

Clase 0: Introducción al curso

Experimentos Cuánticos II - 2025

[Contenido]

- Equipo docente:

Paula Pagano (JTP) / Félix Requejo (Prof.)

- Modalidad

- Actividades experimentales (prácticas):

Teoría 1: Interacción de la radiación con la materia (c/ PRACTICA DE LAB)

Teoría 2: Fuentes de radiación: laboratorio de sincrotrón

Teoría 4: Fluorescencia de rayos X: determinaciones cuantitativas (c/ PRACTICA LAB)

Teoría 5: Dispersión de rayos X (c/ PRACTICA LAB)

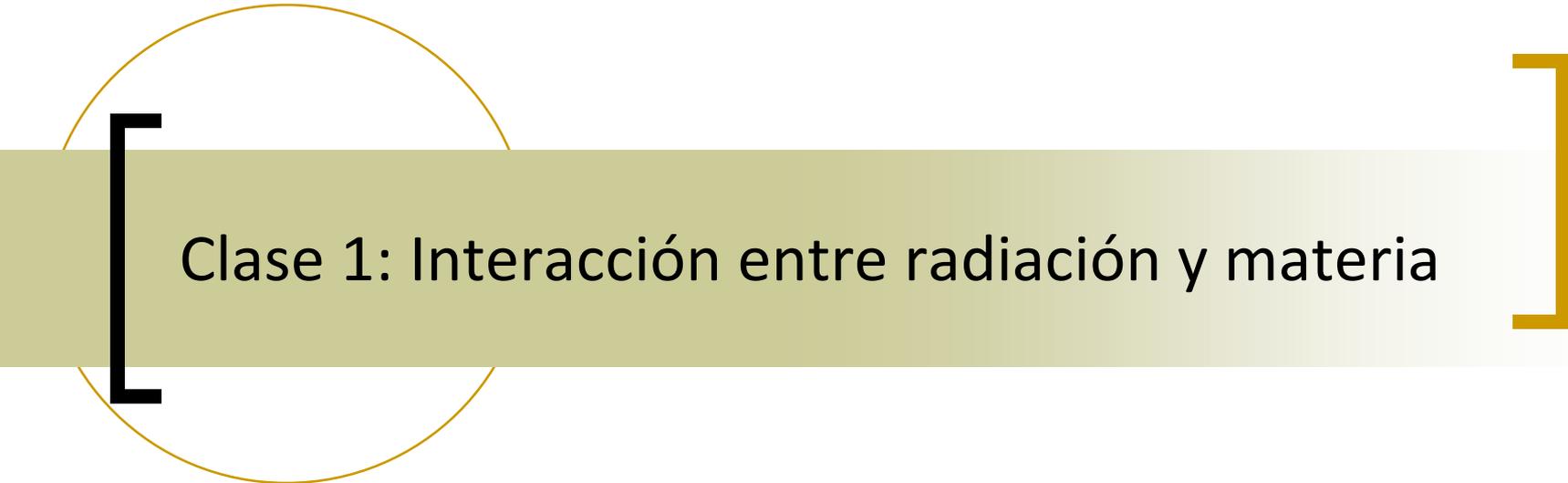
Teoría 6: Absorción de rayos X (c/ PRACTICA LAB)

Teoría 7: nuevas técnicas de rayos X con radiación de sincrotrón. 4ta generación.

Trabajo Final (?)

- Cronograma (finalización 18/7, con aprobación de cursada viernes 9/8)

- Horarios de clases: L y V. INICIO 14:00 hs (LAB: miércoles)



Clase 1: Interacción entre radiación y materia

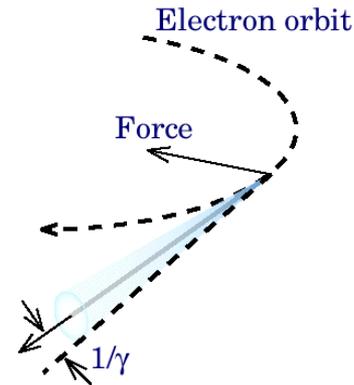
Experimentos Cuánticos II - 2025

Radiación y materia

Radiación de partículas cargadas con $v \sim c$

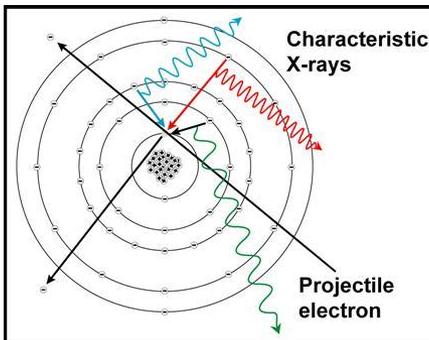


Acelerador FEL (Free-Electron Laser)



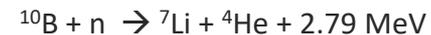
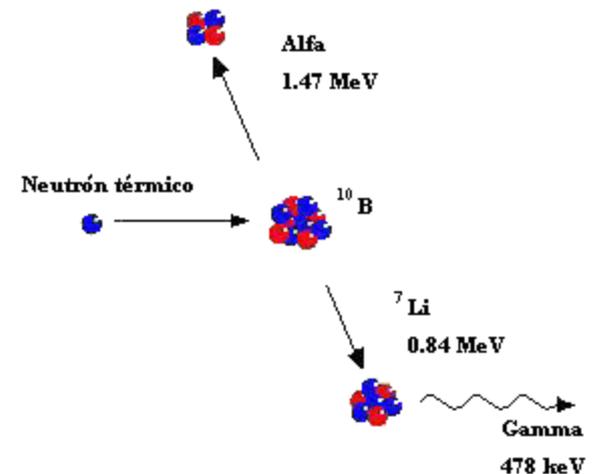
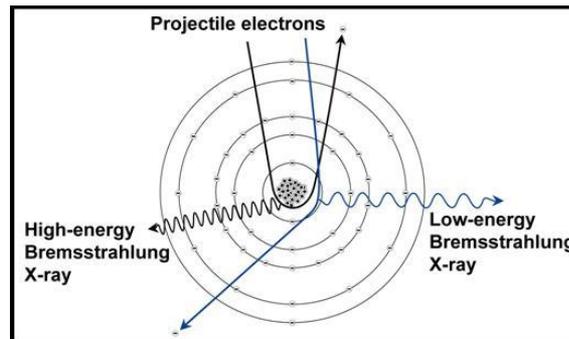
Origen de la radiación:

- Radiación γ :
 - decaimientos nucleares
 - aceleradores lineales de laser de electrones libres (FEL)
- Radiación X:
 - radiación de frenado
 - emisiones características (fluorescentes)
 - sincrotrón (partículas cargadas aceleradas a $v \sim c$)
 - aniquilación de partículas (e^+ y e^-)



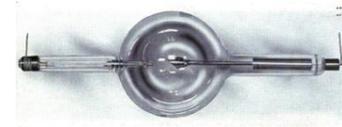
Emisión característica luego de un proceso de fotoabsorción

Emisión continua de frenado luego de una colisión entre una partícula cargada con un átomo.

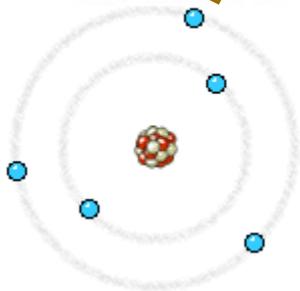
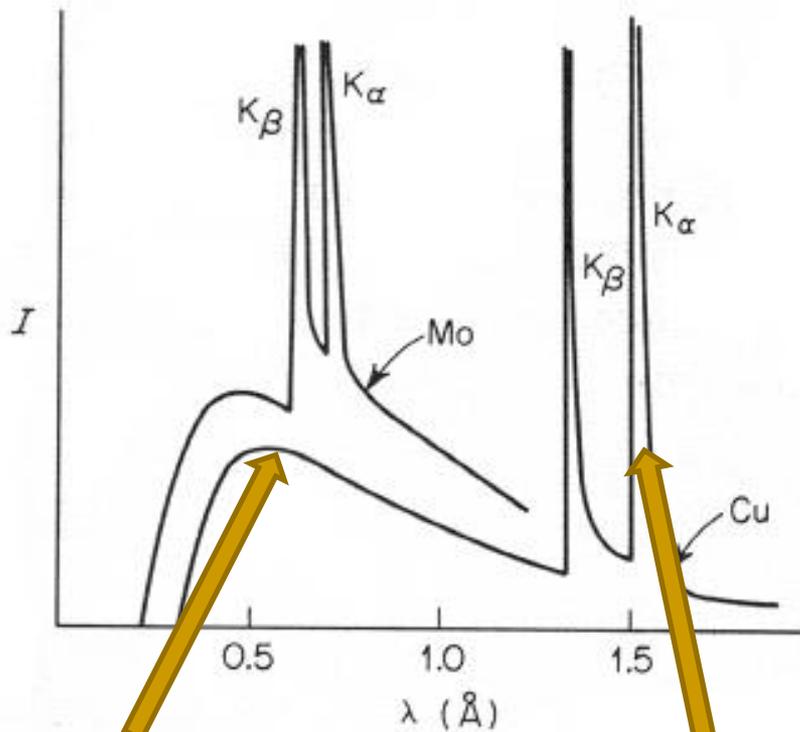


Reacción nuclear

Producción de Rayos X



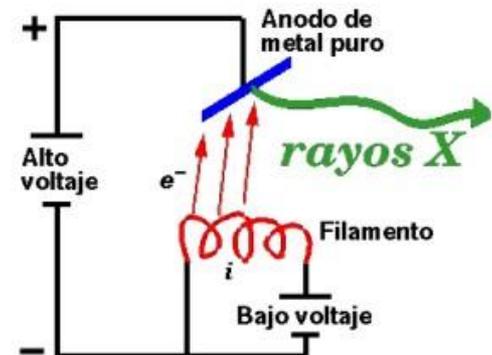
Fuente “convencional”:



Espectro continuo de emisión



Espectro característico de emisión



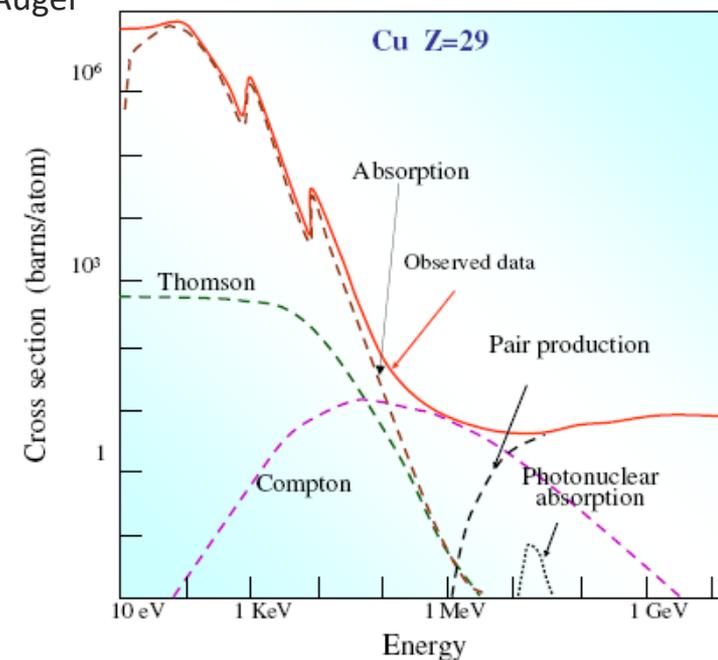
Radiación y materia

Interacción de la radiación con la materia en función de la energía incidente:

- Scattering coherente
Scattering Thomson (Rayleigh)
- Scattering incoherente (Compton)
- Efecto fotoeléctrico:
Absorción → fotoelectrones, fotones fluorescentes, electrones Auger
- Producción de pares
- Fotodesintegración

*El efecto fotoeléctrico es el **proceso dominante** en el rango de energías de los fotones incidentes entre 1-100 keV.*

X-ray attenuation :



Radiación y materia

Interacción de la radiación con la materia en función de la energía incidente:

- Scattering coherente

Scattering Thomson (Rayleigh)

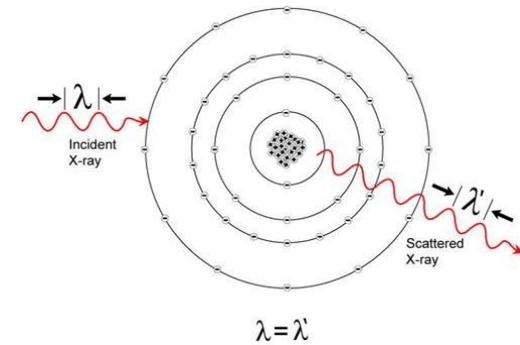
Se trata de un proceso dispersivo **coherente**, o de dispersión clásico.

Ocurre cuando el fotón de rayos X interactúa con el átomo como entidad completa, el fotón es dispersado sin interactuar éste con la estructura interna del átomo.

La interacción ocurre sin pérdida de energía para el fotón.

Su contribución al coeficiente de absorción es minoritario.

Se produce fundamentalmente una retrodispersión del fotón.



Radiación y materia

Interacción de la radiación con la materia en función de la energía incidente:

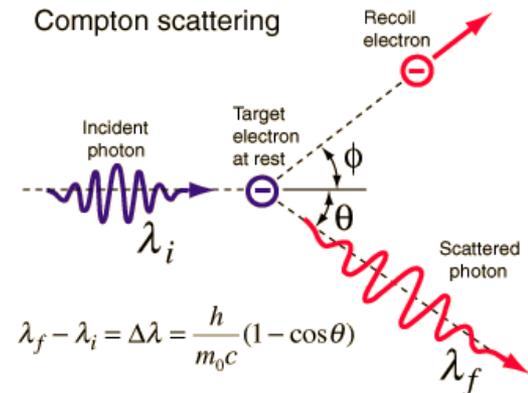
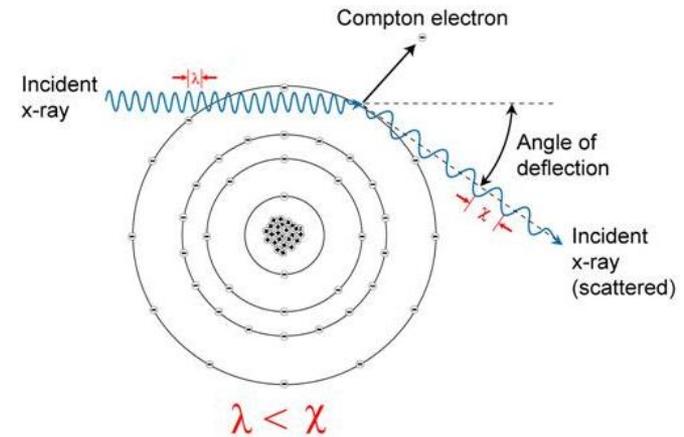
- Scattering incoherente (Compton)

Se trata de una dispersión incoherente debido al cambio de energía del fotón incidente, cuyo corrimiento (shift) depende del ángulo de la trayectoria incidente y no de la naturaleza del medio.

Se produce cuando el fotón incidente es «desviado» de su trayectoria original por interacción con un electrón del átomo.

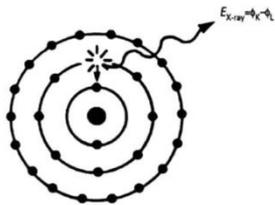
El electrón gana energía y resulta eyectado de su orbital original.

El fotón X pierde energía luego de la interacción pero continúa atravesando el átomo a través de una trayectoria ahora alterada (dado su menor energía o mayor longitud de onda respecto a la original).

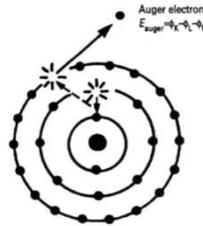


Radiación y materia

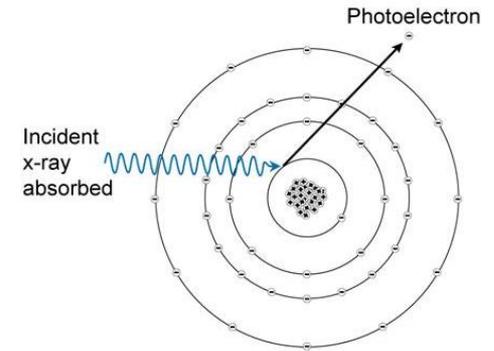
Interacción de la radiación con la materia en función de la energía incidente:



Desexcitación radiativa



Desexcitación no-radiativa



- Efecto fotoeléctrico:

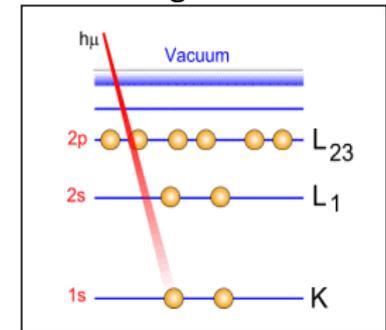
Absorción \rightarrow fotoelectrones, fotones fluorescentes, electrones Auger

La absorción de los rayos X ocurre cuando su energía cinética es al menos igual a la de ligadura de un electrón interno del átomo. Dicho proceso de absorción es seguido por la promoción del mismo electrón a una capa permitida más externa o al continuo (dando lugar a la ionización del átomo)

Para recuperar su neutralidad de carga el átomo emite un rayo X característico. Dicha emisión de fotones de menor energía puede ser absorbida por el propio átomo.

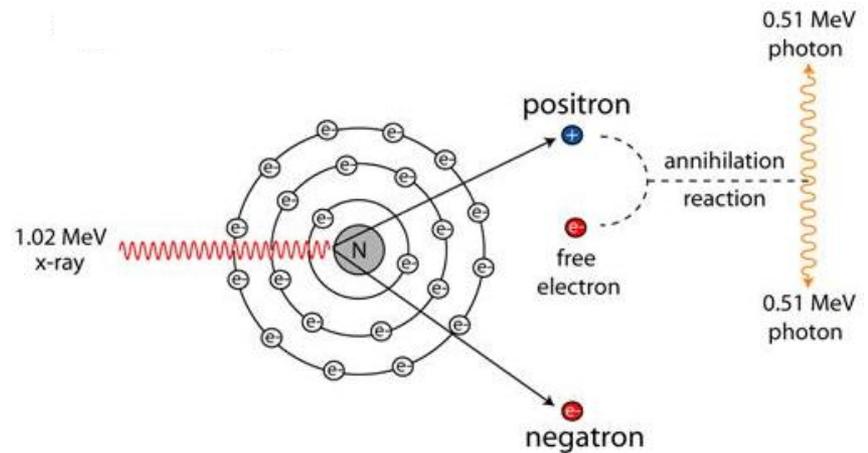
La absorción fotoeléctrica es uno de los procesos dominantes para la absorción de rayos X hasta energías del orden de los 500 keV. También resulta dominante para elementos con alto número atómico.

Electrones Auger



Radiación y materia

Interacción de la radiación con la materia en función de la energía incidente:



- Producción de pares

Se puede producir sólo cuando la energía es mayor que 1.02 MeV, pero realmente es significativa para energías del orden de 10 MeV.

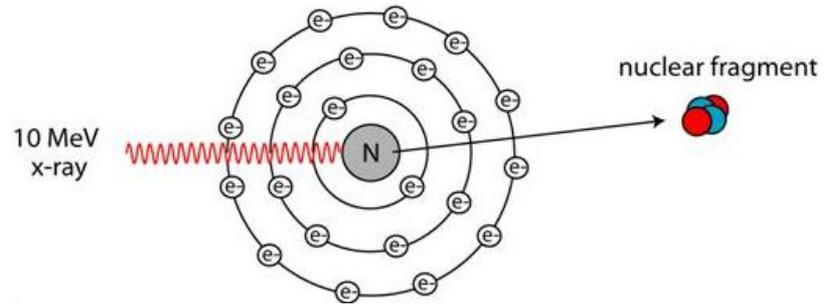
La producción de pares ocurre cuando se crean un electrón y un positrón por la aniquilación de un fotón de rayos X.

Los positrones poseen una vida media corta y desaparecen (aniquilación de positrones) a través de la creación de dos fotones de 0.51 MeV.

Resulta un proceso relevante cuando fotones de muy alta energía atraviesan materiales con elementos con un elevado número atómico.

Radiación y materia

Interacción de la radiación con la materia en función de la energía incidente:



- Fotodesintegración

En este proceso el fotón de rayos X es capturado por el núcleo del átomo con una eyección de partículas nucleares cuando toda la energía del fotón es atrapada por el núcleo.

Debido a la enorme energía involucrada, este proceso se puede despreciar para la mayoría de los casos de fotones de rayos X (producciones mediante lámparas convencionales y sincrotrones).

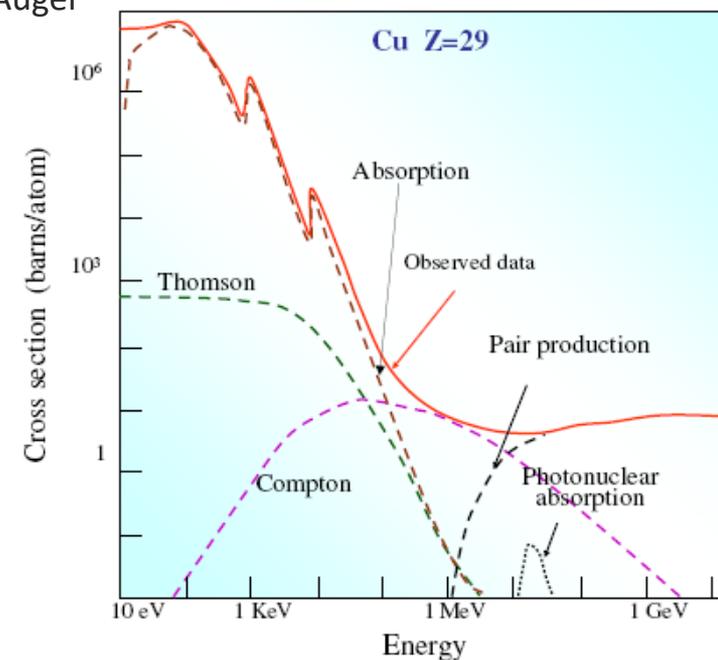
Radiación y materia

Interacción de la radiación con la materia en función de la energía incidente:

- Scattering coherente
Scattering Thomson (Rayleigh)
- Scattering incoherente (Compton)
- Efecto fotoeléctrico:
Absorción → fotoelectrones, fotones fluorescentes, electrones Auger
- Producción de pares
- Fotodesintegración

*El efecto fotoeléctrico es el **proceso dominante** en el rango de energías de los fotones incidentes entre 1-100 keV.*

X-ray attenuation :



Radiación y materia

Interacción de la radiación con la materia en función de la energía incidente: **TECNICA ASOCIADA:**

- **Scattering coherente**

Scattering Thomson (Rayleigh)



Small Angle X-ray Scattering (SAXS)

- Scattering incoherente (Compton)

- **Efecto fotoeléctrico:**

Absorción → fotoelectrones, **fotones fluorescentes**, electrones Auger



X-ray Absorption Spectroscopy (XAS):

- Producción de pares

- Fotodesintegración

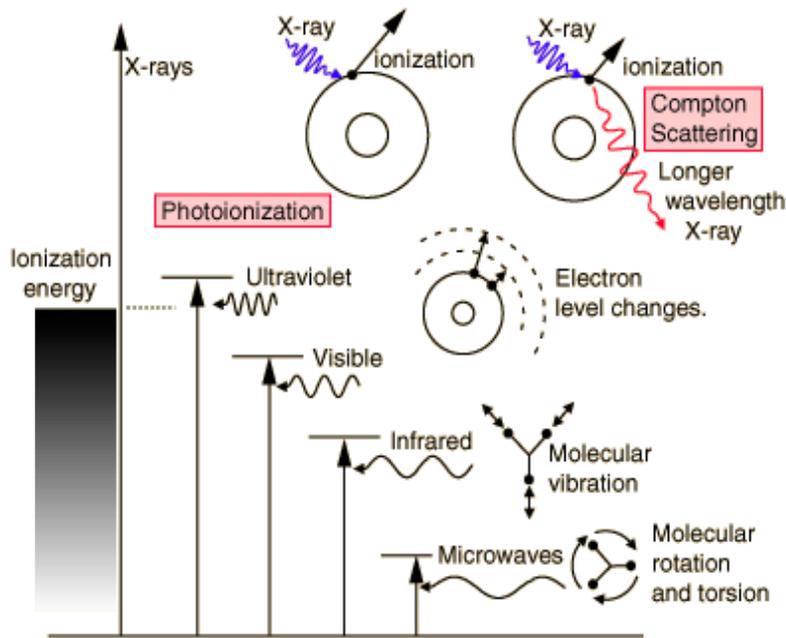
**X-ray Absorption Near Edge Structure (XANES)
Extended X-ray Absorption Fine Structure (EXAFS)**



X-ray Fluorescence (XRF)

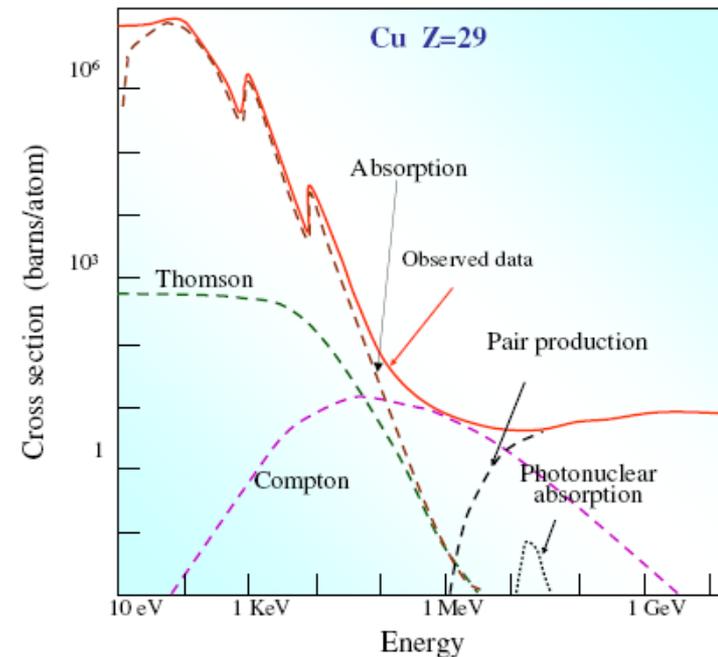
Radiación y materia

Radiación ionizante y no ionizante
(depende de E y Z):



El efecto fotoeléctrico es el *proceso dominante* en el rango de energías de los fotones incidentes entre 1-100 keV.

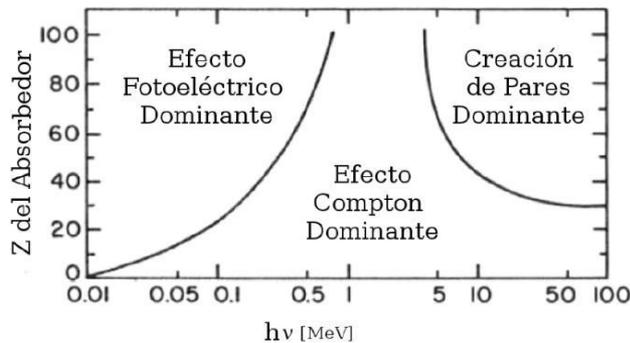
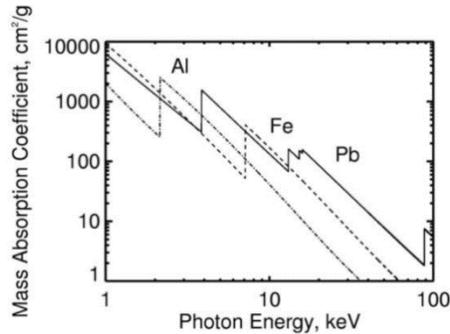
X-ray attenuation :



Radiación y materia

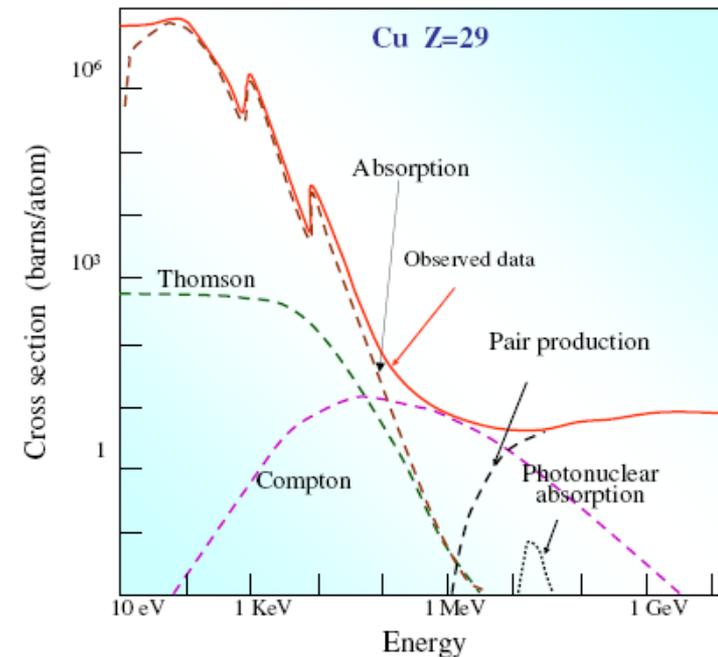
Características de la absorción:

- Depende de E y Z
- Diferentes procesos resultan despreciables o relevantes para diferentes rangos de energía



El efecto fotoeléctrico es el *proceso dominante* en el rango de energías de los fotones incidentes entre 1-100 keV.

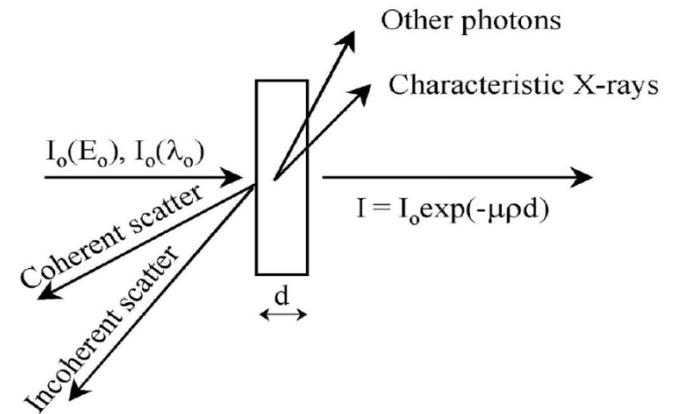
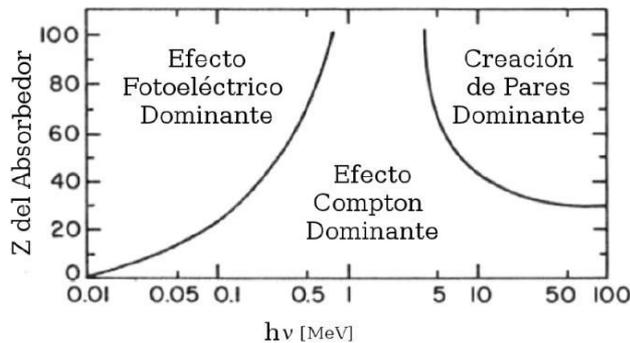
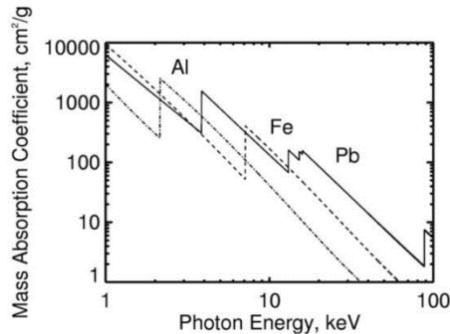
X-ray attenuation :



Coeficiente de absorción

Características de la absorción:

- Depende de E y Z
- Diferentes procesos resultan despreciables o relevantes para diferentes rangos de energía



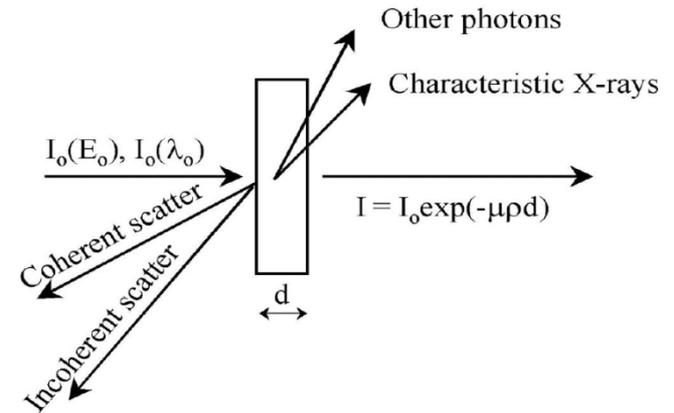
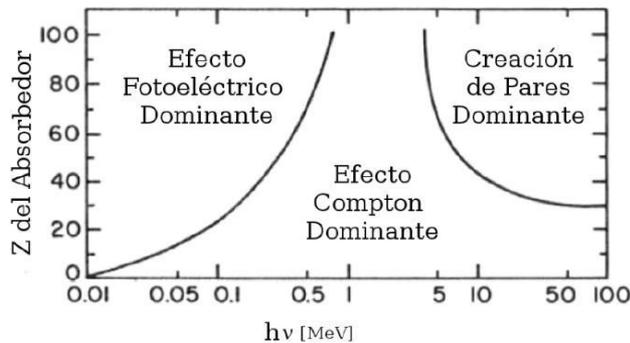
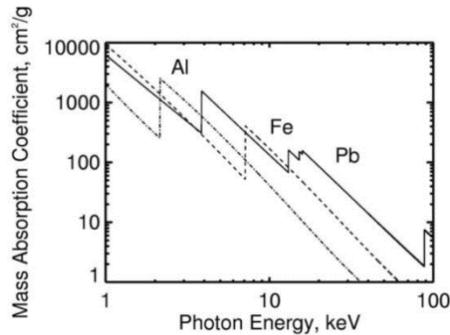
$$I(d, \rho, E) = ?$$

Aproximación teórica vs. aproximación empírica

Coeficiente de absorción

Características de la absorción:

- Depende de E y Z
- Diferentes procesos resultan despreciables o relevantes para diferentes rangos de energía



$$I(d, \rho, E) = ?$$

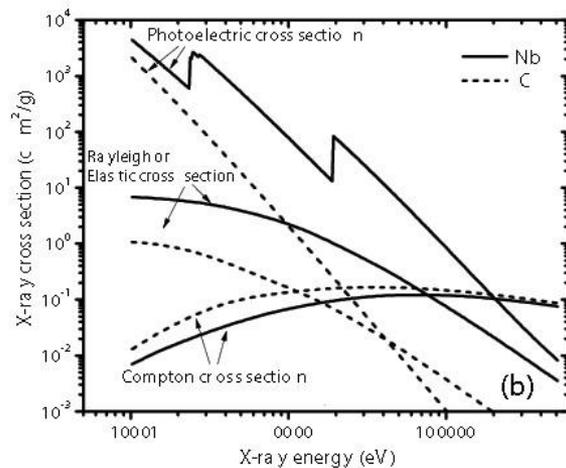
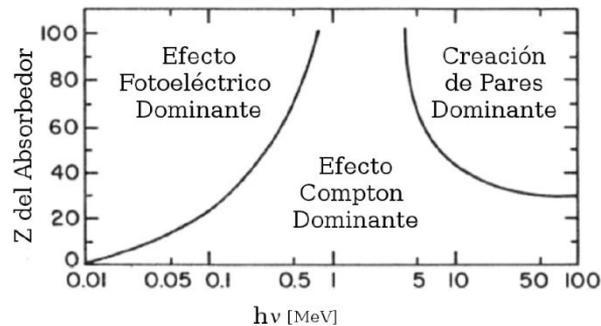
Aproximación teórica vs. aproximación empírica

La intensidad I_0 de un haz de rayos X que atraviesa un material de espesor constante d y densidad homogénea ρ reduce su intensidad a I de acuerdo a la conocida **ley de Lambert-Beer**:

$$I = I_0 e^{-\mu\rho d}$$

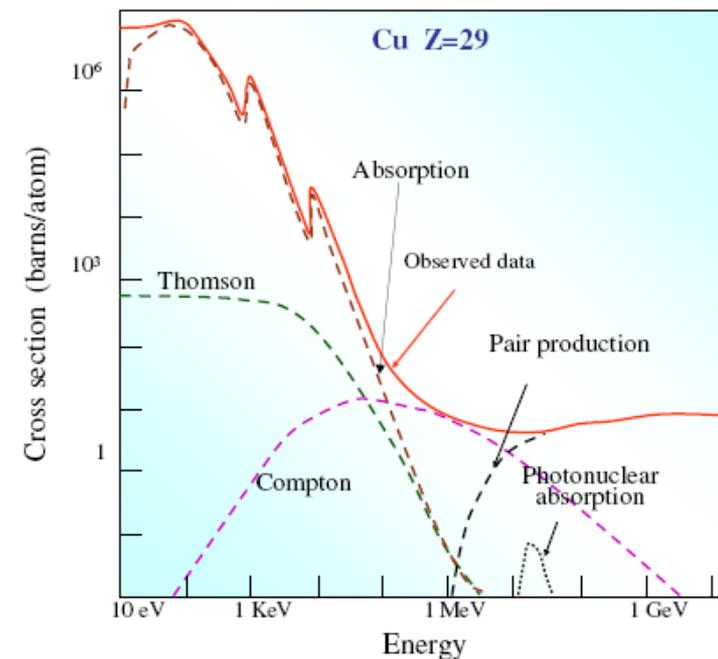
Coeficiente de absorción

Radiación ionizante y no ionizante
(depende de E y Z):

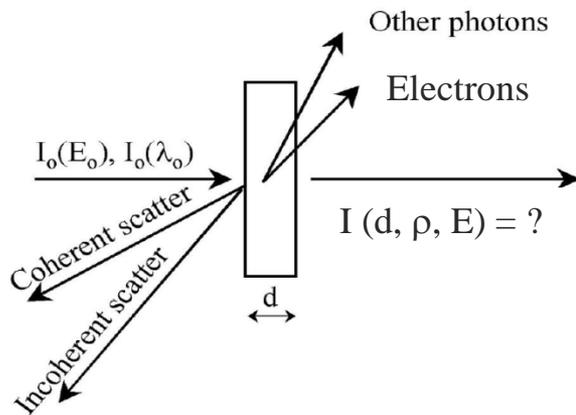
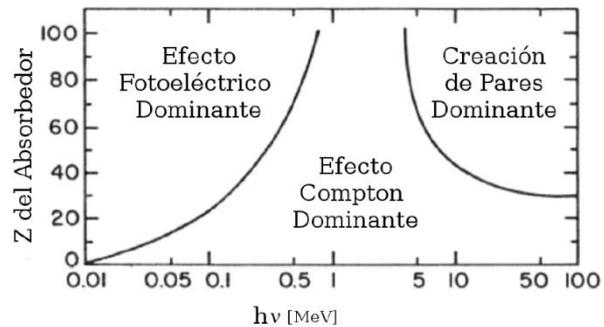


El efecto fotoeléctrico es el *proceso dominante* en el rango de energías de los fotones incidentes entre 1-100 keV.

X-ray attenuation :

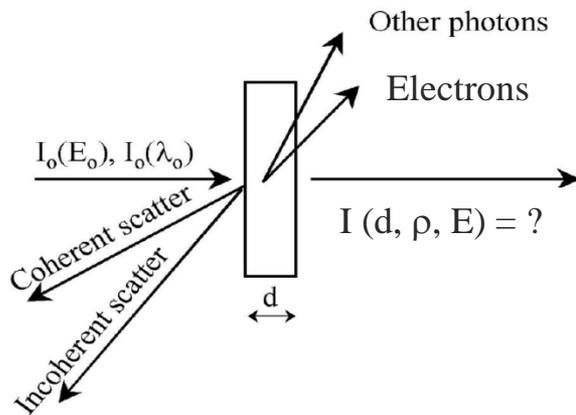
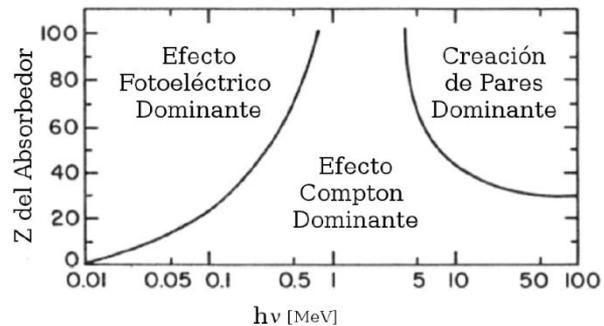


Coeficiente de absorción



Aproximación teórica vs. aproximación empírica

Coeficiente de absorción



Aproximación teórica vs. aproximación empírica

La intensidad I_0 de un haz de rayos X que atraviesa un material de espesor constante d y densidad homogénea ρ reduce su intensidad a I de acuerdo a la conocida ley de Lambert-Beer:

$$I = I_0 e^{-\mu\rho d}$$

Coeficiente de absorción

El número de fotones (intensidad) se ve reducido pero la energía del fotón incidente permanece inalterable. El término μ se designa como el coeficiente másico de atenuación y posee las dimensiones de $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$. El producto $\mu \cdot \rho = \mu_L$ se denomina coeficiente lineal de absorción y se expresa en cm^{-1} . $\mu(E)$ es a veces también llamado “sección eficaz total de absorción (para una dada energía de fotón incidente E).

$$I = I_0 e^{-\mu \rho d} = I_0 e^{-\mu_L d}$$

$$\mu_L = \sum_i \mu_{Li}$$

CARACTERÍSTICAS DE LA ABSORCIÓN:

Materiales con bajo Z poseen una dada atenuación que resulta menor, para la misma energía, que la que experimentan materiales con Z mayor.

Un dado material atenuará en la región de altas energías (rayos X duros o gama) y lo hará menos que la región de bajas energías (rayos X blandos).

Excepto en la región de los bordes de absorción, la absorción resulta proporcional a $Z^4 \lambda^3$.

El coeficiente de absorción másico de una matriz compleja $\mu(M)$, consistente en una mezcla de diversos elementos químicos, puede ser calculado a partir de los coeficientes de absorción correspondientes a cada uno de los elementos individuales.

Regla de mezcla:

$$\mu(M) = \sum_{i=1}^n w_i \mu_i$$

μ_i es el coeficiente másico de atenuación del i-ésimo elemento puro y w_i es la correspondiente fracción de masa presente en la muestra.

Coeficiente de absorción

El número de fotones (intensidad) se ve reducido pero la energía del fotón incidente permanece inalterable. El término μ se designa como el coeficiente másico de atenuación y posee las dimensiones de $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$. El producto $\mu \cdot \rho = \mu_L$ se denomina coeficiente lineal de absorción y se expresa en cm^{-1} . $\mu(E)$ es a veces también llamado "sección eficaz total de absorción (para una dada energía de fotón incidente E).

$$I = I_0 e^{-\mu \rho d} = I_0 e^{-\mu_L d}$$

$$\mu_L = \sum_i \mu_{Li}$$

CARACTERÍSTICAS DE LA ABSORCIÓN:

Materiales con bajo Z poseen una dada atenuación que resulta menor, para la misma energía, que la que experimentan materiales con Z mayor.

Un dado material atenuará en la región de altas energías (rayos X duros o gama) y lo hará menos que la región de bajas energías (rayos X blandos).

Excepto en la región de los bordes de absorción, la absorción resulta proporcional a $Z^4 \lambda^3$.

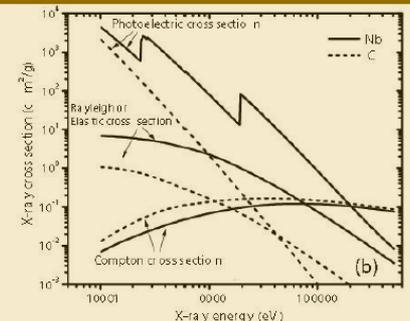
El coeficiente de absorción másico de una matriz compleja $\mu(M)$, consistente en una mezcla de diversos elementos químicos, puede ser calculado como:

La absorción de la radiación en la materia es un efecto acumulativo producto de los diferentes tipos de procesos de interacción que se producen y que ocurren simultáneamente. De acuerdo a esto el coeficiente másico de atenuación μ_i puede expresarse, para cada elemento i, como:

$$\mu_L = \sum_i \mu_{Li}$$

$$\mu_{Li} = \tau_i + \sigma_i + \kappa_i$$

τ_i es la sección eficaz de absorción fotoeléctrica, σ_i el término que tiene en cuenta los efectos de dispersión y κ_i la contribución correspondiente a la formación de pares. Todos estos términos dependen de la energía del fotón incidente.



Coeficiente de absorción

Absorción fotoeléctrica:

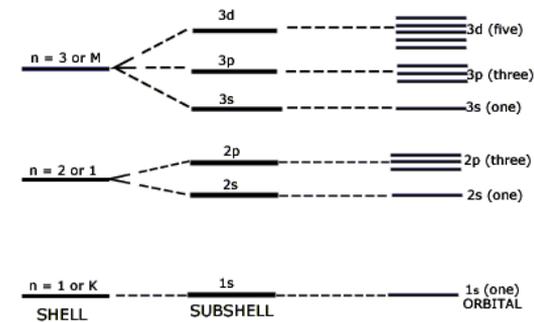
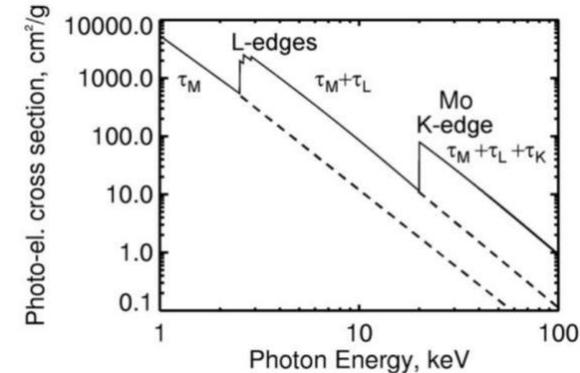
Puede ocurrir sólo cuando la energía del fotón incidente E es igual o mayor que la energía de enlace ϕ del electrón ligado al átomo.

Dado que el proceso puede ocurrir para cada uno de los estados excitables de los electrones del átomo, la sección eficaz total fotoeléctrica τ_i será la suma de todas las contribuciones correspondiente a cada capa y subcapa.

$$\tau_1 = \tau_{i,K} + \tau_{i,L} + \tau_{i,M} + \dots = \tau_{i,K} + (\tau_{i,L1} + \tau_{i,L2} + \tau_{i,L3}) + (\tau_{i,M1} + \dots + \tau_{i,M5}) + \dots$$

Un modelo que describe la absorción fotoeléctrica viene dado por:

$$\tau_i = A \frac{Z_i^4}{E^3}$$

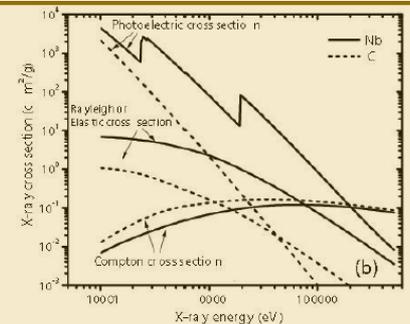


La absorción de la radiación en la materia es un efecto acumulativo producto de los diferentes tipos de procesos de interacción que se producen y que ocurren simultáneamente. De acuerdo a esto el coeficiente másico de atenuación μ_i puede expresarse, para cada elemento i , como:

$$\mu_L = \sum_i \mu_{Li}$$

$$\mu_{Li} = \tau_i + \sigma_i + \kappa_i$$

τ_i es la sección eficaz de absorción fotoeléctrica, σ_i el término que tiene en cuenta los efectos de dispersión y κ_i la contribución correspondiente a la formación de pares. Todos estos términos dependen de la energía del fotón incidente.



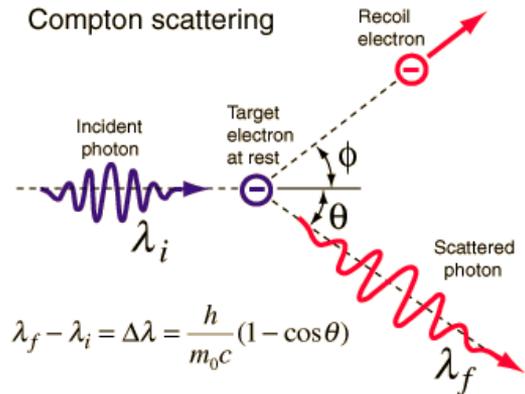
Coeficiente de absorción

Atenuación por dispersión:

La dispersión Compton ocurre cuando los fotones X interactúan con los electrones débilmente ligados. Luego de la dispersión inelástica a un dado ángulo, el fotón de energía inicial E tendrá una energía E' menor dada por:

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \phi)}$$

Donde m_0 es la masa en reposo del electrón.



Un modelo que describe la atenuación por dispersión viene dado por:

$$\sigma_i = \sigma_{R,i} + \sigma_{C,i} = nZ\sigma_e \quad \text{Con:} \quad \sigma_e = 2\pi r_0^2 \left(\frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left(\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{\ln(1+2\alpha)}{\alpha} \right) + \frac{\ln(1+2\alpha)}{2\alpha} - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right)$$

$$\alpha = h\nu/m_0 c^2$$

(modelo de Klein-Nishina)

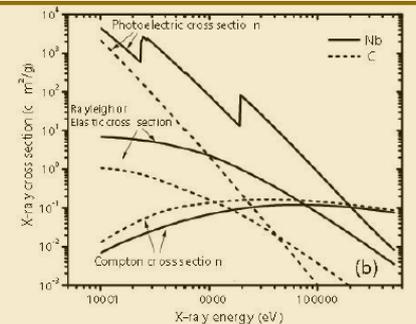
$\sigma_{R,i}$ y $\sigma_{C,i}$ denotan la sección eficaz de dispersión Rayleigh y Compton, para el elemento "i", respectivamente.

La absorción de la radiación en la materia es un efecto acumulativo producto de los diferentes tipos de procesos de interacción que se producen y que ocurren simultáneamente. De acuerdo a esto el coeficiente másico de atenuación μ_i puede expresarse, para cada elemento i, como:

$$\mu_L = \sum_i \mu_{Li}$$

$$\mu_{Li} = \tau_i + \sigma_i + \kappa_i$$

τ_i es la sección eficaz de absorción fotoeléctrica, σ_i el término que tiene en cuenta los efectos de dispersión y κ_i la contribución correspondiente a la formación de pares. Todos estos términos dependen de la energía del fotón incidente.



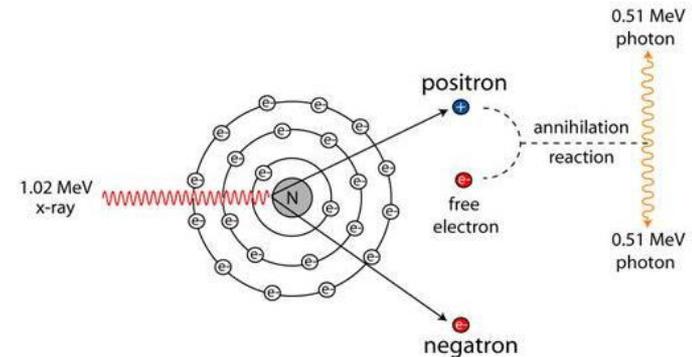
Coeficiente de absorción

Atenuación por creación de pares:

El modelo que describe la atenuación por creación de pares es independiente de la energía. Basta con que el fotón transporte una energía igual a 1022KeV (energía en reposo de un electrón más un positrón):

Un modelo que describe la atenuación por dispersión viene dado por:

$$\kappa_i = B \frac{Z_i^2}{137}$$

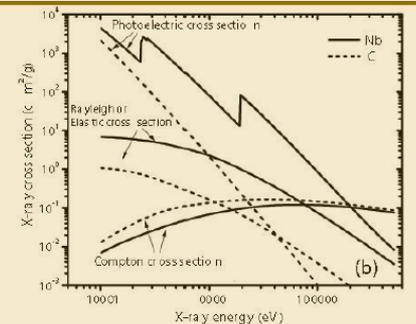


La absorción de la radiación en la materia es un efecto acumulativo producto de los diferentes tipos de procesos de interacción que se producen y que ocurren simultáneamente. De acuerdo a esto el coeficiente másico de atenuación μ_i puede expresarse, para cada elemento i , como:

$$\mu_L = \sum_i \mu_{Li}$$

$$\mu_{Li} = \tau_i + \sigma_i + \kappa_i$$

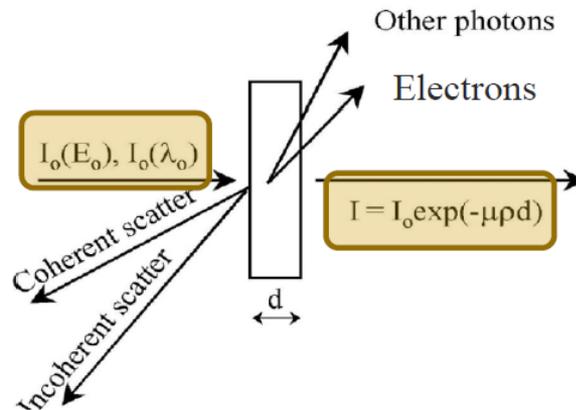
τ_i es la sección eficaz de absorción fotoeléctrica, σ_i el término que tiene en cuenta los efectos de dispersión y κ_i la contribución correspondiente a la formación de pares. Todos estos términos dependen de la energía del fotón incidente.



Coeficiente de absorción: resumen

$$I = I_0 e^{-\mu\rho d} = I_0 e^{-\mu_L d}$$

$$\mu_L = \sum_i \mu_{Li}$$



$$\mu_{Li} = \tau_i + \sigma_i + \kappa_i$$

$$\tau_i = A \frac{Z_i^4}{E^3}$$

$$\sigma_i = \sigma_{R,i} + \sigma_{C,i} = nZ\sigma_e$$

$$\kappa_i = B \frac{Z_i^2}{137}$$

$$\sigma_C(E) = 2\pi r_0^2 \left(\frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left(\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{\ln(1+2\alpha)}{\alpha} \right) + \frac{\ln(1+2\alpha)}{2\alpha} - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right)$$

$$\alpha = h\nu/m_0c^2$$

Arreglo experimental

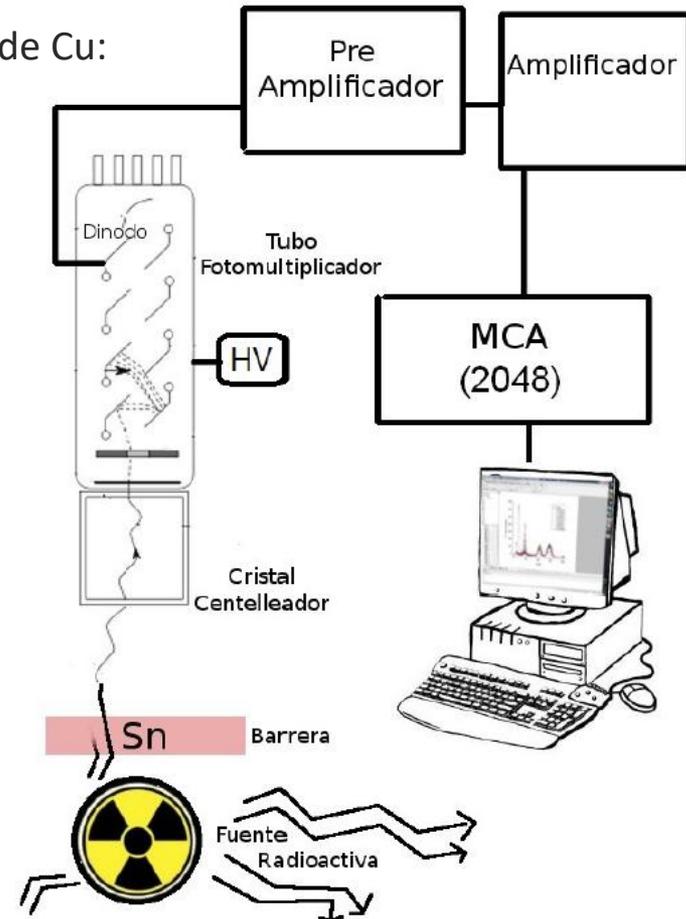
Atenuación de la radiación γ con el espesor de láminas de Cu:

OBJETIVOS y PROCEDIMIENTOS:

Analizar la atenuación de la radiación gama en función del espesor de un blanco de Cu.

Se utilizarán fuentes fijas constituidas por diferentes isótopos radioactivos y se deberá variar el espesor de las láminas de Cu.

Determinar experimentalmente la atenuación y analizar la misma a través de los modelos empíricos propuestos en la teoría



Arreglo experimental

Atenuación de la radiación X para diferentes elementos en función de la energía del fotón incidente:

OBJETIVOS Y PROCEDIMIENTO:

- Determinar la atenuación de la radiación X en función de la energía del fotón incidente para diferentes materiales (Z) para un espesor fijo dado.
- Determinar el valor del coeficiente lineal de absorción para cada elemento analizado
- Discutir los resultados en términos del modelo empírico que describe la dependencia de la absorción fotoeléctrica en función de Z y $h\nu$ (energía del fotón incidente).

Material	Espesor (μm)
Al	410
Au	5
Cu	7,5
Mo	15
Sn	50
Ta	5

