

MODULO 2

INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN GAMMA CON LA MATERIA

Existen 3 mecanismos principales de absorción de los rayos γ por la materia:

- Efecto Fotoeléctrico
- Efecto Compton
- Producción de Pares

EFECTO FOTOELÉCTRICO

En el proceso fotoeléctrico toda la energía del fotón incidente, $h\nu$, es cedida a un electrón ligado de un átomo que resulta expulsado del mismo con una energía cinética

$$T = h\nu - W$$

donde W es el potencial de ionización del electrón. Este puede así salir del absorbente o, más probablemente, ser reabsorbido casi de inmediato debido al corto alcance de los electrones en un sólido.

Este mecanismo de interacción de fotones con la materia es el dominante cuando la energía de los rayos γ es baja, (inferior a los 50 keV para el aluminio y a los 500 keV para el plomo). La sección eficaz de absorción fotoeléctrica resulta ser proporcional en primera aproximación a Z^5 , o sea es fuertemente dependiente del número atómico del absorbente. Para fotones de una dada energía, este tipo de absorción es mucho mayor en materiales pesados como el plomo, que en materiales livianos como el aluminio.

En resumen el efecto fotoeléctrico es sumamente importante en la absorción de radiación γ de baja energía por materiales pesados.

EFECTO COMPTON

A medida que la energía de la radiación incidente aumenta, su longitud de onda decrece y hay una mayor tendencia a interactuar con los electrones individuales y no con el átomo en su conjunto como en el caso del efecto fotoeléctrico. Los fotones muy energéticos “ven” a los electrones orbitales exteriores, débilmente ligados, prácticamente como partículas libres y la interacción puede considerarse como una colisión elástica entre un fotón y un electrón libre. El fotón no puede absorberse totalmente existiendo por lo tanto un fotón dispersado, que se mueve en dirección distinta a la del cuanto original, con una energía y una cantidad de movimiento también diferentes. La conservación de estas magnitudes para el sistema en su conjunto la garantiza el electrón que dispersa el fotón retrocediendo con la velocidad y en la dirección apropiadas.

Este proceso, conocido como **efecto Compton**, constituye el mecanismo de absorción más importante para radiación γ con energías entre los 0,5 y los 10 MeV. Una característica destacada del mismo es que la radiación difundida tiene una longitud de onda que depende del ángulo de difusión y que es mayor que la del haz incidente.

La figura 1 muestra un esquema representativo de la interacción Compton.

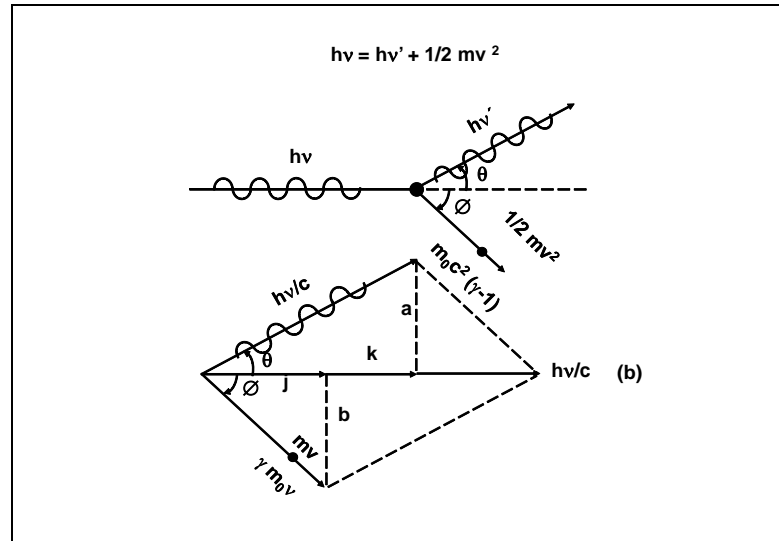


Figura 1 - Interacción Compton

La energía del fotón dispersado es

$$h\nu = \frac{h\nu_0}{1 + \frac{h\nu_0}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}$$

El coeficiente másico de absorción Compton resulta igual a:

$$\frac{\sigma}{\rho} = N \frac{Z}{A} \sigma_{comp}$$

con una variación respecto a Z que resulta lenta. Para los elementos livianos Z/A es aproximadamente igual a 1/2 por lo que el coeficiente másico de absorción Compton resulta prácticamente constante para una energía dada de los fotones.

CREACIÓN DE PARES

Este tercer mecanismo de absorción de la radiación electromagnética por la materia aparece cuando la energía de los fotones incidentes alcanza al doble de la energía en reposo de los electrones, o sea cuando

$$h\nu = 2 \times 0,511 \text{ MeV} = 1,022 \text{ MeV}$$

aumentando, a partir de allí, su importancia con el aumento de la energía de la radiación gamma. Consiste en la creación de un par electrón-positrón a partir de un fotón que desaparece en la interacción. Este proceso debe tener lugar en el campo eléctrico existente en la vecindad de un núcleo al que se le entrega cierta energía de retroceso y cierta cantidad de movimiento de forma tal que se cumplan los respectivos principios de conservación.

La sección eficaz resulta proporcional a Z^2 lo que hace que para fotones de cierta energía la formación de pares aumente rápidamente con el número atómico. O sea, este proceso tiene importancia a energías elevadas y con elementos pesados. Cuando $E_\gamma = 4,75$ MeV la contribución de la formación de pares y del efecto Compton al coeficiente total de absorción μ se iguala. A partir de allí el primer mecanismo predomina.

La creación de pares está estrechamente ligada con la aniquilación electrón-positrón. Cuando este último es creado va perdiendo velocidad por colisiones sucesivas con los átomos hasta quedar prácticamente en reposo. En ese momento puede interactuar con un electrón que se encuentra en el mismo estado desapareciendo ambas partículas y dando lugar a dos fotones, cada uno de 0,511 MeV, que se mueven en direcciones opuestas. Esta radiación secundaria, llamada **radiación de aniquilamiento**, acompaña normalmente la absorción de rayos gamma por la materia.

ABSORCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Resumiendo, la radiación electromagnética es atenuada por la materia al ir eliminándose fotones del haz original en procesos únicos, principalmente por cualquiera de los tres mecanismos antes mencionados.

Cada uno de los tres mecanismos predomina, para un dado material, en determinado rango de energía de la radiación incidente. La figura 2 muestra la importancia relativa de estos procesos en función de la energía de los rayos gamma y del número atómico del absorbente.

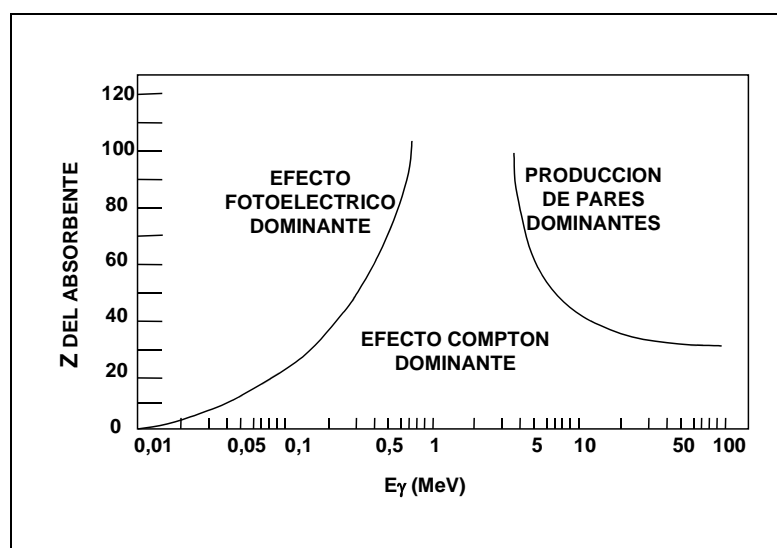


Figura 2 - Importancia relativa de los tres tipos principales de interacción de la radiación electromagnética con la materia

El **Coefficiente de Absorción Total μ** da la probabilidad de que un fotón interactúe con la materia por unidad de recorrido del haz, y es la suma de los coeficientes de atenuación parciales según sea la interacción por efecto fotoeléctrico, por dispersión Compton o por creación de pares.

$$\mu = \tau + \sigma + \chi$$

La figura 3 indica cómo contribuye cada coeficiente de absorción al μ total del plomo en función de la energía de los fotones. Se ve que a energías bajas y en materiales de alto número atómico predomina el efecto fotoeléctrico, que para energías intermedias (algo inferiores a 1 MeV) y cualquier Z la mayor parte de la atenuación se debe al efecto Compton y que para grandes energías y elementos de alto número atómico prevalece la creación de pares.

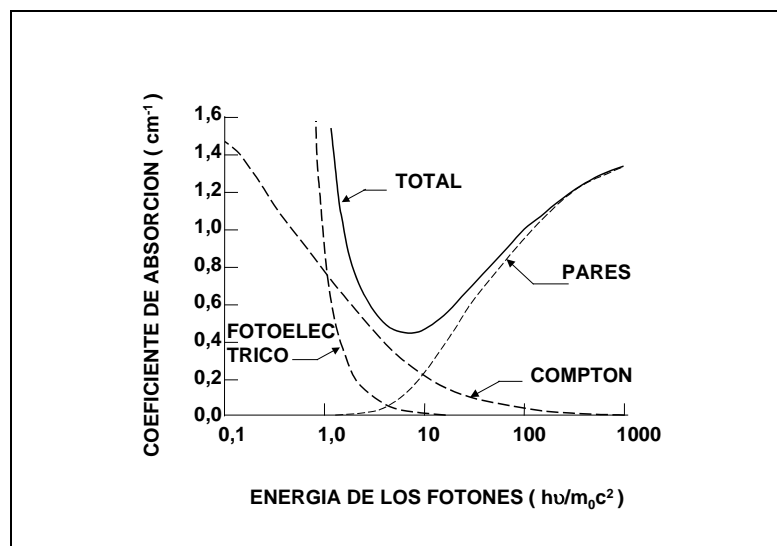


Figura 3 - Coeficiente de absorción y contribución de cada mecanismo de absorción en Pb en función de la energía de los fotones

El coeficiente másico de absorción total será igual a la suma de los coeficientes másicos parciales

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N}{A} (\tau + \sigma + \chi)$$

que resultan ser más importantes que los coeficientes lineales ya que son independientes de la densidad y del estado (gaseoso, líquido o sólido) del absorbente.

A diferencia de las partículas alfa y beta que producen gran ionización primaria en sucesivas interacciones de las partículas con el medio, los rayos γ crean sólo un par iónico por colisión y únicamente en el caso de interacciones fotoeléctricas o Compton. Son los fotoelectrones, los electrones de retroceso y los electrones y positrones surgidos en la creación de pares los que producen gran ionización y excitación al ser frenados por la materia, por lo que para la radiación electromagnética, la ionización primaria resulta despreciable frente a la secundaria.

No toda la energía de la radiación incidente es efectivamente absorbida por el medio. En el efecto fotoeléctrico, el fotoelectrón se lleva casi toda la energía del fotón, la que es entregada al medio fundamentalmente por ionización. El remanente, equivalente a la energía de ionización del electrón arrancado es también entregada al medio. Por esto en el proceso fotoeléctrico se acepta que toda la energía del rayo γ es transferida al medio por ionización o excitación. En cambio en la dispersión Compton es el electrón de rechazo el que entrega su energía al medio mientras que el fotón dispersado, de menor energía que el inicial, puede no hacerlo. Por último en la creación de pares, sólo la energía cinética, del electrón y del positrón

creados, es transferida al medio por ionización o excitación. La otra parte de la energía original del fotón ($2m_0c^2$) queda como energía en reposo de ambas partículas. La aniquilación del positrón da lugar a dos fotones de 0,511 MeV cada uno, que se consideran radiación dispersada, similar a la del efecto Compton.

LEY DE ATENUACIÓN

El paso de la radiación electromagnética por la materia se caracteriza por una ley de atenuación exponencial:

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

donde I es la intensidad de la radiación y μ es el coeficiente de absorción total. Esta expresión, en escala semi-logarítmica, resulta una recta, siendo su pendiente el coeficiente lineal de atenuación total

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\mu x$$

Una magnitud de uso común para expresar la atenuación de un haz de radiación γ es el **semiespesor**, o sea, el ancho de absorbente necesario para reducir la intensidad a la mitad ($I/I_0=1/2$). Reemplazando en la anterior queda:

$$\mu = \frac{0,693}{x_{1/2}} \text{ donde } x_{1/2} \text{ es el semiespesor.}$$

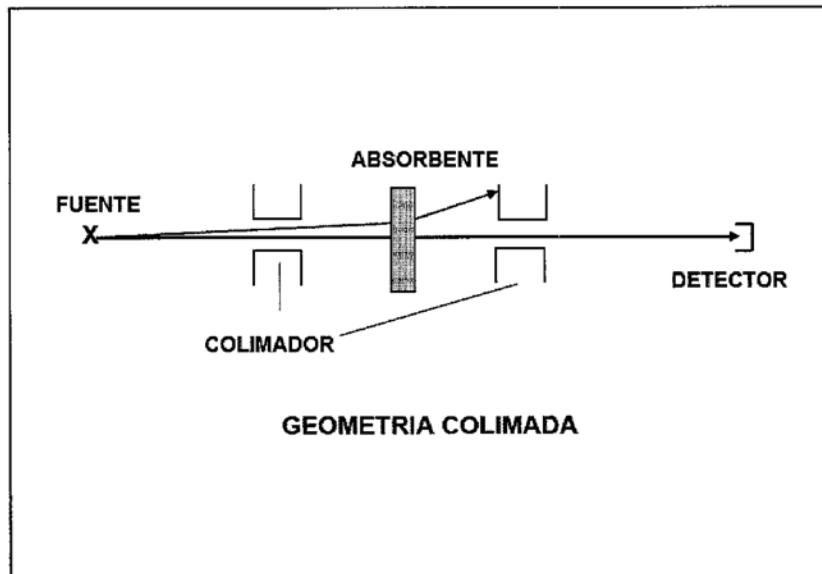
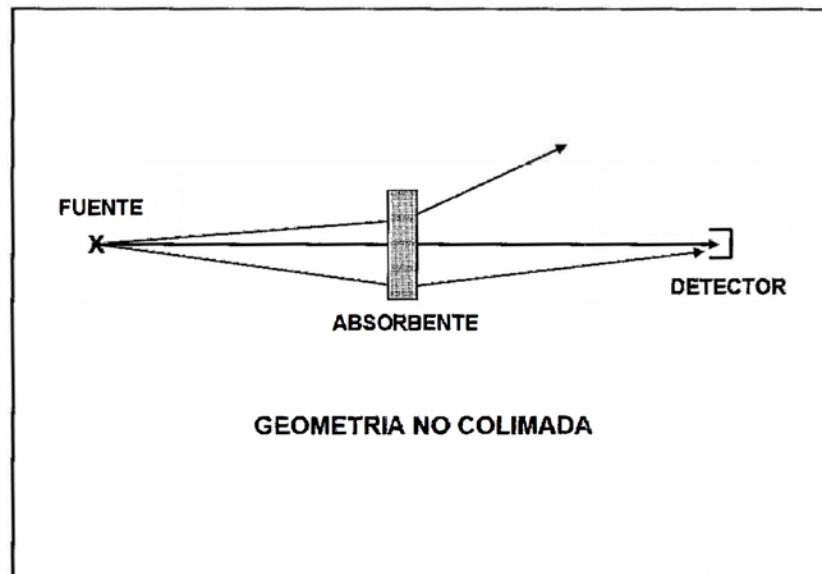
De la ecuación anterior surge que el **coeficiente de absorción másico** es

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{0,693}{(x_{1/2}) \rho}$$

Puesto que **coeficiente de absorción másico** varía muy lentamente con Z , la variación $(x_{1/2} \rho)$ de un elemento a otro también es lenta. O sea, cuanto mayor es la densidad de un material, menor es el espesor necesario para producir una absorción dada de la radiación. Es por ello que como **BLINDAJES** suelen usarse materiales pesados, por ejemplo el plomo.

GEOMETRÍAS COLIMADAS Y NO COLIMADAS

En la medición del coeficiente de atenuación total μ , es importante que llegue al detector sólo la radiación primaria, impidiéndose la detección de los fotones dispersados por efecto Compton y la de los fotones secundarios originados en la creación de pares. Ésto se logra por medio de una disposición experimental de fuente, detector, absorbente y colimadores conocida como geometría colimada. Cuando se permite que los fotones dispersados en el absorbente o en los colimadores alcancen el detector se tiene una geometría no colimada. Las figuras muestran las dos situaciones descriptas. Con la geometría colimada la atenuación de un haz de radiación electromagnética se debe exclusivamente al número de fotones primarios eliminados.



Con una geometría no colimada, la curva de transmisión ya no es una recta y la pendiente de la curva de transmisión aumenta con el espesor del absorbente. Esto se debe a que la radiación secundaria, que aumenta con el espesor del absorbente, enmascara la atenuación de la radiación original.

Hay otra consideración a destacar en relación a la medición de radiación electromagnética. Cuando se coloca un detector frente a una fuente radiactiva es imposible evitar el ingreso de la radiación proveniente de otras fuentes, naturales o artificiales, denominada radiación de fondo. Esta radiación, no deseada a los fines de la medición, puede disminuirse tomando los recaudos pertinentes (castillo de plomo) pero en ningún caso puede anularse por completo. No obstante el fondo de radiación puede medirse en ausencia de la fuente bajo medición y, al medir la radiación de ésta, se la resta para obtener la contribución propia de la fuente.