

Fundamentos físicos de los Rayos X

Sistemas e Imágenes Médicas

Máster en Ingeniería Biomédica

Rayos X

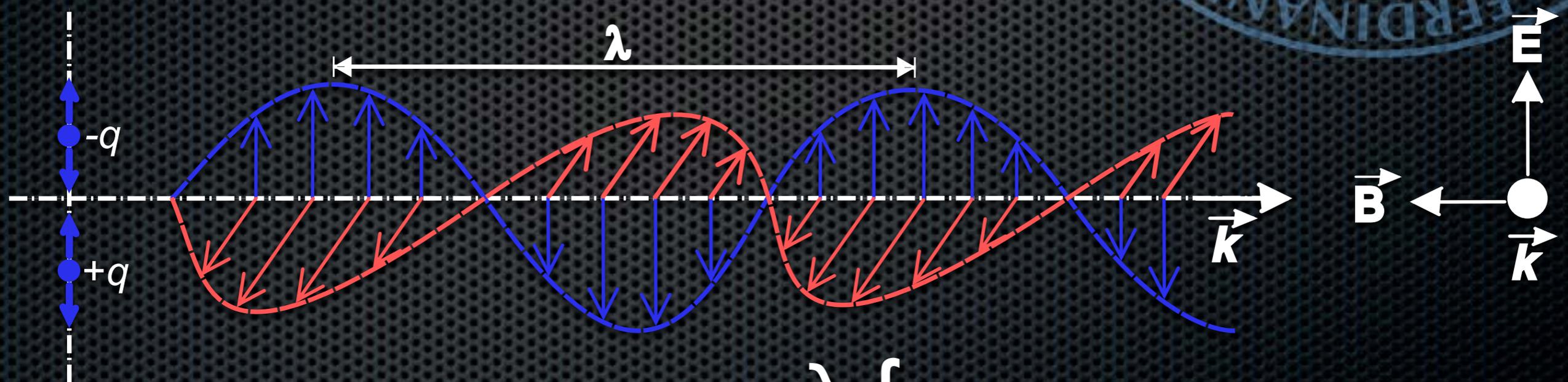
- ✦ Descripción
- ✦ Producción de los Rayos X
- ✦ Interacción de los Rayos X con la materia
- ✦ Dosis y riesgo

Rayos X

- ✦ Los Rayos X son una forma de radiación electromagnética ionizante.
- ✦ La radiación electromagnética tiene comportamientos a la vez de partícula y de onda.
 - ✦ Como partícula, la radiación EM se representa como un flujo de paquetes o cuántos de energía –llamados fotones– que viajan en línea recta.
 - ✦ Como onda, la radiación EM se representa como dos campos -eléctrico y magnético- transversales que varían sinusoidalmente.

Rayos X

- Las ondas electromagnéticas viajan a una velocidad c con una frecuencia de oscilación f .
 - Cada ciclo de onda atraviesan una distancia λ .

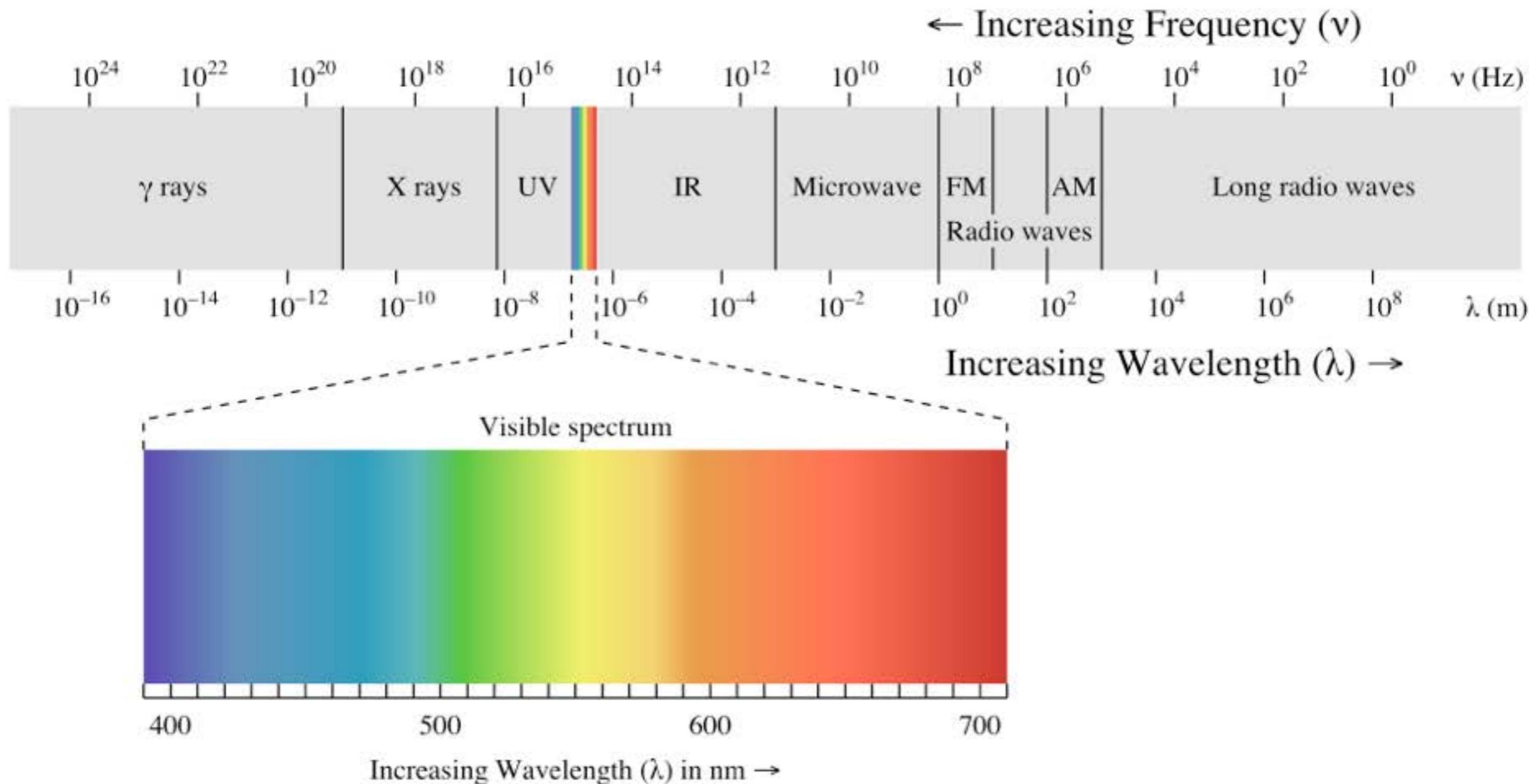


$$c = \lambda \cdot f$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

en el vacío

Rayos X



espectro de radiación electromagnética

Rayos X

- La energía de una onda EM depende de su longitud de onda λ :

$$E = h \cdot f, \quad h = 4.1357 \cdot 10^{-18} \text{ keV} \cdot \text{s} \quad (6.6261 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} / \text{s})$$

- Por ejemplo, un fotón de rayos X de $\lambda = 0.1 \text{ nm}$ tiene una energía de 12,4keV. En cambio, un fotón de luz azul ($\lambda = 400 \text{ nm}$) tiene una energía de unos 3eV.

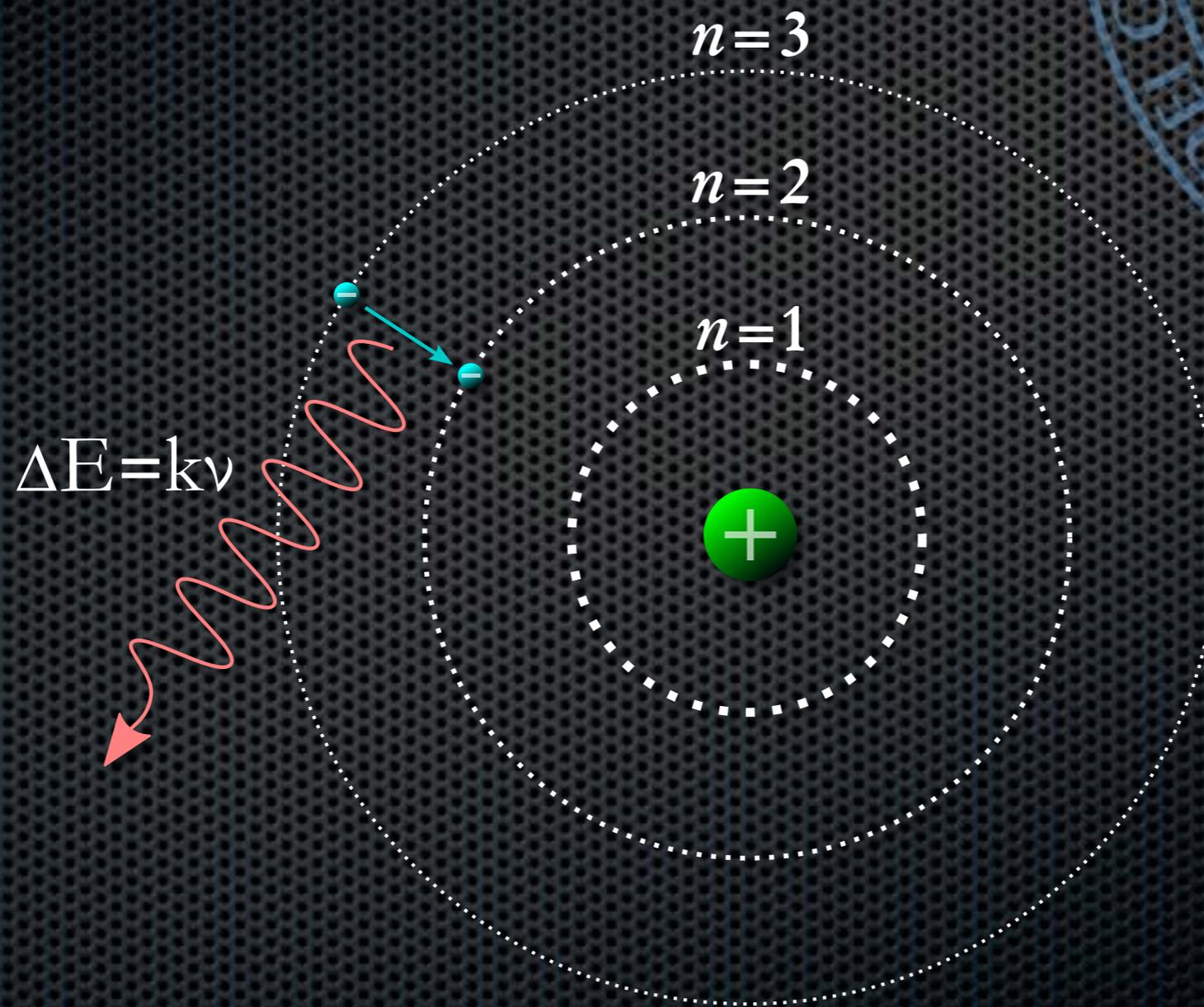
Energía de ionización	
H	12.6 keV
C	9.3 keV
12	30 eV

Estructura del átomo

- ✦ Un átomo está formado por un núcleo atómico rodeado de una nube de electrones.
- ✦ El núcleo está compuesto por protones y neutrones.
 - ✦ El número de protones o **número atómico**, **Z**, determina su elemento químico.
 - ✦ El número de neutrones determina su **isótopo**.
 - ✦ La suma del número de protones y neutrones es el **número másico** del átomo, **A**.
- ✦ Los electrones orbitan alrededor del núcleo atómico.
 - ✦ La fuerza que mantiene unido cada e⁻ al núcleo se denomina energía de enlace (*binding energy*)

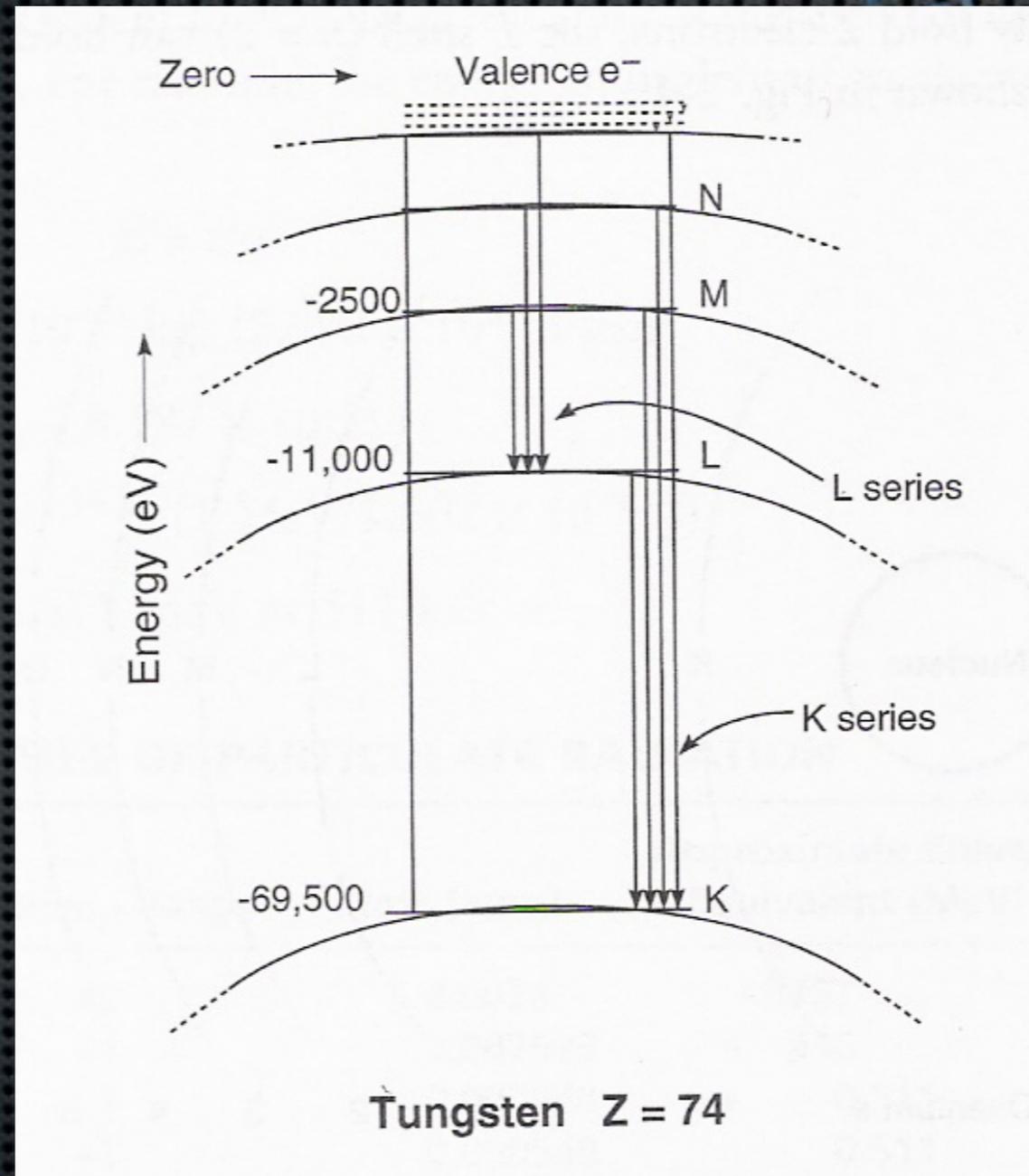
Estructura del átomo

- Modelo de Bohr:



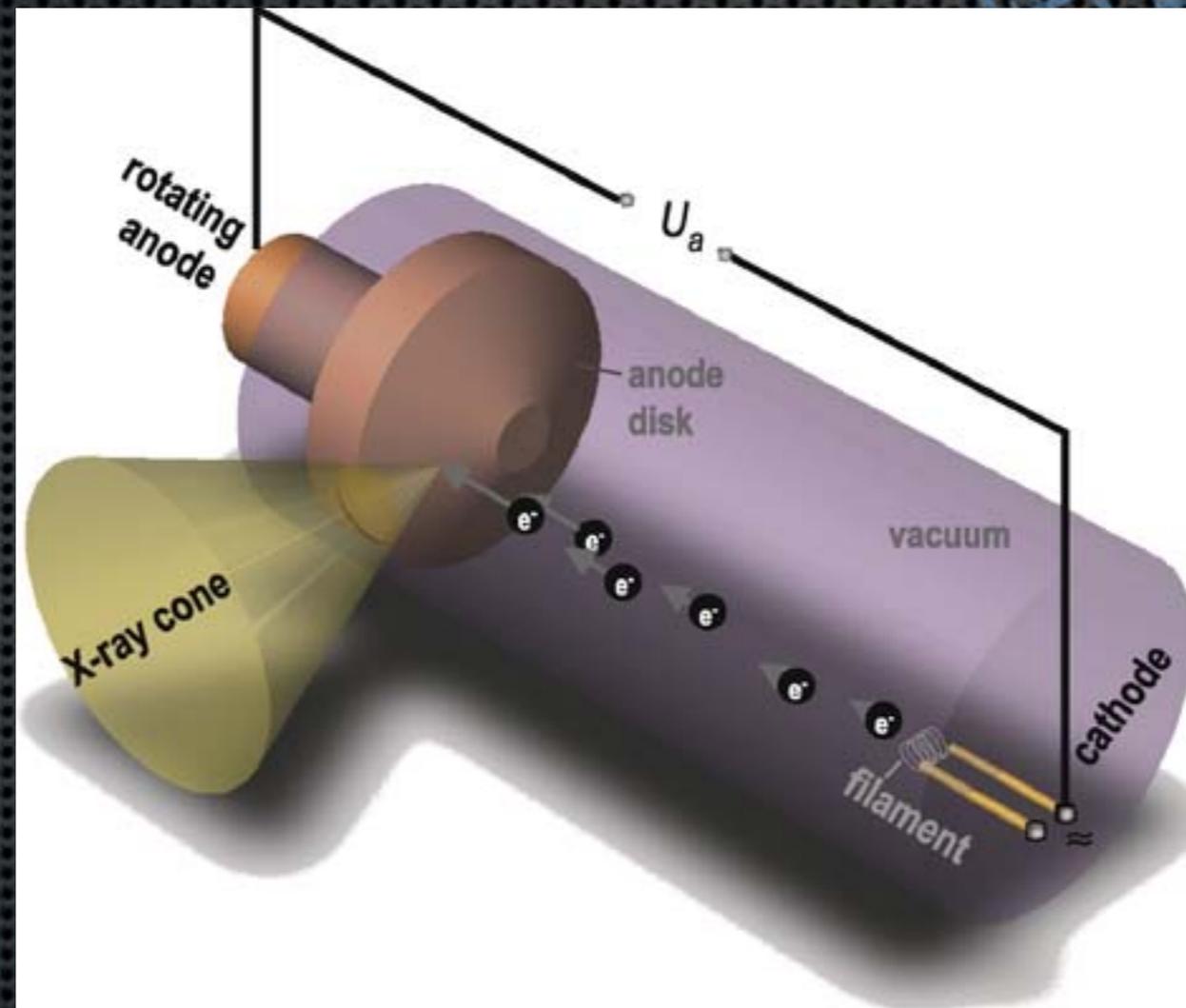
Estructura del átomo

- Capa de electrones:



Producción de rayos X

- Se producen al colisionar partículas cargadas (electrones) con la materia:

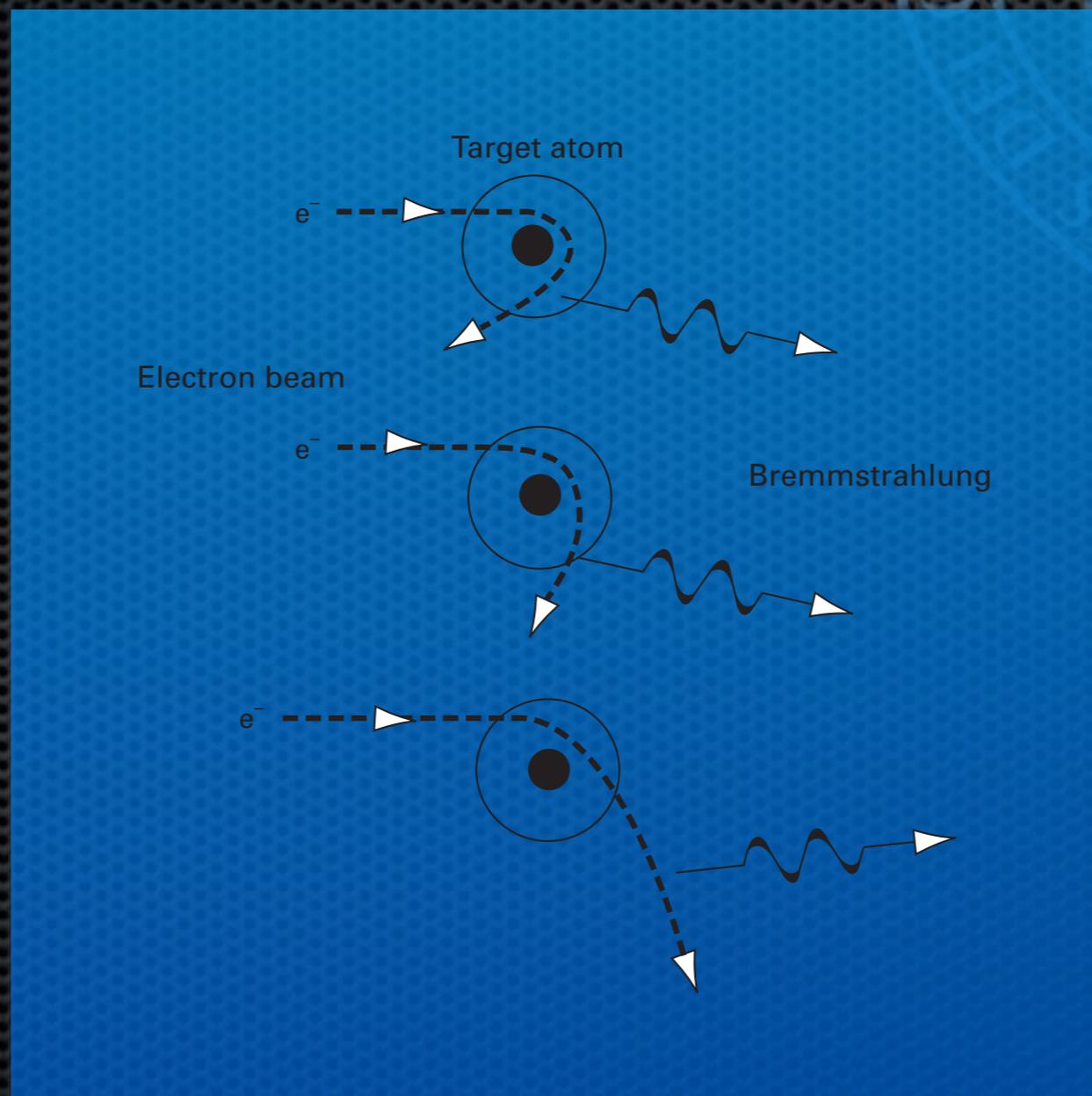


Producción de rayos X

- ✦ Los rayos X se producen al interaccionar los e⁻ con la materia mediante dos mecanismos:
 - ✦ Radiación de frenado (*bremstrahlung*)
 - ✦ Radiación característica

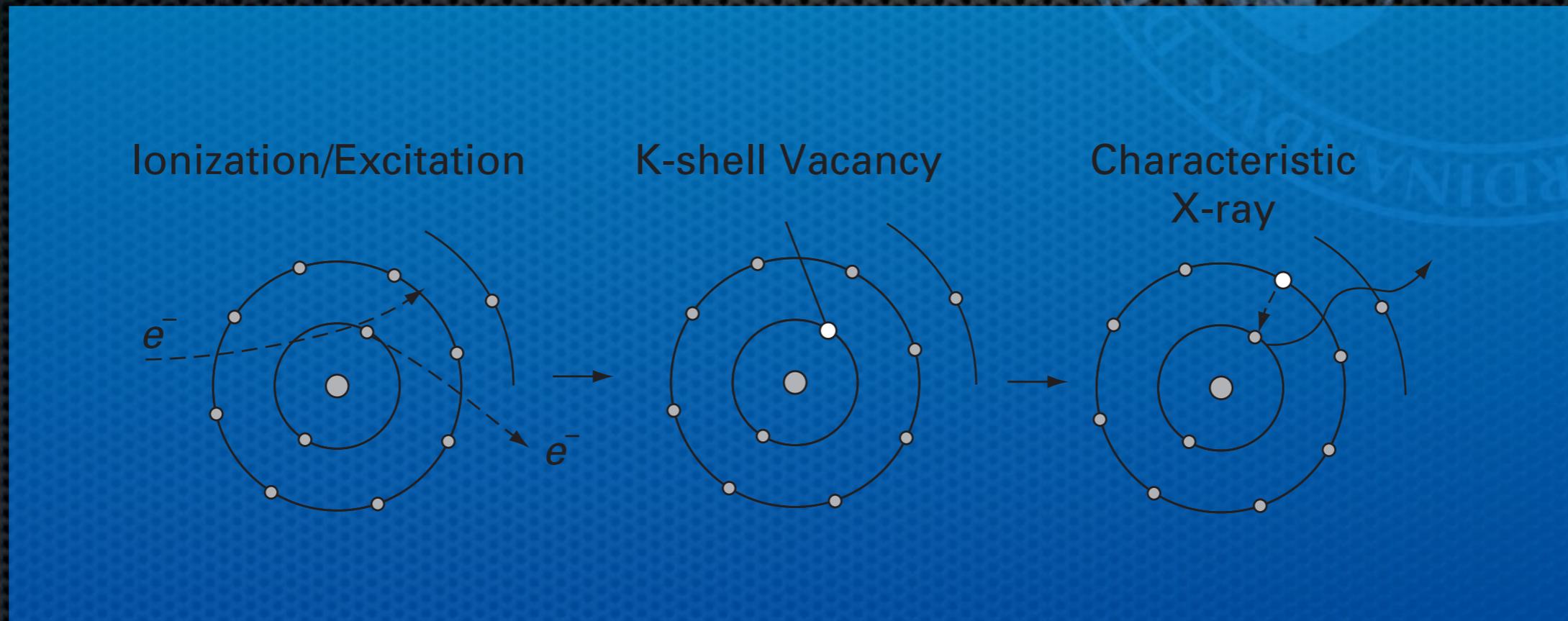
Interacciones de los e^- con la materia

- Radiación de frenado (*bremstrahlung*)



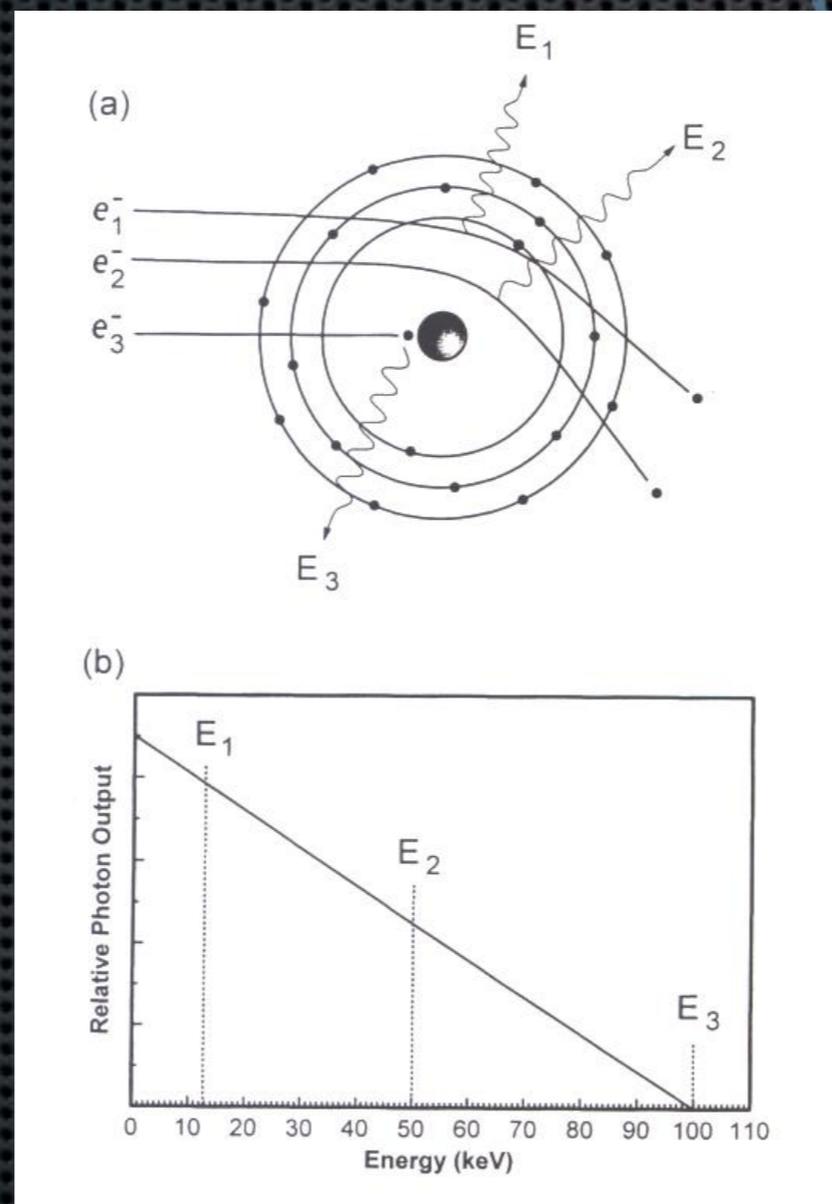
Interacciones de los e^- con la materia

- ✦ Radiación característica



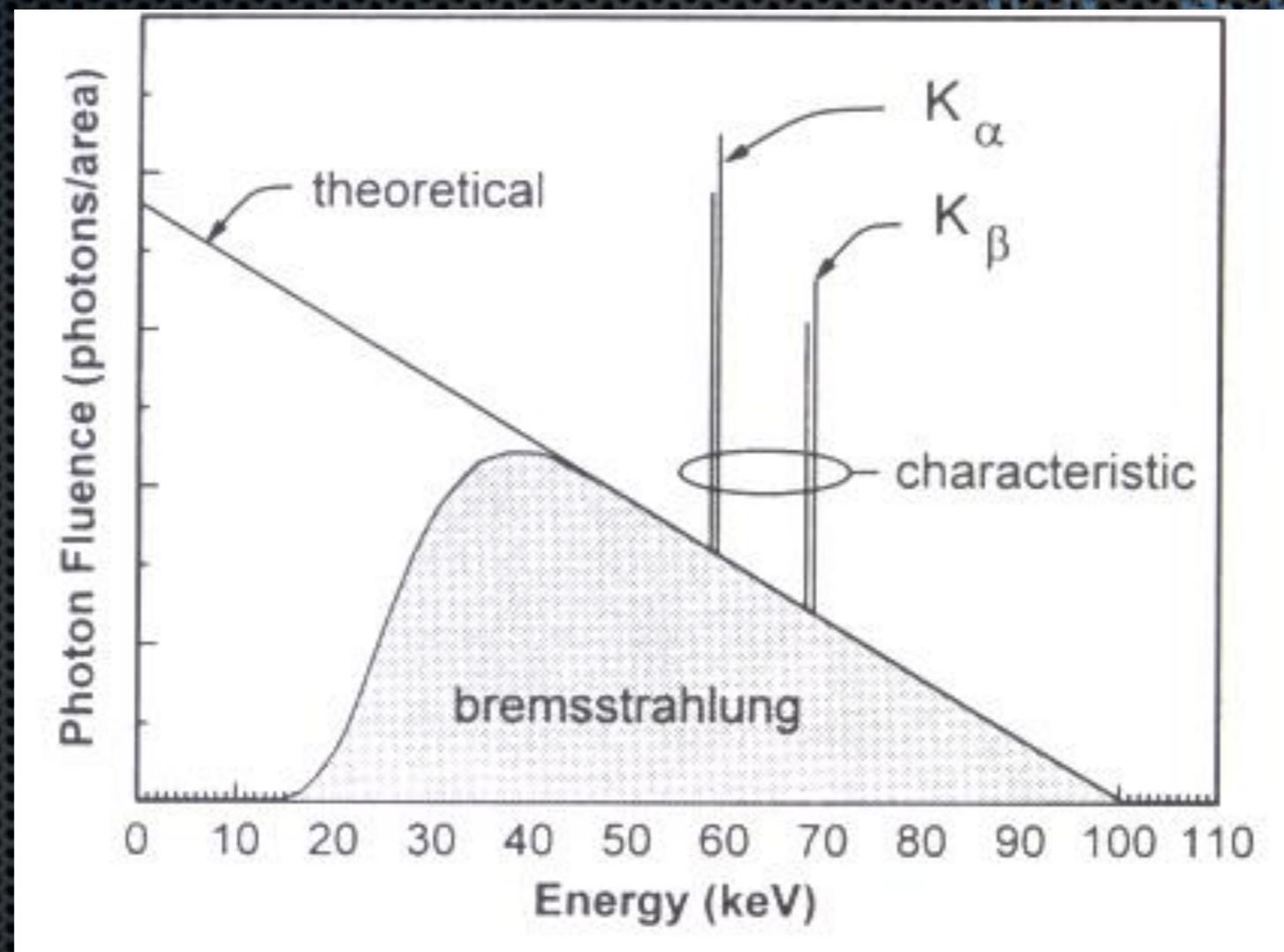
Interacciones de los e^- con la materia

- Espectro de emisión de la radiación de frenado



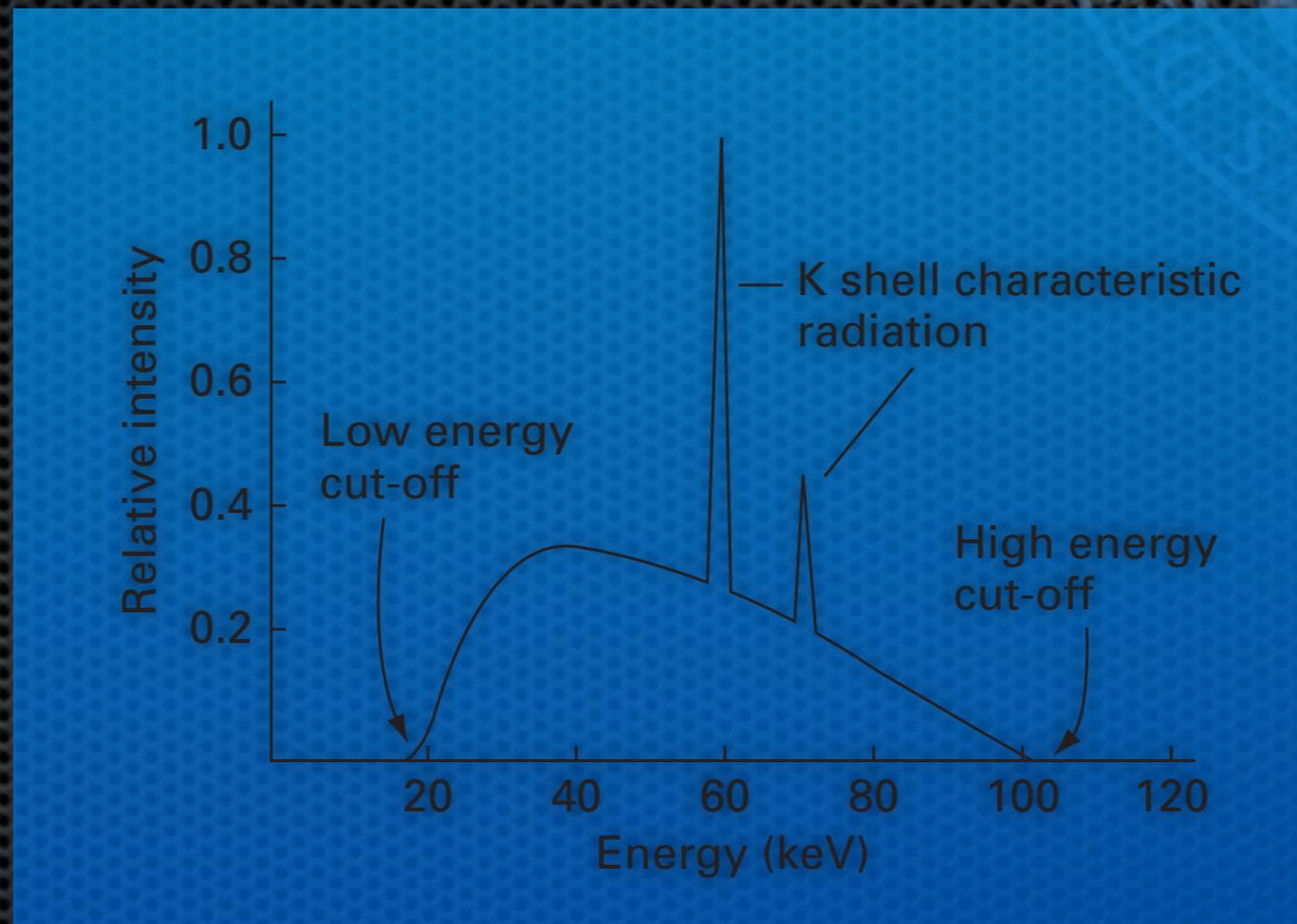
Interacciones de los e^- con la materia

- Espectro de emisión total



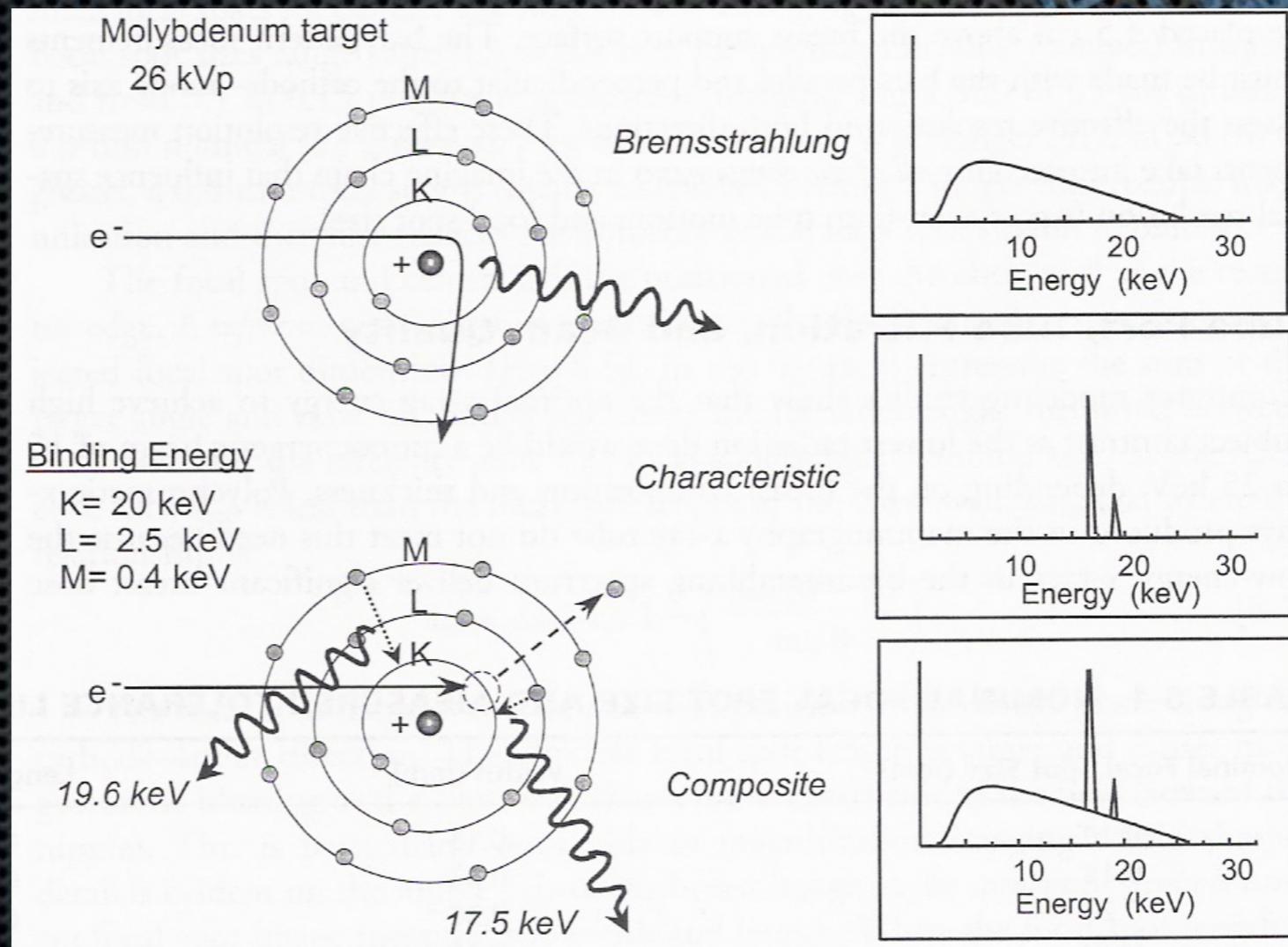
Interacciones de los e^- con la materia

- **Ejemplo:** espectro de emisión de un tubo de Tungsteno excitado a 100 keV



Interacciones de los e^- con la materia

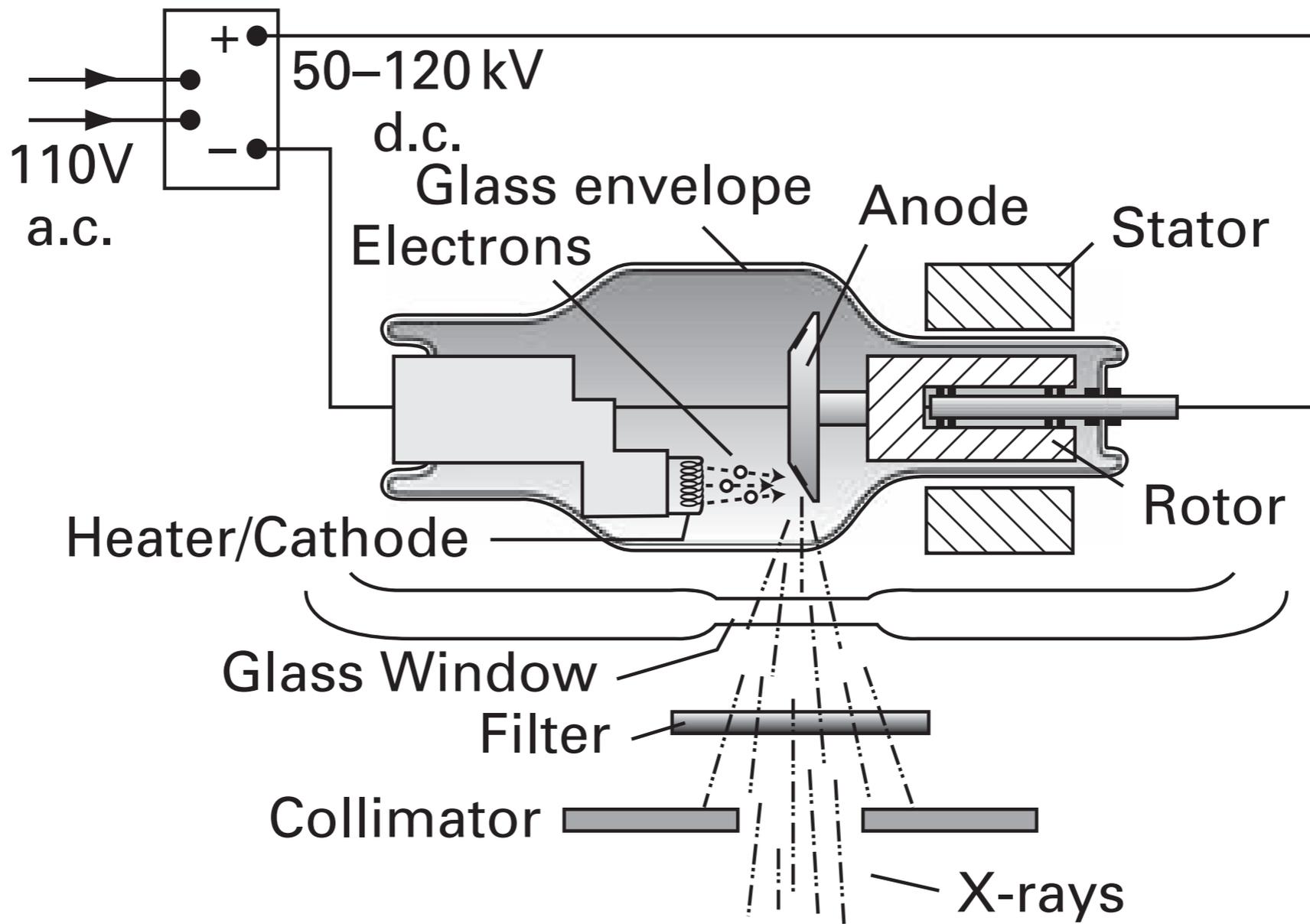
- **Ejemplo:** espectro de emisión de un tubo de Molibdeno (mamografía)



Interacciones de los e^- con la materia

- ✦ Eficiencia de la producción de Rayos X:
 - ✦ Aproximadamente *sólo un 1%* de la E. cinética se convierte en Rayos X.
 - ✦ En el rango de 60-120keV, la intensidad emitida es aproximadamente proporcional a $kV^2 \times mA$.
 - ✦ La radiación de frenado es proporcional a $kV \times Z$.

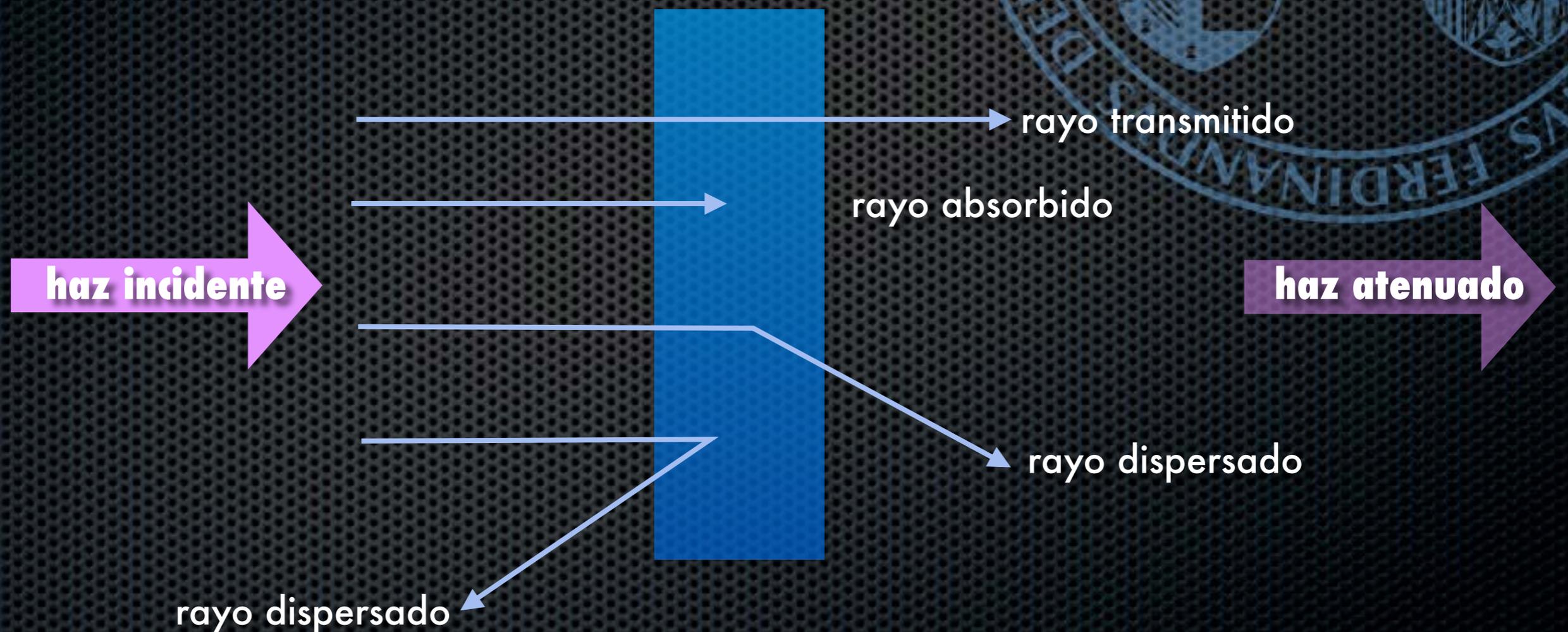
El tubo de rayos X



Interacción de los RX con la materia

- ✦ Cuando un haz de Rayos X atraviesa la materia, a cada fotón le puede ocurrir uno de los siguientes casos:
 - ✦ **Transmisión**: el fotón atraviesa la materia como radiación directa.
 - ✦ **Absorción**: el fotón transfiere toda su energía a la materia y desaparece.
 - ✦ **Dispersión**: el fotón se desvía de dirección, pudiendo perder parte de su energía, y saliendo del material como radiación dispersa (*scattered*) o secundaria.

Interacción de los RX con la materia



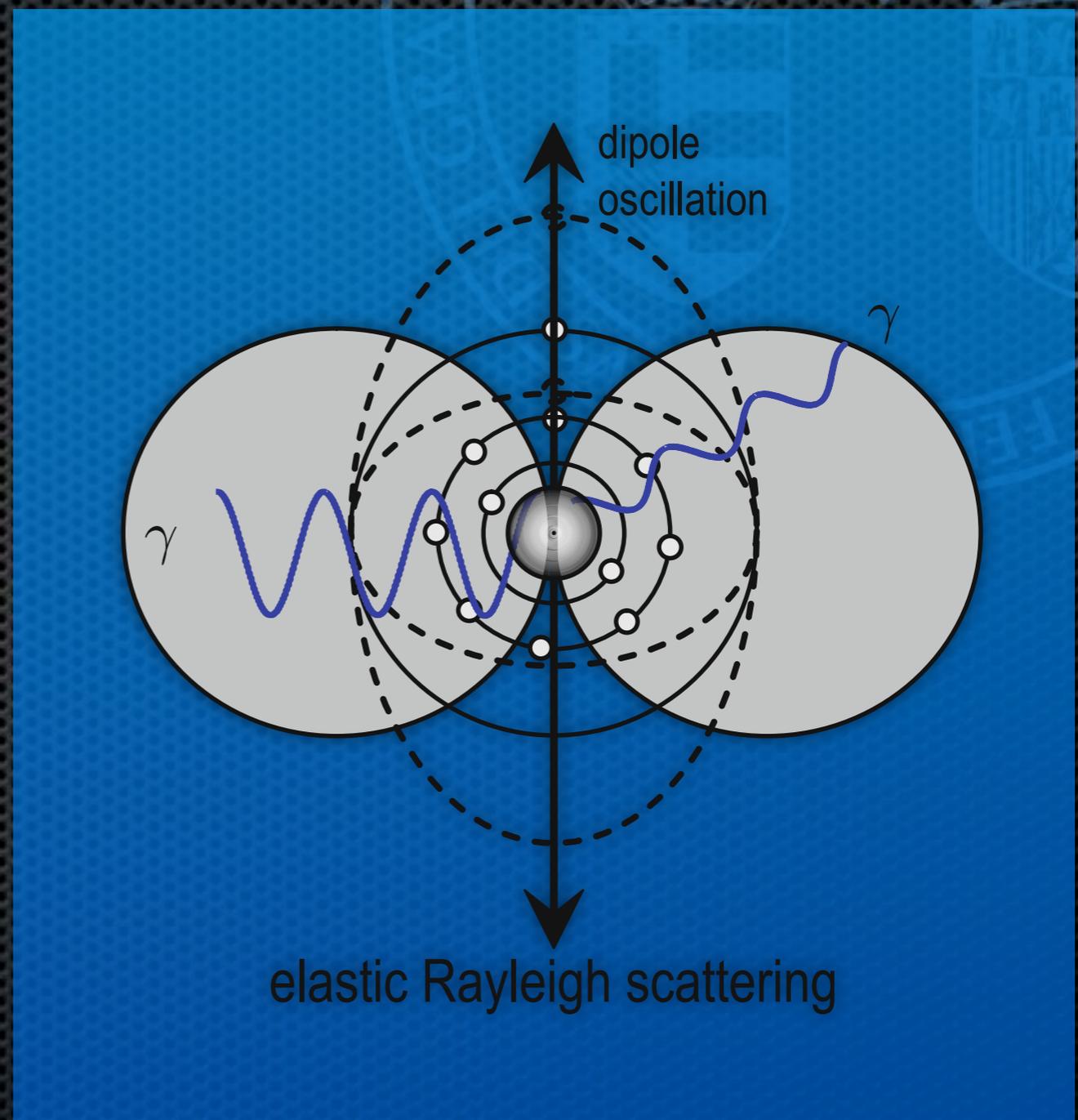
Interacción de los RX con la materia

- ✦ Tipos de interacción de los Rayos X con la materia:
 - ✦ *Dispersión Rayleigh*
 - ✦ *Efecto fotoeléctrico*
 - ✦ *Dispersión Compton*
 - ✦ *Producción de pares*

Interacción de los RX con la materia

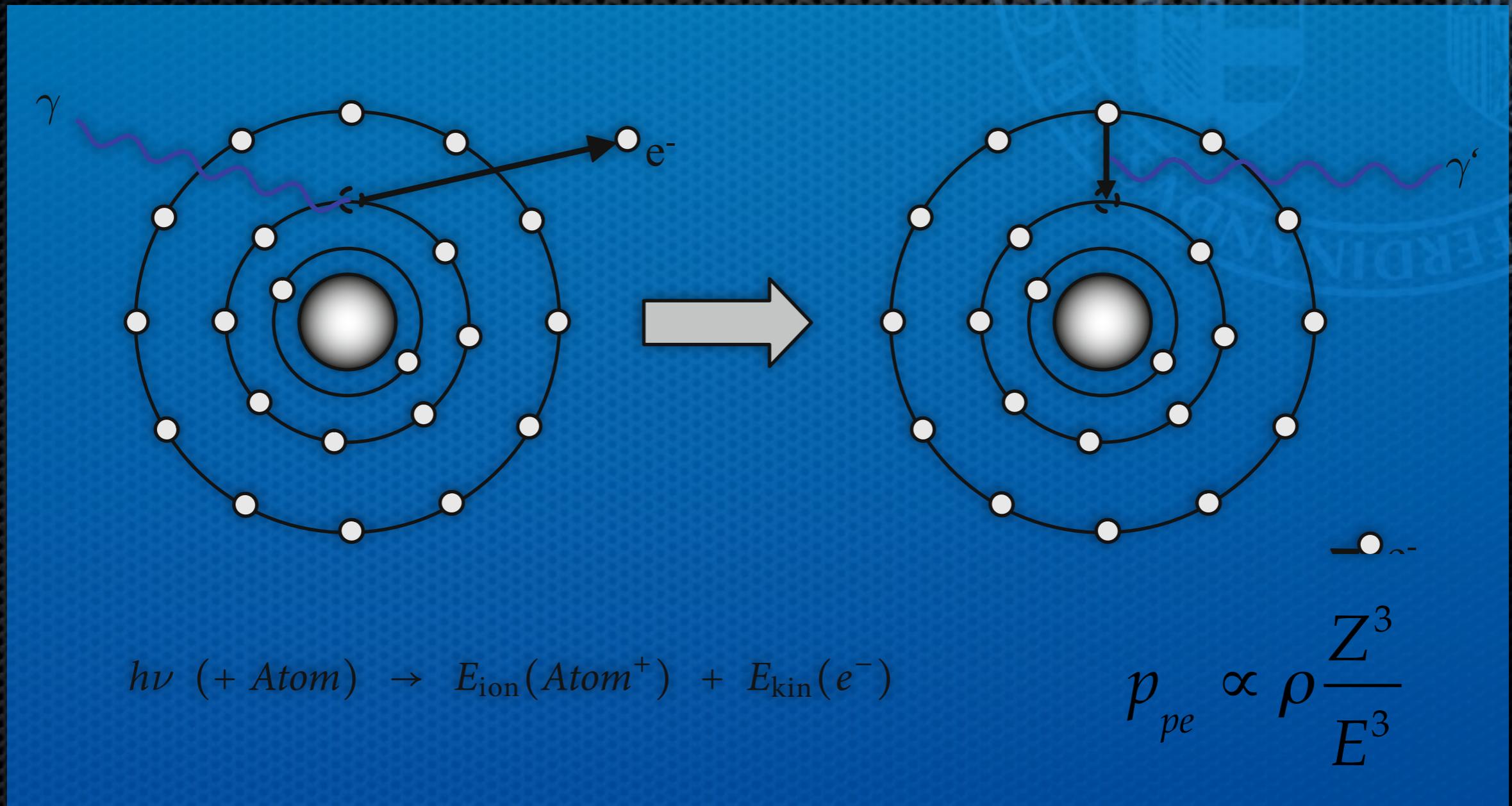
*Dispersión Rayleigh
(coherente)*

$$p_{\text{coherent}} \propto \frac{Z_{\text{eff}}^{8/3}}{E^2}$$



Interacción de los RX con la materia

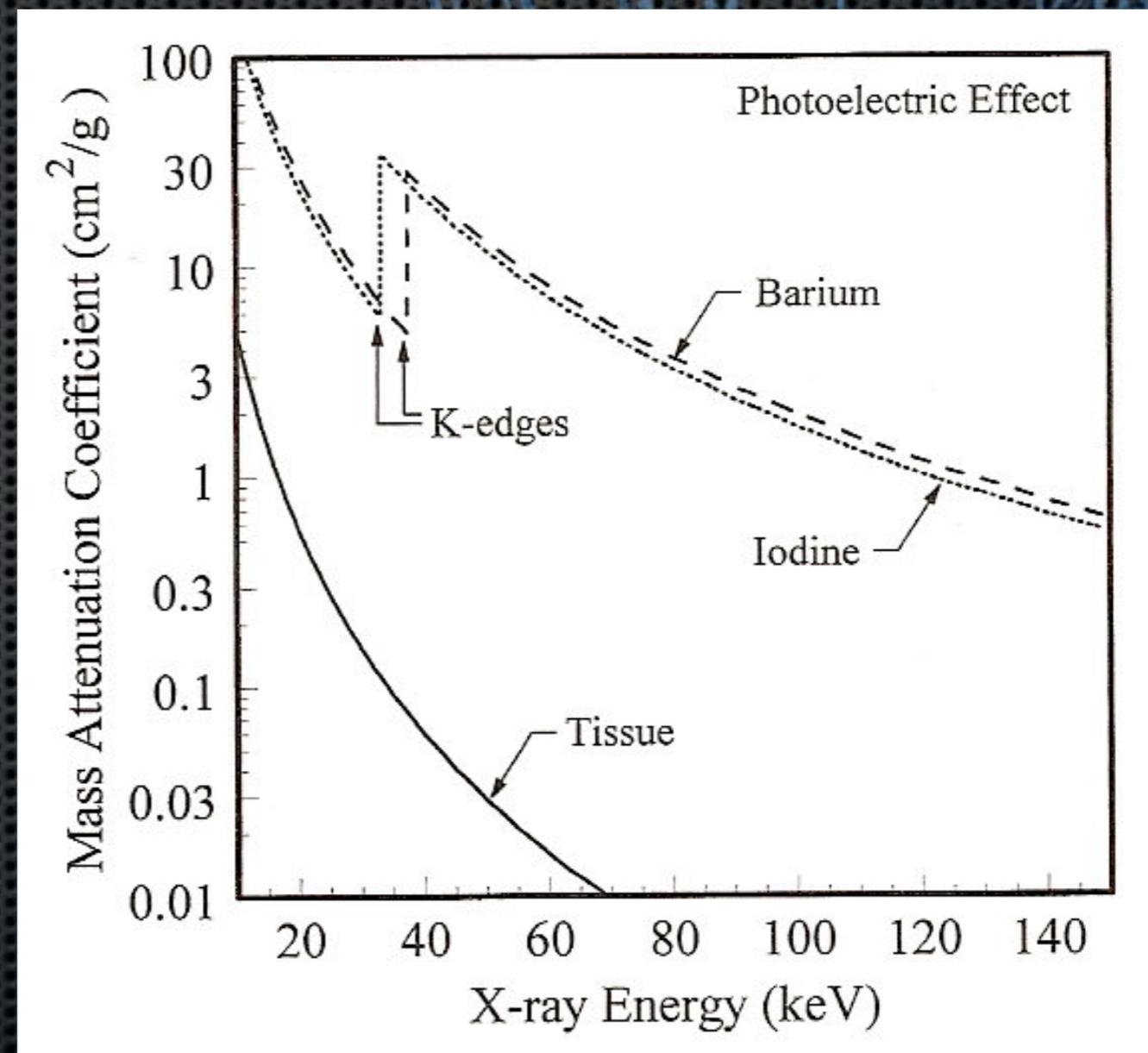
Efecto fotoeléctrico



Interacción de los RX con la materia

Efecto fotoeléctrico

Coefficiente de atenuación debido al efecto fotoeléctrico en función de la energía del haz



Interacción de los RX con la materia

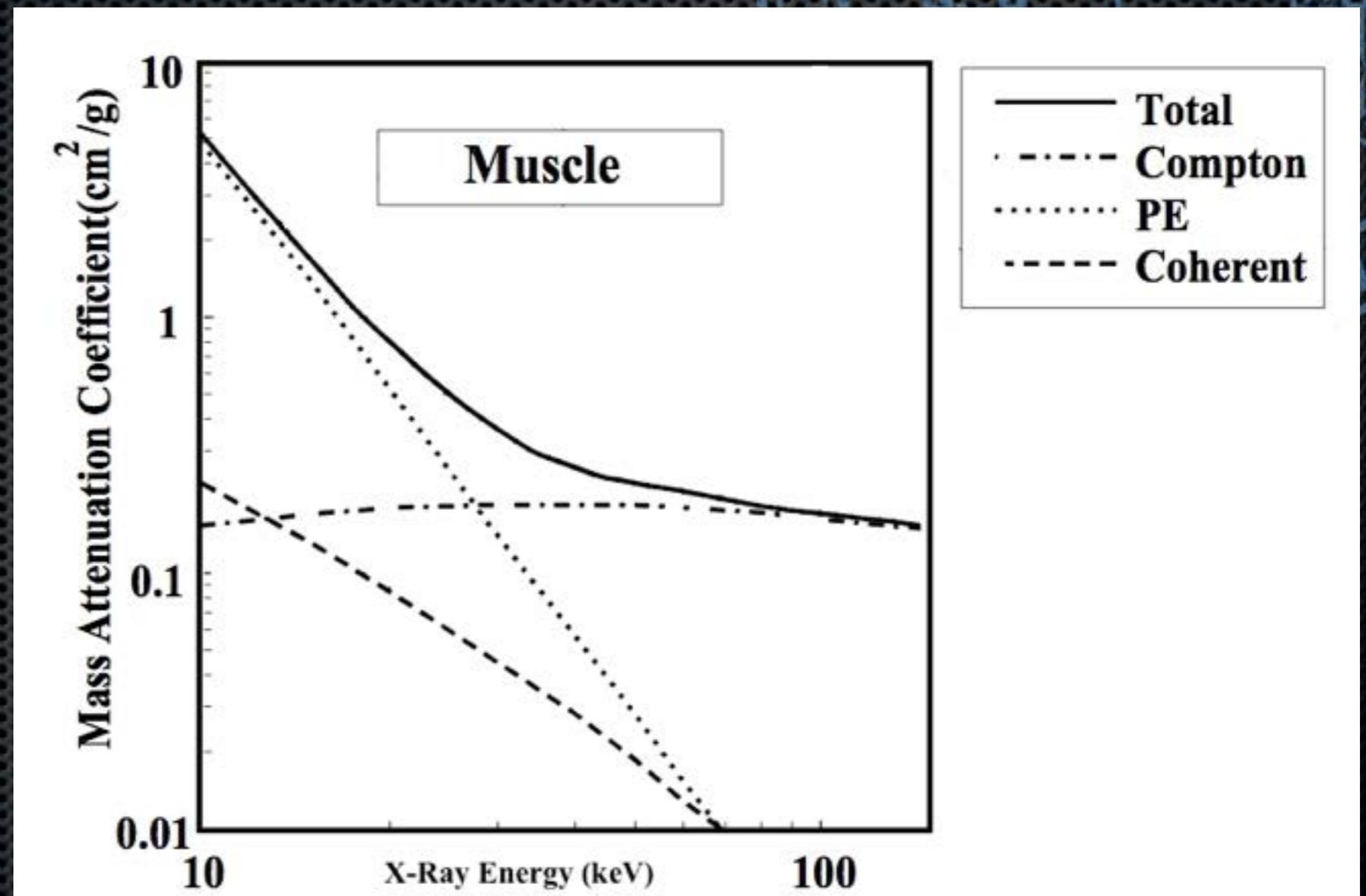
Dispersión o efecto Compton

The diagram illustrates the Compton effect. An incident X-ray photon, represented by a purple wavy line and labeled γ , approaches an atom from the left. The atom is depicted with a central nucleus and several concentric electron shells. An electron, labeled e^- , is shown being ejected from the atom. The scattered photon, labeled γ' , is shown as a purple wavy line moving away from the atom at an angle ϑ relative to the original direction. The angle ϑ is indicated by a dashed line and an arc. The text "X-ray fluorescence" is written above the atom, and "inelastic Compton scattering" is written below it.

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\vartheta)) .$$
$$p_c \propto \frac{\rho}{E}$$

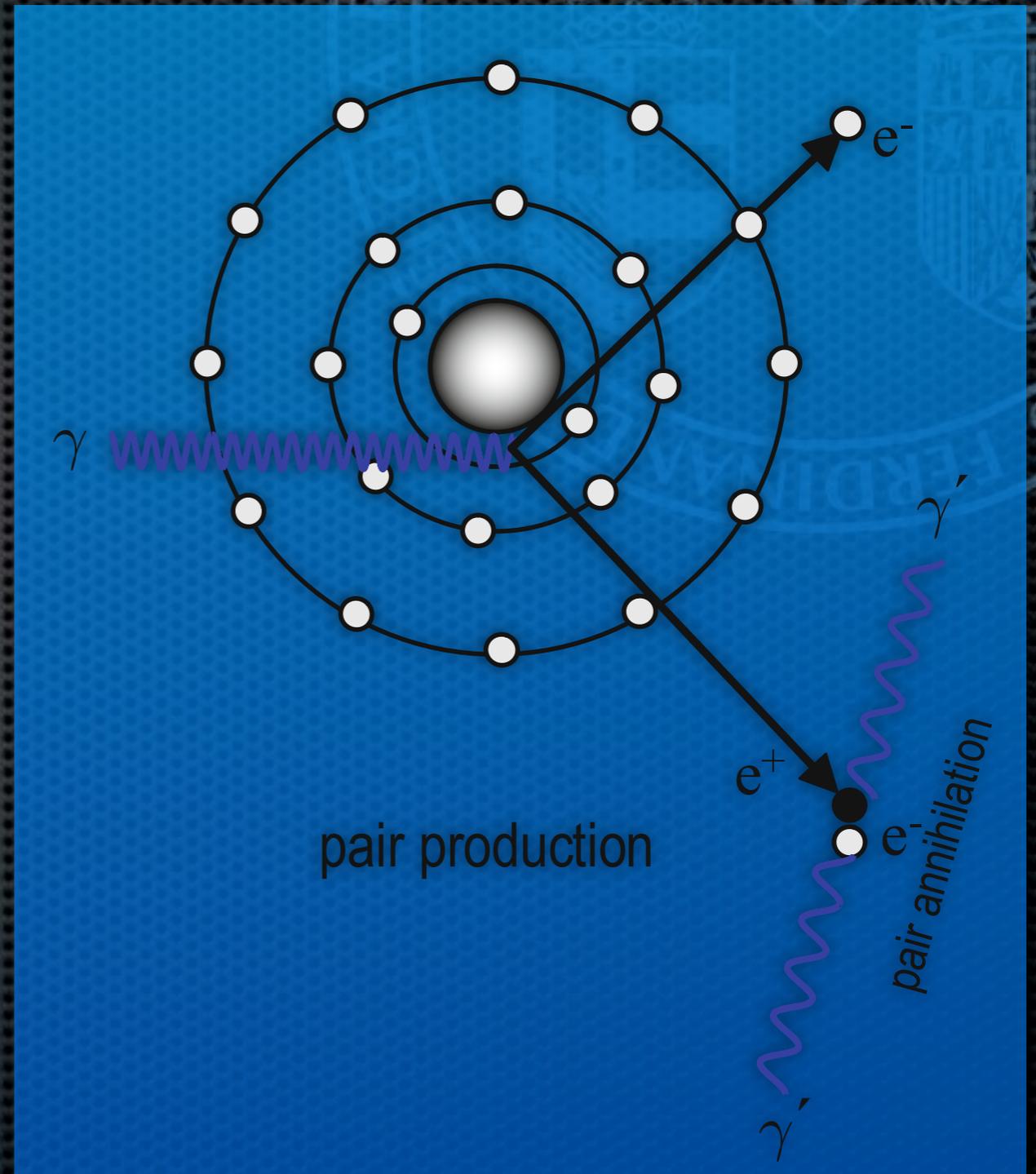
Interacción de los RX con la materia

Dispersión o efecto Compton



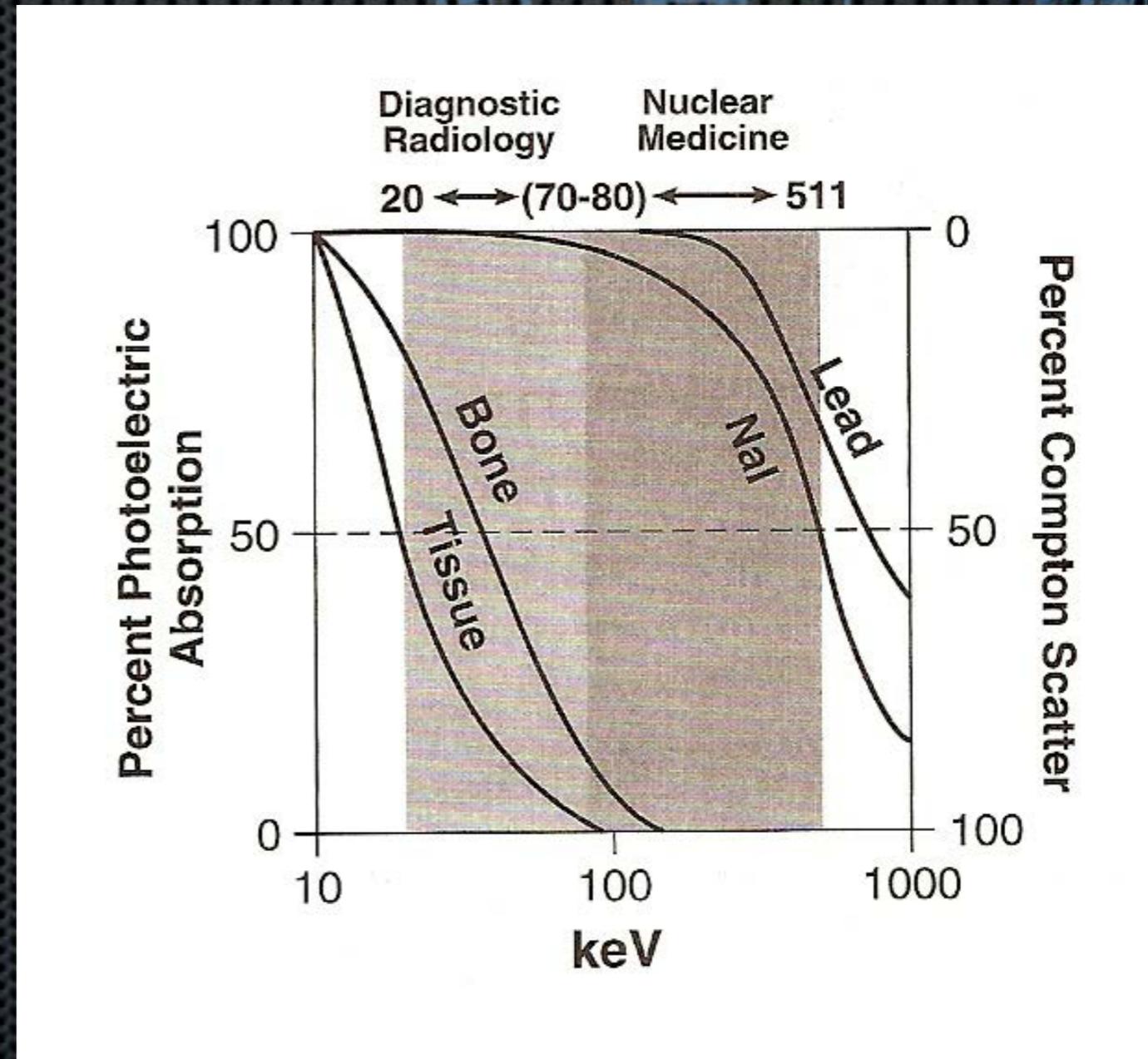
Interacción de los RX con la materia

Producción de pares

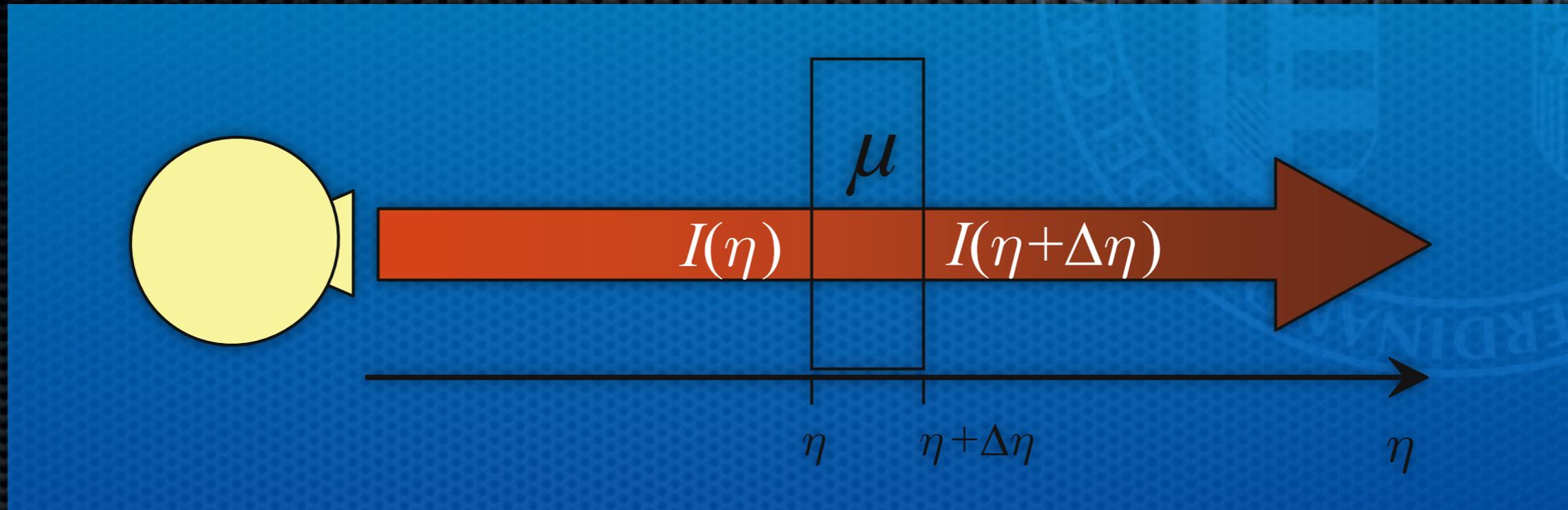


Interacción de los RX con la materia

Porcentaje de absorción debido a efecto fotoeléctrico frente a Compton en función de la energía del haz para distintos materiales



Transmisión de los rayos X



$$\frac{dI}{I(\eta)} = -\mu d\eta$$

μ : coeficiente de atenuación lineal (1/cm)

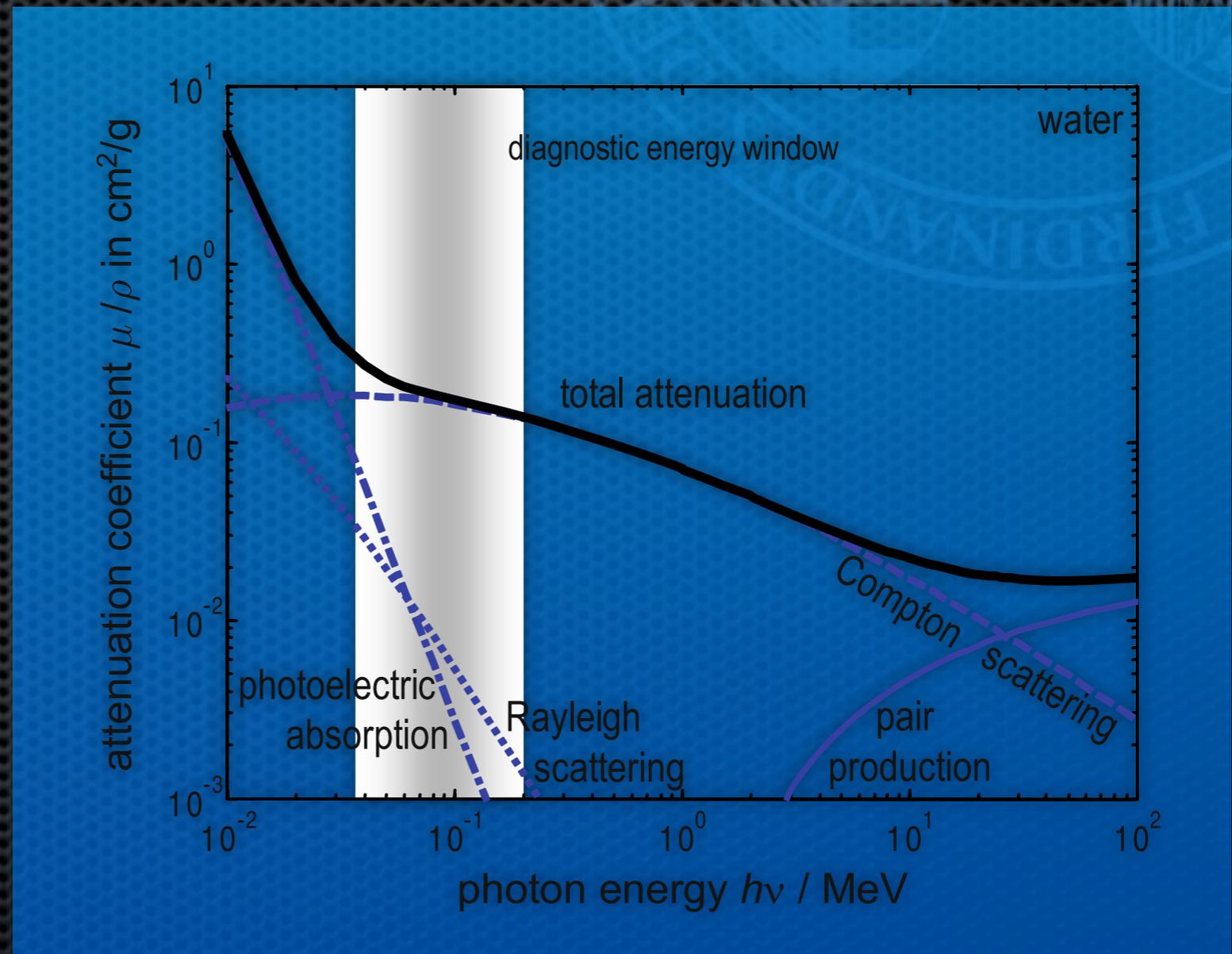
$$I(\eta) = I_0 e^{-\mu\eta}$$

Transmisión de los rayos X

- Si se normaliza μ respecto a la densidad del tejido ρ , se obtiene el coeficiente de atenuación másico:

$$\kappa = \mu / \rho$$

coef. de atenuación másico
para el agua



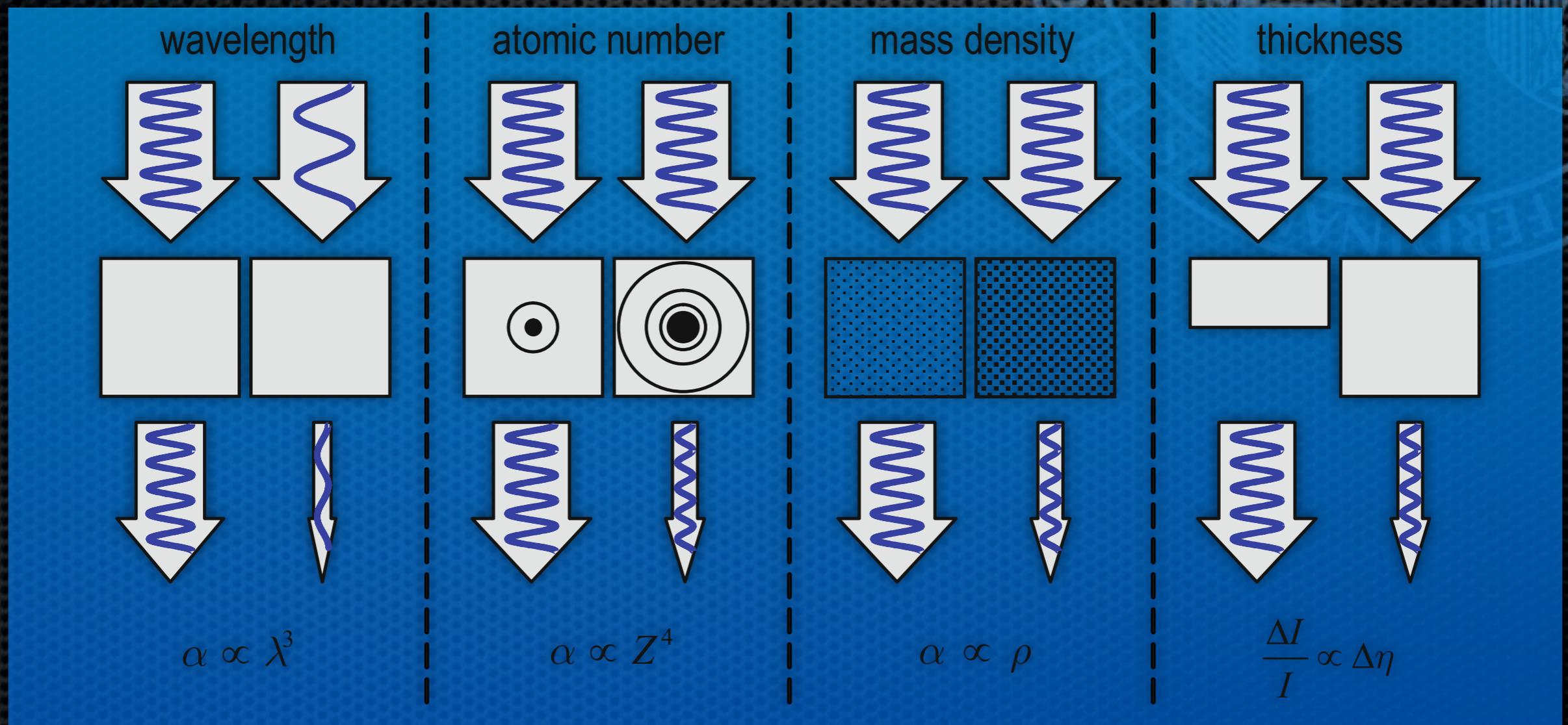
Transmisión de los rayos X

- La atenuación de los rayos X también se puede caracterizar mediante el *half-value layer (HVL)*:
 - *Grosor de tejido que reduce la intensidad del haz de RX a la mitad.*
 - Está relacionado con μ por:

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Transmisión de los rayos X

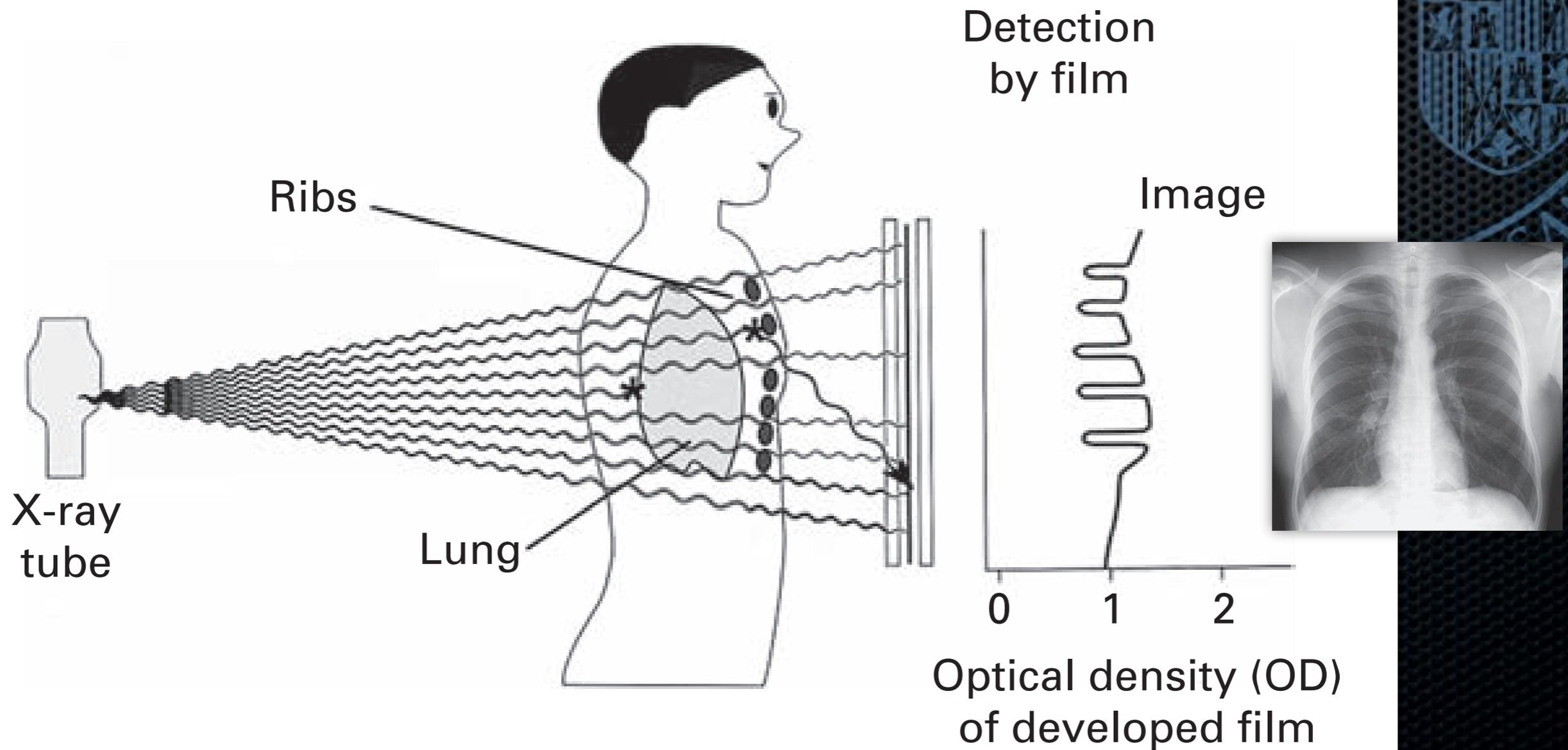
- Dependencias de la atenuación de los RX



Producción de imágenes radiológicas

- ✦ El ojo humano *no detecta* los rayos X.
- ✦ Hay que convertir la distribución de los rayos X transmitidos en una forma “visible” mediante:
 - ✦ Exposición de una **película fotográfica** sensible a los RX.
 - ✦ Estimación de la densidad de fotones midiendo la ionización de una **cámara de gas**.
 - ✦ Conversión de los fotones de RX **en luz visible**.
 - ✦ Utilización de un **detector de estado sólido** que genere una corriente proporcional a la densidad de fotones incidente.

Producción de imágenes radiológicas



Producción de imágenes radiológicas

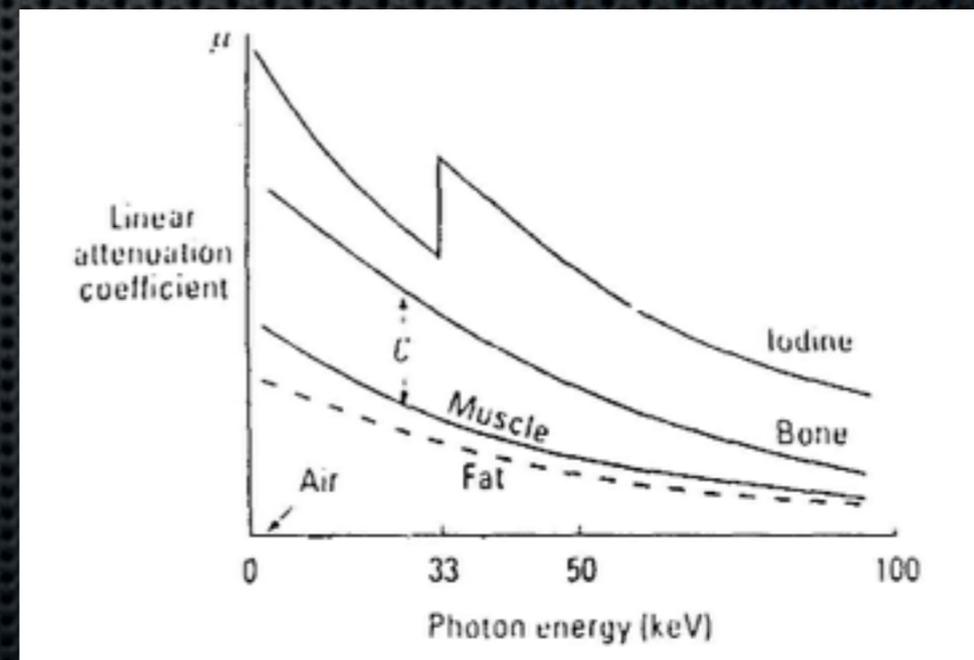
- Mejora del contraste:

- para baja energía (kV pequeño):

Domina efecto fotoeléctrico \Rightarrow contraste proporcional a la diferencia entre Z

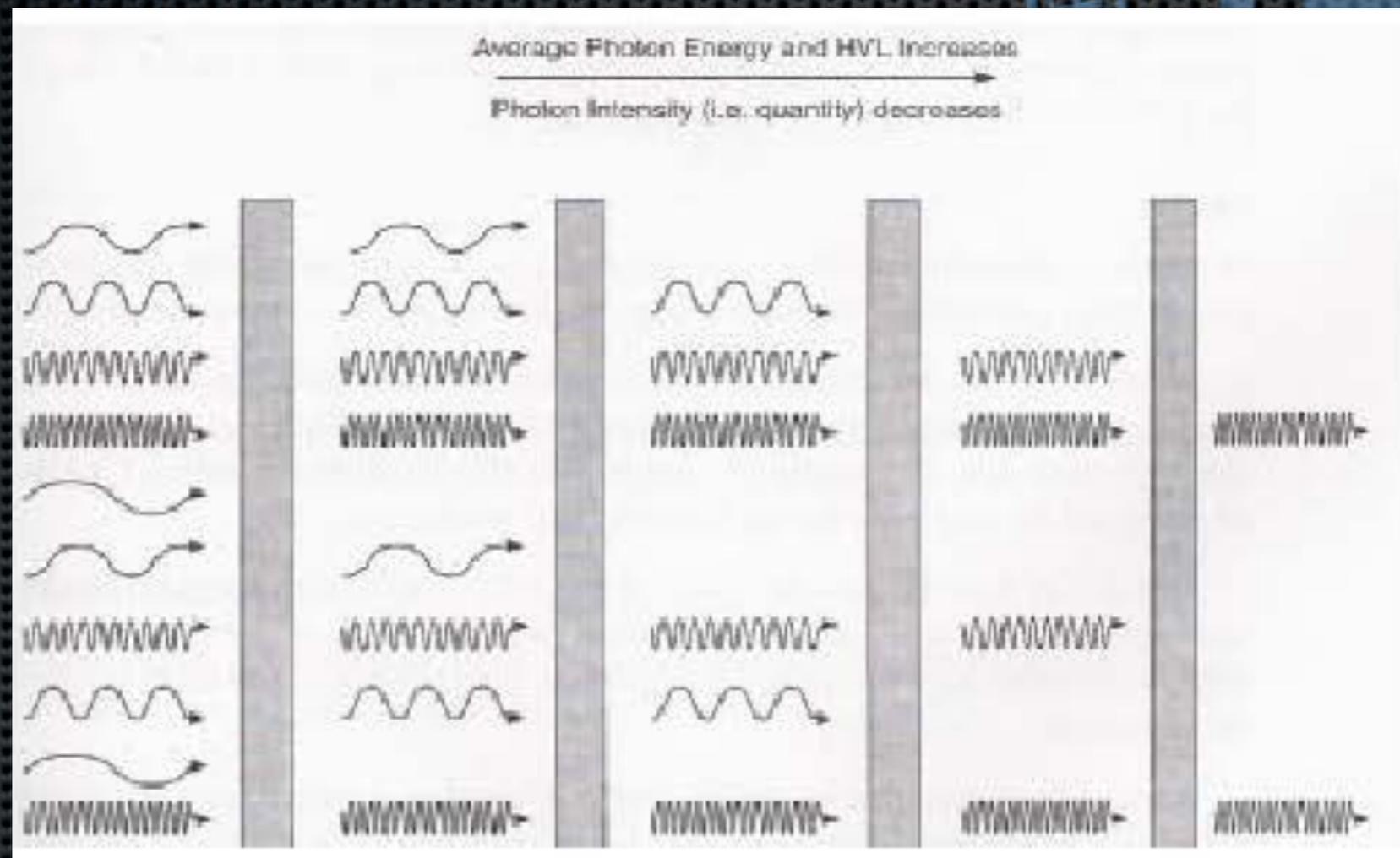
- para alta energía (kV grande):

Domina dispersión Compton \Rightarrow contraste proporcional a la diferencia entre ρ



Producción de imágenes radiológicas

- Endurecimiento del haz de RX



los rayos X menos energéticos son absorbidos por los tejidos y no aportan información a la imagen

Producción de imágenes radiológicas

- ✦ Energía del haz adecuada:
 - ✦ A bajas energías predomina el **efecto fotoeléctrico**:
 - ✦ mayor contraste entre distintos tejidos (p. ej. hueso/músculo)
 - ✦ mayor absorción del haz (incremento de la dosis)
 - ✦ A altas energías predomina el **efecto Compton**:
 - ✦ menor contraste entre tejidos
 - ✦ mayor dispersión (emborronamiento de la imagen)

No hay un valor óptimo, hay que llegar a un compromiso en función del grosor a observar

Dosis y riesgo

Imágenes por rayos X

Exposición radiológica

- ✦ La **exposición** es la magnitud física que caracteriza el efecto de las radiaciones ionizantes.
- ✦ Se mide como la cantidad de carga eléctrica que produce un haz en una unidad de masa de aire seco en condiciones estándar de presión y temperatura (1 atm y 20°C).
- ✦ Unidades:
 - ✦ **roentgens** [R] (unidad tradicional)
 - ✦ [**C·Kg⁻¹**] (unidad del S.I.)

$$1 \text{ R} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{Kg}^{-1}$$

Dosis de radiación

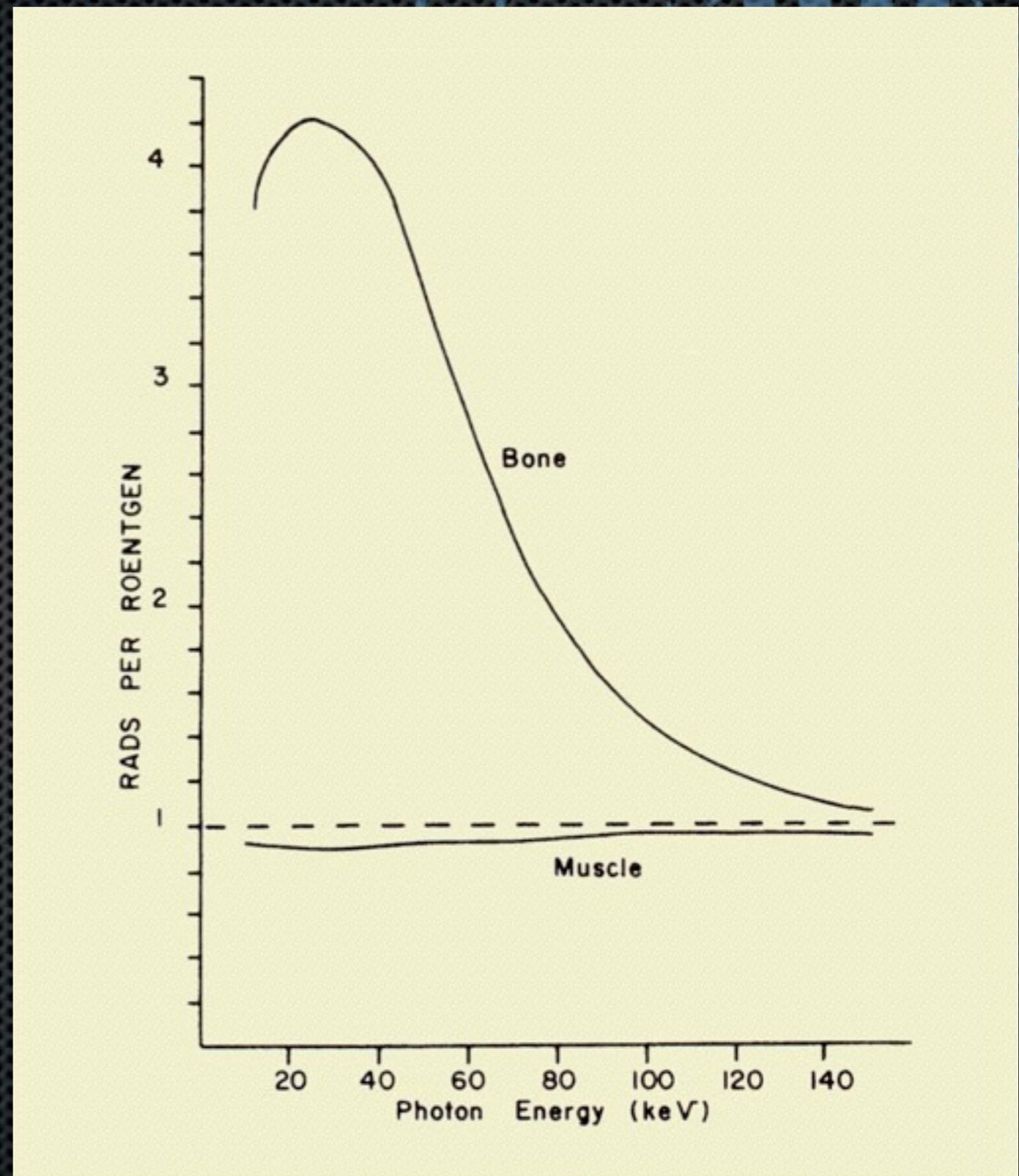
- ✦ La **dosis** absorbida mide la cantidad de radiación ionizante recibida por un material.
- ✦ Se mide como la energía depositada en un medio por unidad de masa.
- ✦ Unidades:
 - ✦ **gray** [Gy] (unidad del S.I.)
 $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ de material
 - ✦ **rad** (*radiation absorbed dose*, unidad tradicional)
 $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$

Kerma

- ✦ El **kerma** (*Kinetic Energy Released per unit MAass*) mide la energía transferida por la radiación ionizante a los electrones del material irradiado.
 - ✦ Para radiaciones en el rango del diagnóstico médico (por debajo de 1 MeV), dosis absorbida y kerma son equivalentes.
 - ✦ Su unidad es J/Kg (= Gy, unidad de dosis absorbida)
 - ✦ El **Air kerma** equivale a la dosis absorbida por el aire.

Relación entre exposición y dosis

El ratio, *f-factor*, entre dosis absorbida (rad) y exposición (R) depende del tipo de tejido y la energía de la radiación



Dosis de radiación equivalente

- ✦ La **dosis equivalente** tiene en cuenta el riesgo de daño producido en los tejidos humanos según el tipo de radiación.
- ✦ Este riesgo se calcula multiplicando cada tipo de radiación por una constante específica W_R .
- ✦ Unidades:
 - ✦ **sievert** [Sv] (unidades S.I.)
$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot W_R$$
 - ✦ **rem** (unidades tradicionales)
$$1 \text{ rem} = 0.01 \text{ Sv}$$

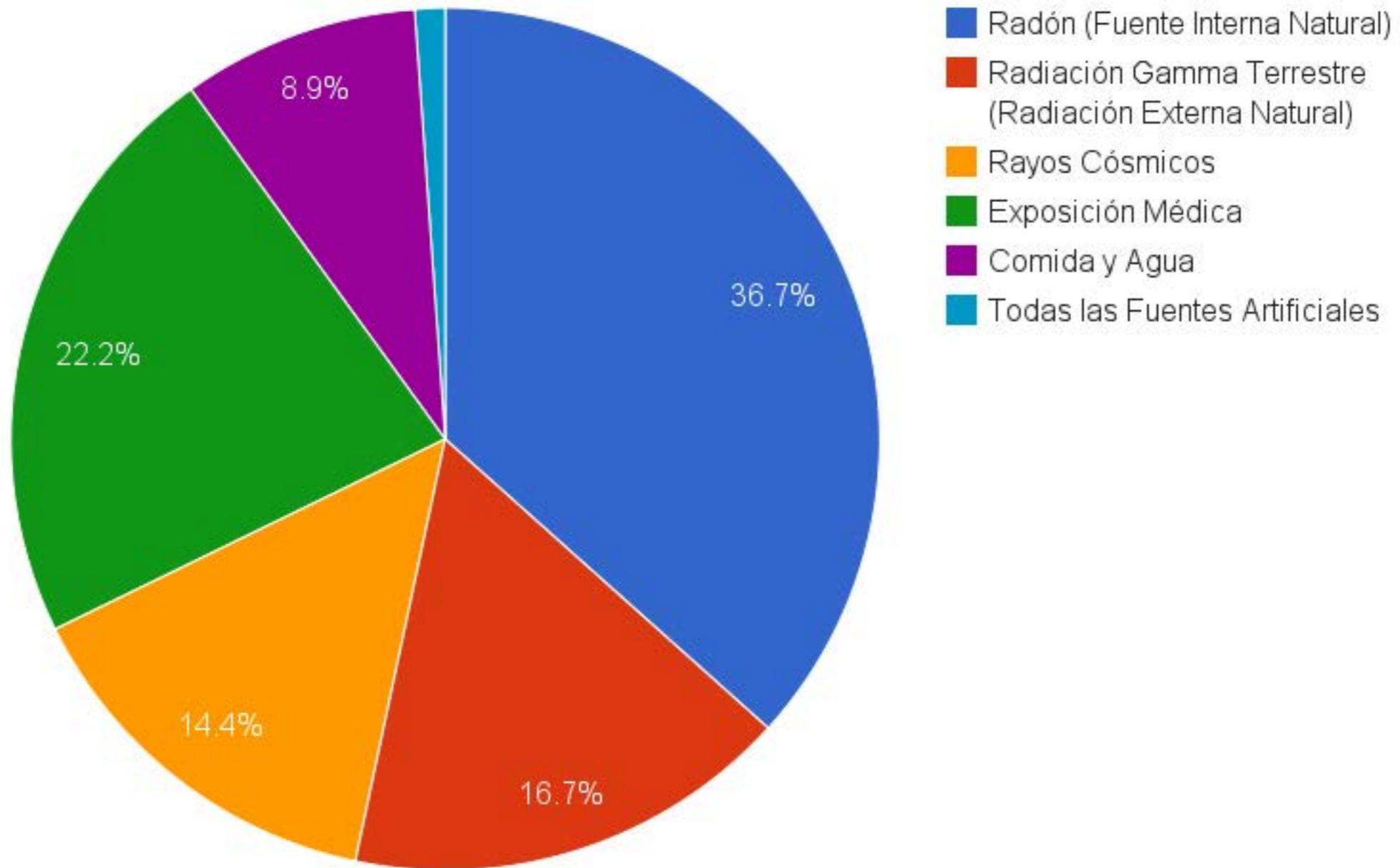
Dosis de radiación equivalente

- La constante o factor de peso de la radiación w_R es:

Radiation type and energy range	Radiation weighting factor w_R
Photons (all energies)	1
Electrons und muons (all energies)	1
Neutrons	
$E < 10 \text{ keV}$	5
$10 \text{ keV} < E \leq 100 \text{ keV}$	10
$100 \text{ keV} < E \leq 2 \text{ MeV}$	20
$2 \text{ MeV} < E \leq 20 \text{ MeV}$	10
$E > 20 \text{ MeV}$	10
Protons (other than recoil protons) $E > 2 \text{ MeV}$	5
α -Particles, fission fragments, heavy nuclei	20

Dosis de radiación

Exposición a las Radiaciones Ionizantes en Humanos



Dosis de radiación

Cosmic radiation	200 μSv (20 mrem) over 1 year
Natural radioactive materials (e.g., ^{238}U)	300 μSv (30 mrem) over 1 year
Naturally occurring radioactive materials in the body (e.g., ^{40}K)	300 μSv (30 mrem) over 1 year
Chest X-ray	500 μSv (50 mrem) skin dose for one X-ray
Coronary angiogram	20 mSv (2 rem) skin dose for one procedure
Nuclear power station	< 1mSv (100 mrem) over 1 year 1 km from the station

dosis de radiación promedio para algunas situaciones tipo

Dosis de radiación

Table 3.4 Typical effective dose equivalents for various diagnostic procedures.

Examination	Range (μSv)
Dental x-ray	10–20
Chest	10–50
Skull	100–200
Pelvis	700–1400
Abdomen	600–1700
Mammogram (each image)	1000–2000
Lumbar Spine	1300–2700
Barium meal	1900–4800
IVU (intra-venous urography)	2500–5100
Head CT scan	2000–4000
Body CT scan	5000–15 000
Nuclear medicine	2000–10 000

dosis de radiación promedio para algunas exploraciones médicas