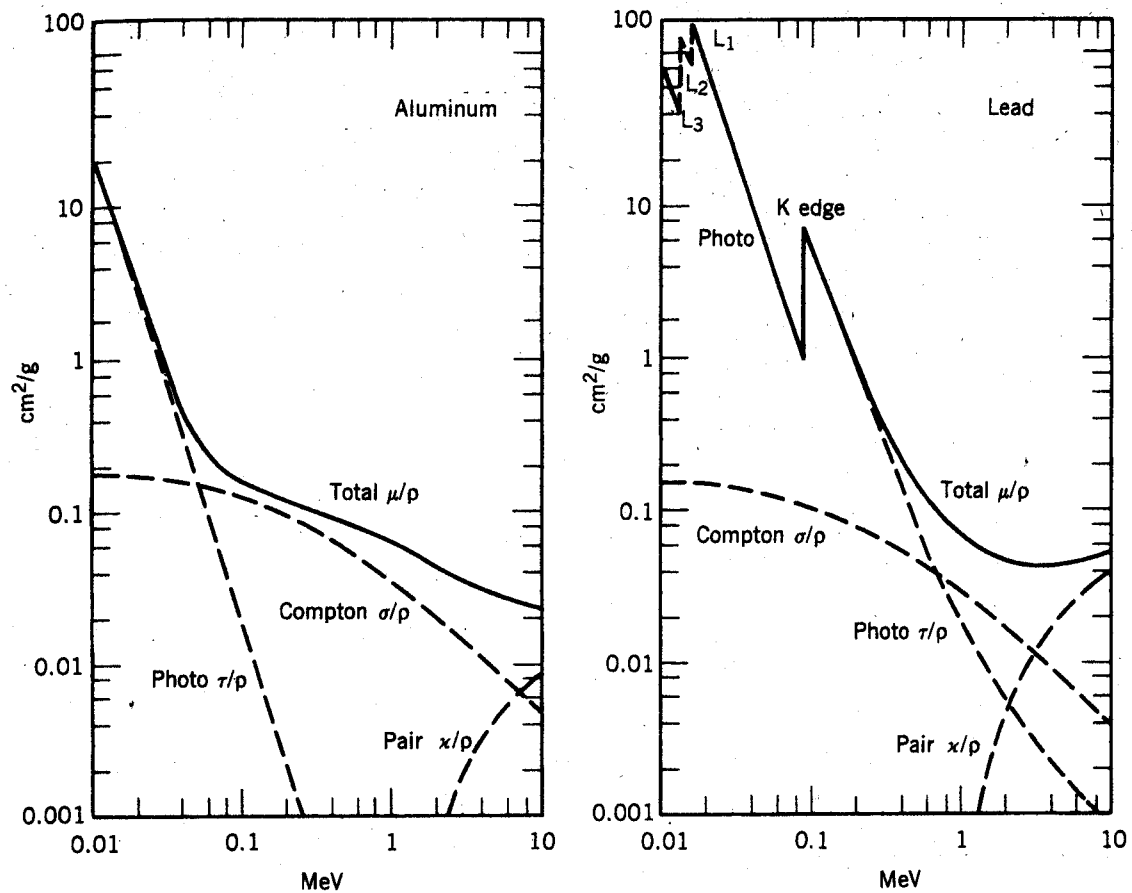
- La disminución relativa de intensidad del haz de fotones es:

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad \Rightarrow \quad I = I_0 e^{-\mu x}$$

- Comparativa de atenuaciones para α 's, e 's y γ 's



INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA (FOTONES)



Coeficientes de atenuación máscos para los tres procesos en Al y en Pb

- Probabilidad de que un fotón atraviese un espesor x sin interaccionar

$$\frac{I_0 e^{-\mu x}}{I_0} = e^{-\mu x}$$

- *Recorrido libre medio* (distancia media entre dos interacciones)

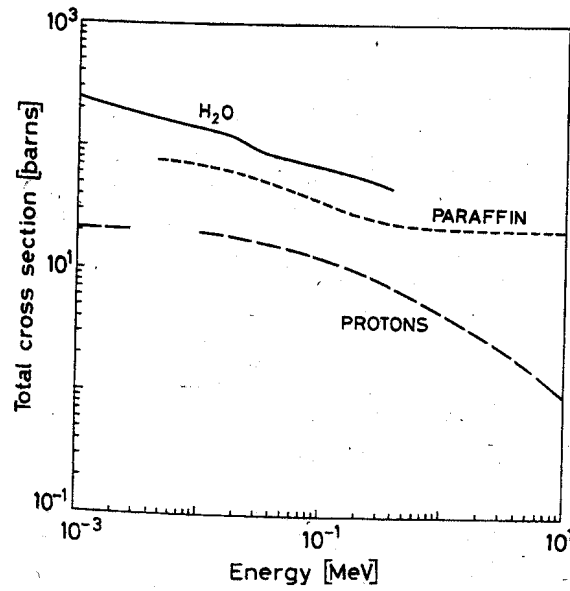
$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} x e^{-\mu x} dx}{\int_0^{\infty} e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu}$$

INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA

(NEUTRONES)

- No interaccionan eléctricamente con los átomos
- Interaccionan fuertemente con los núcleos a través de:
 1. Colisiones elásticas: $A(n,n)A$
 - ✓ Importante para energías de $\sim 1\text{MeV}$ (*neutrones rápidos*)
 2. Colisiones inelásticas: $A(n,n')A^*$, $A(n,2n')B$
 - ✓ Por encima de la energía umbral de excitación nuclear
 3. Captura de neutrones: $n + (Z, A) \rightarrow \gamma + (Z, A + 1)$
 - ✓ Decece con la velocidad del neutrón ($\sim 1/v$)
 4. Otras reacciones nucleares: (n,p) , (n,d) , (n,α) , (n,t) , $(n,\alpha p)$, etc. con captura de un neutrón y emisión de partículas cargadas
 - ✓ Región de $eV\text{-}KeV$
 5. Fisión:
 - ✓ A energías térmicas $\sim eV$ (*neutrones térmicos o lentos*)
 6. Producción de cascada hadrónica
 - ✓ $E > 100\text{MeV}$

INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA (NEUTRONES)



Secciones eficaces totales para neutrones en agua, parafina y protones

DETECTORES GASEOSOS (Cámara de ionización)

- **Cámara de Ionización, Contador Proporcional y Geiger-Müller** se basan en la recolección directa de la ionización producida por una partícula al atravesar un gas encerrado entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial.
- Energía media necesaria para formar un par electrón-ión w

Gas	w (eV/par)
H_2	37
He	41
N_2	35
O_2	31
Aire	35
Ne	36
Ar	26

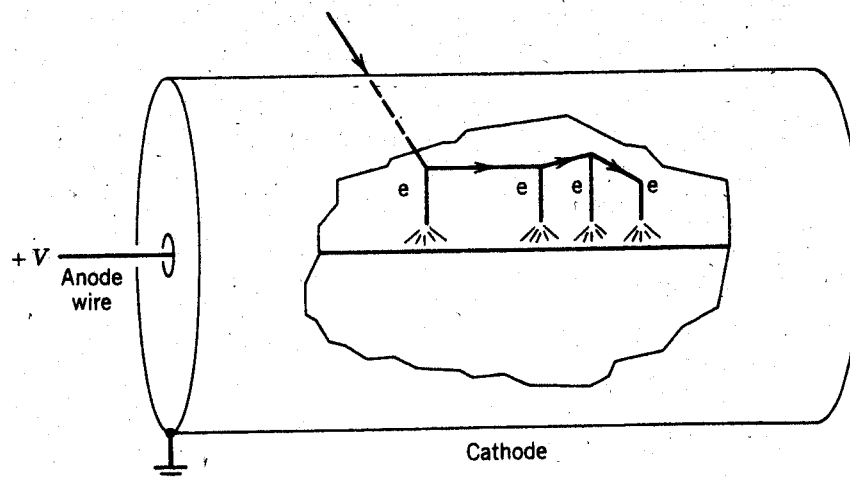
- La amplitud de la señal de la **cámara de ionización**
 - ✓ es proporcional al número de iones formados, i.e., a la energía depositada por la radiación (típicamente $0,5 \text{ mV/MeV}$ de energía depositada)
 - ✓ es independiente del voltaje entre electrodos ($V \sim 100-1000 \text{ V}$)
- el voltaje determina la velocidad de deriva de los iones hacia los electrodos (típicamente 1 m/s para tensiones de $100V/cm$)
 - \Rightarrow señales lentas (10 ms) \Rightarrow uso como *monitor de radiación* (no de recuento de señales individuales)
- La corriente eléctrica medida es proporcional tanto a la **actividad** de la fuente (o **intensidad** de rayos X o γ) como a la **energía** de la radiación .

DETECTORES GASEOSOS (Contador proporcional)

- Trabajan con tensiones más elevadas
 - ✓ Se produce ionización secundaria
 - ✓ Los electrones secundarios acelerados producen una avalancha o cascada de ionizaciones
 - ✓ El número de pares de la avalancha es proporcional a la ionización primaria (medida de energías y/o actividades)
 - ✓ amplificación de la señal (factor $10^3 - 10^6$)

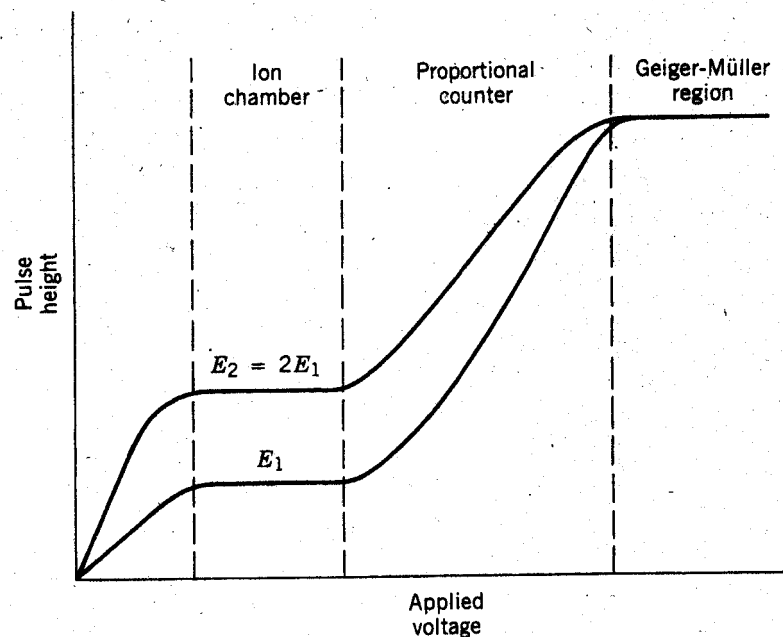
- Campo eléctrico en geometría cilíndrica :
$$E(r) = \frac{1}{r} \frac{V}{\ln(b/a)}$$

- Tiempo de formación de la avalancha $\sim 1\mu s \Rightarrow$ funcionamiento en modo *pulso* \Rightarrow recuentos de tasas de $10^6 s^{-1}$



- Usos: rayos X de baja energía, electrones de baja energía. Con gases BF_3 o 3He se detectan neutrones térmicos o epitérmicos ($0,1 eV-100 KeV$)

DETECTORES GASEOSOS (Contador Geiger)

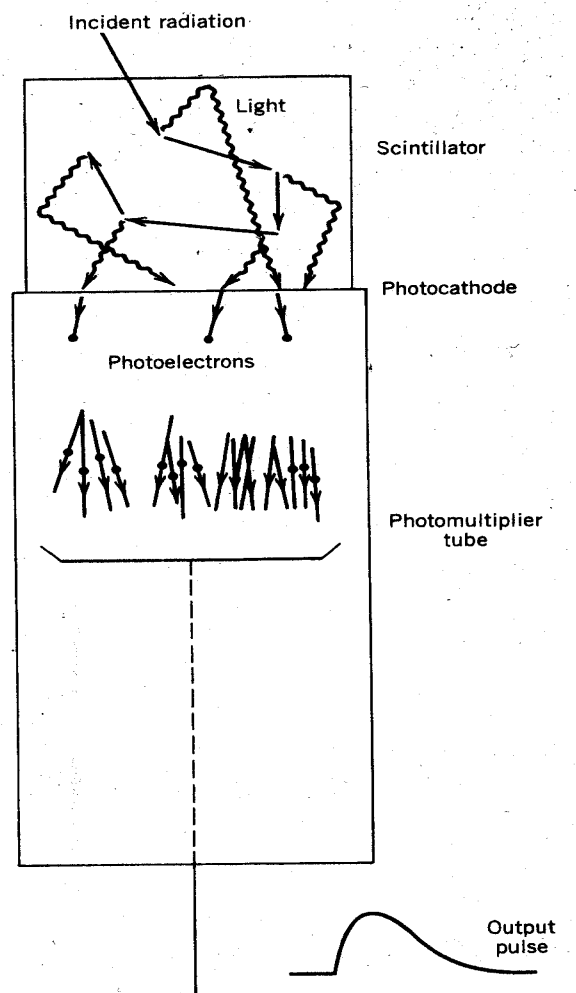


- Región de Geiger-Müller: *Avalanchas secundarias* en cualquier parte del tubo producidas por fotones emitidos por átomos excitados en la avalancha original.
- Se pierde información de la ionización primaria, i.e., de la energía de la partícula a medir: **contador de pulsos**
- La misma señal para todas las partículas ($\sim 1V$)
- Tiempo de la señal: $1 \mu s$ (tiempo de recolección de electrones)
- *Tiempos muertos* de $500 \mu s$ (tiempo de deriva de iones)

DETECTORES DE CENTELLEO

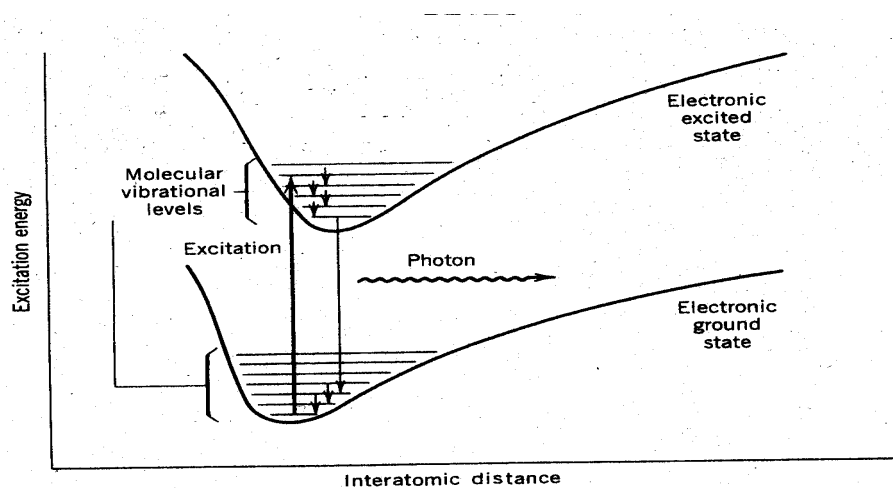
- Principio de funcionamiento

1. La radiación incidente interacciona con los átomos y moléculas del material excitándolos
2. Los estados excitados se desexcitan emitiendo luz visible (o próxima al visible) de fluorescencia
3. La luz llega a una superficie fotosensible arrancando *fotodectrones*
4. Los electrones se aceleran y se multiplican para formar un pulso eléctrico en el tubo *fotomultiplicador*

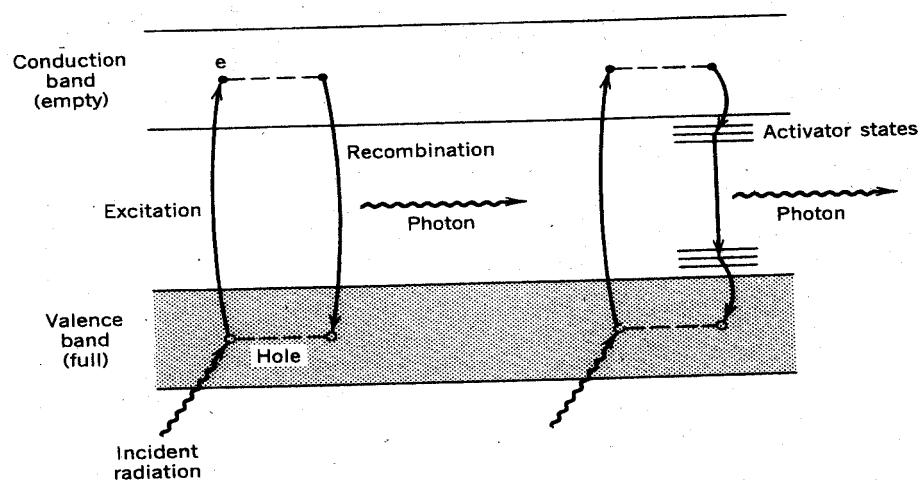


DETECTORES DE CENTELLEO

- La luz de centelleo y la multiplicación electrónica son básicamente proporcionales a la energía depositada \Rightarrow medidas de energía (25 eV/fotón en el INa , 300 eV/fotón en el BGO)
- El *tiempo de respuesta* del detector es muy rápido \Rightarrow medidas temporales (1 ns – 300 ns)
- La forma de la señal eléctrica resultante permite *discriminar* entre diferentes partículas
- **Centelleadores orgánicos**



- **Centelleadores inorgánicos**



DETECTORES SEMICONDUCTORES

- Principio de funcionamiento similar al de la cámara de ionización
- El volumen del contador es un **sólido semiconductor** \Rightarrow menor alcance a igual energía
- La radiación crea **pares electrón-hueco** a su paso por zona de unión de un semiconductor tipo p y otro tipo n (*depletion region*), que son dirigidos por el campo eléctrico hacia los electrodos situados en los extremos del contador.
- Menor energía para formar un par electrón-hueco ($w \approx 3,6 \text{ eV/par}$ para el Si a 300 K) \Rightarrow Excelente resolución energética
- Dimensiones pequeñas \Rightarrow tiempos de recolección pequeños \Rightarrow buena resolución temporal (10 – 100 ns)

