

Material de entrenamiento del OIEA sobre Protección Radiológica en radiodiagnóstico y en radiología intervencionista

PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN RADIODIAGNÓSTICO Y EN RADIOLOGÍA INTERVENCIONISTA

L 5: Interacción de la radiación con la materia



IAEA

International Atomic Energy Agency

Temas

- Introducción a la estructura atómica básica
- Magnitudes y unidades
- Producción de Bremsstrahlung
- Rayos X característicos
- Ionización primaria y secundaria
- Efecto fotoeléctrico y dispersión Compton
- Atenuación del haz y espesor hemirreductor
- Principios sobre formación de la imagen radiológica

Objetivo general

Familiarizarse con el conocimiento básico de física de radiaciones y en el proceso de formación de la imagen

Material de entrenamiento del OIEA sobre Protección Radiológica en radiodiagnóstico y en radiología intervencionista

Parte 5: Interacción de la radiación con la materia

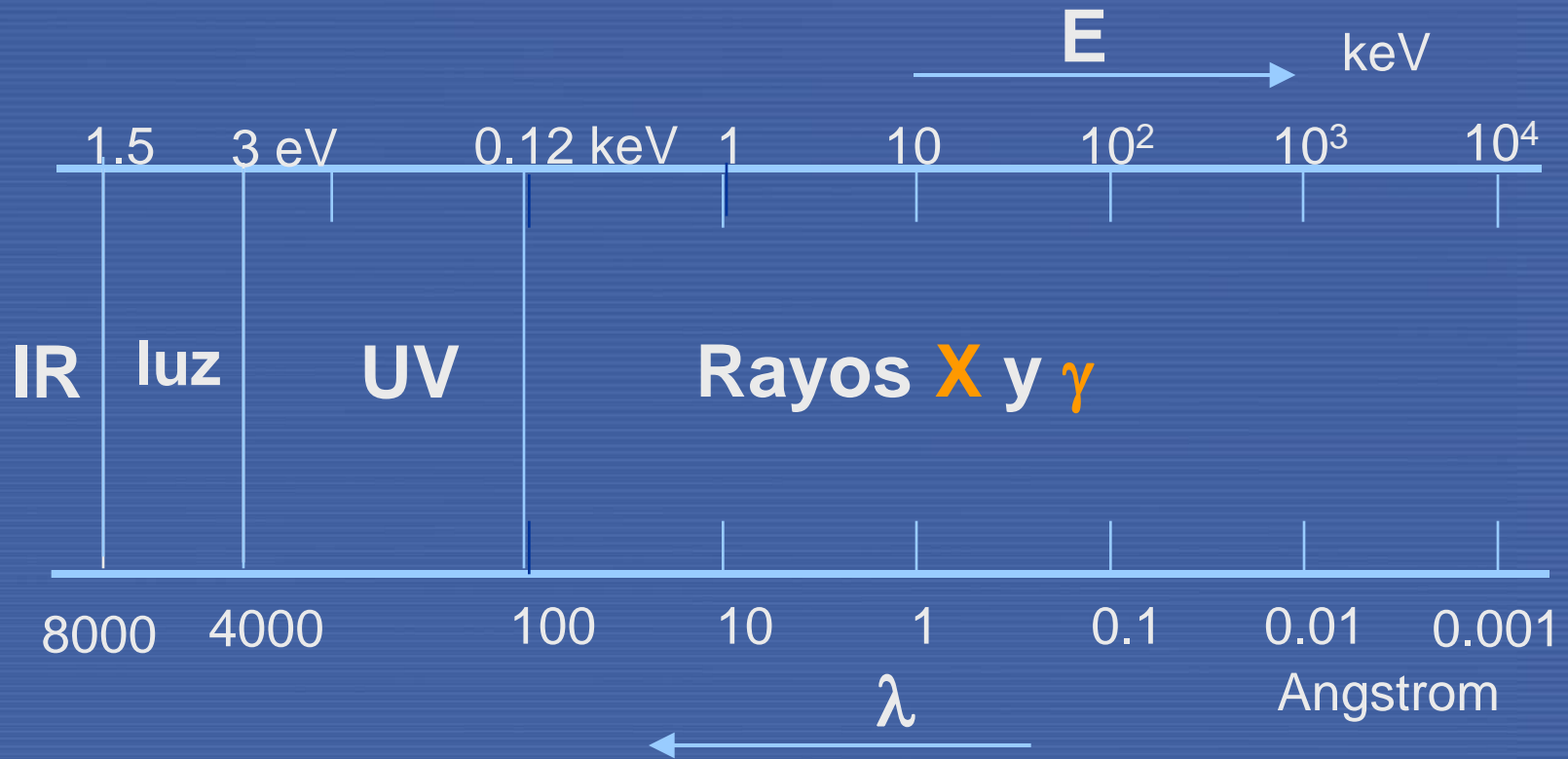
Tema 1: Introducción a la estructura atómica básica



IAEA

International Atomic Energy Agency

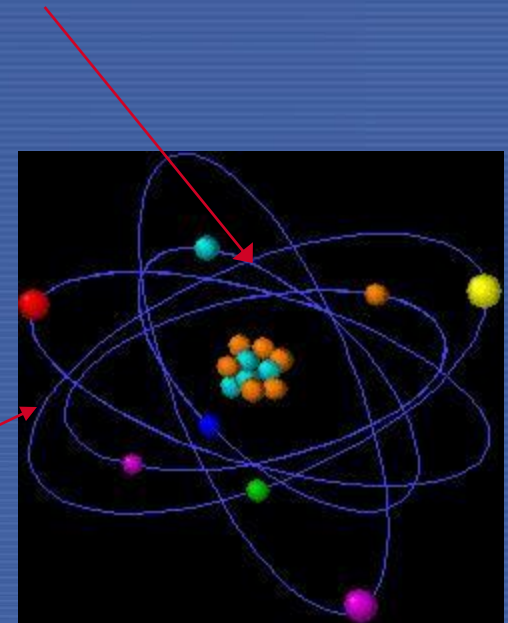
El espectro electromagnético



IR: infrarrojo, **UV:** ultravioleta

Estructura atómica

- Estructura nuclear
 - protones y neutrones = nucleones
 - Z protones con carga eléctrica positiva
 - $(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})$
 - Neutrones sin carga (neutros)
 - Número de nucleones = número másico A
- Estructura extranuclear
 - Z electrones (partículas ligeras con carga eléctrica)
 - Igual a la carga del protón pero negativa
- El átomo posee normalmente neutralidad eléctrica



Parte 5: Interacción de la radiación con la materia

Tema 2: Magnitudes y unidades



IAEA

International Atomic Energy Agency

Unidades básicas en física (Sistema Internacional, SI)

- Tiempo: 1 segundo [s]
- Longitud: 1 metro [m]
- Masa: 1 kilogramo [kg]
- Energía: 1 julio [J]
- Carga eléctrica: 1 coulombio [C]
- Otras magnitudes y unidades
- Potencia: 1 vatio [W] (1 J/s)
- $1 \text{ mAs} = 0.001 \text{ C}$

Magnitudes y unidades

- electrón-voltio [eV]: 1.603×10^{-19} J
- $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$
- $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$
- 1 carga eléctrica: 1.6×10^{-19} C
- masa del protón: 1.672×10^{-27} kg

Características de átomos

A, Z y magnitudes asociadas

- Hidrógeno $A = 1$ $Z = 1$ $E_K = 13.6 \text{ eV}$
- Carbono $A = 12$ $Z = 6$ $E_K = 283 \text{ eV}$
- Fósforo $A = 31$ $Z = 15$ $E_K = 2.1 \text{ keV}$
- Wolframio $A = 183$ $Z = 74$ $E_K = 69.5 \text{ keV}$
- Uranio $A = 238$ $Z = 92$ $E_K = 115.6 \text{ keV}$

Parte 5: Interacción de la radiación con la materia

Tema 3: Producción de Bremsstrahlung



IAEA

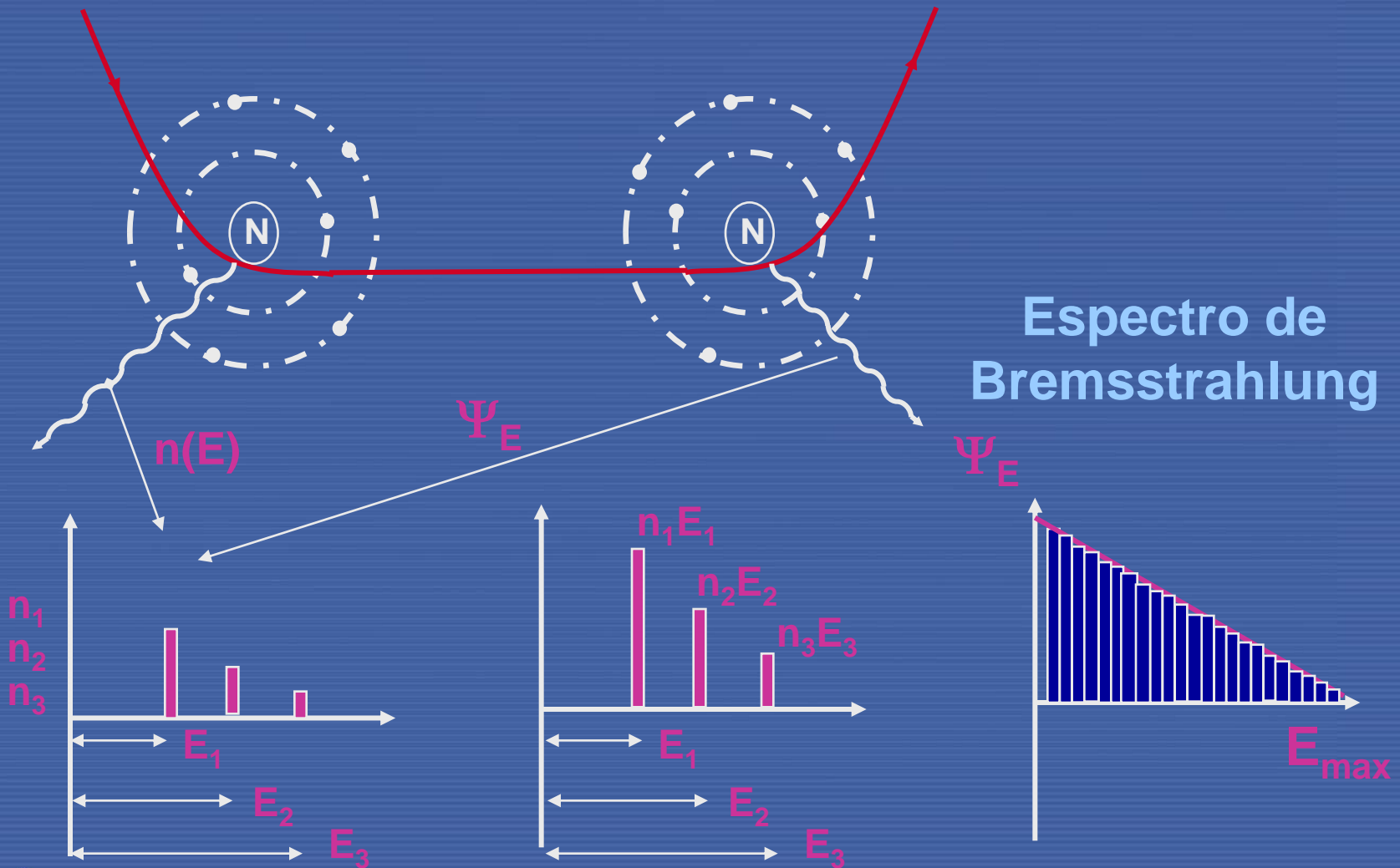
International Atomic Energy Agency

Interacción electrón-núcleo (I)

Bremsstrahlung:

- Pérdida de energía radiativa (E) por electrones que se frenan en su paso a través de un material
- es la deceleración del electrón incidente por el campo coulombiano del núcleo
- la energía de la radiación (E) se emite en forma de fotones

Los electrones golpean el núcleo



Interacción electrón-núcleo (II)

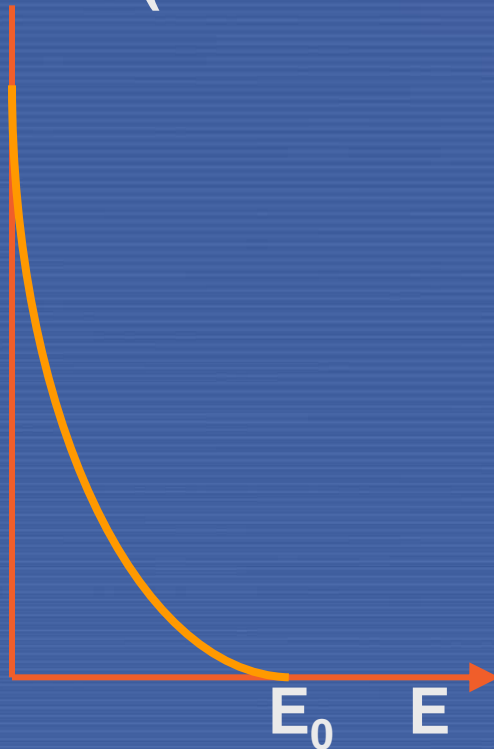
- Con materiales de alto número atómico
 - La pérdida de energía es mayor
- La pérdida de energía por Bremsstrahlung
 - Crece al aumentar la energía del electrón.
 - > 99% de la pérdida de energía cinética del electrón tiene lugar como producción de calor
- Los rayos X son predominantemente producidos por Bremsstrahlung

Espectro continuo de Bremsstrahlung

- La energía (E) de los fotones de Bremsstrahlung puede tomar cualquier valor entre “cero” y la máxima energía cinética de los electrones incidentes
- El número de fotones en función de E es proporcional a $1/E$
- Blanco grueso \Rightarrow espectro lineal continuo

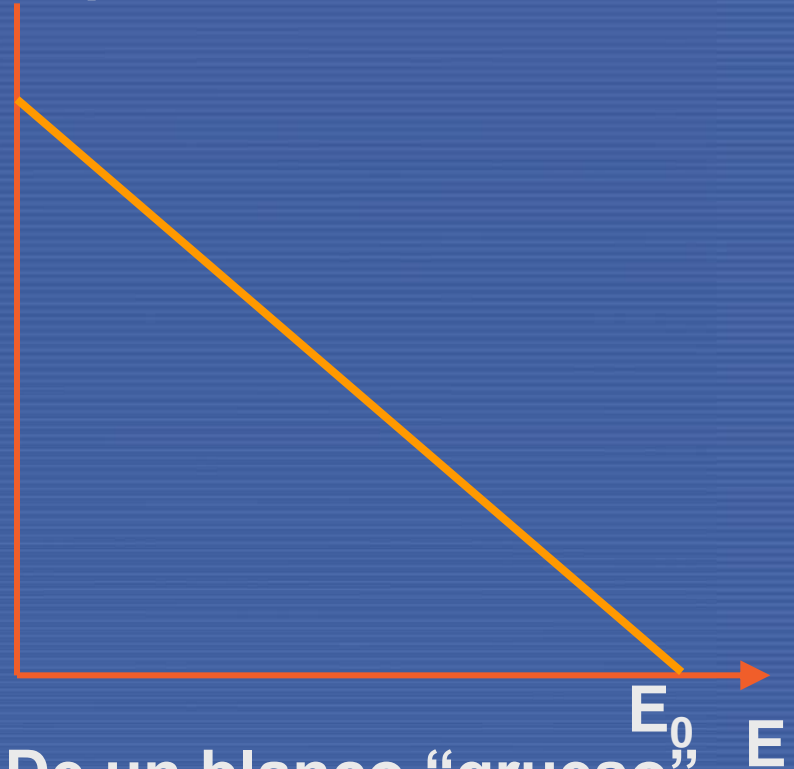
Espectros de Bremsstrahlung

dN/dE (densidad espectral)



De un blanco “delgado”

dN/dE

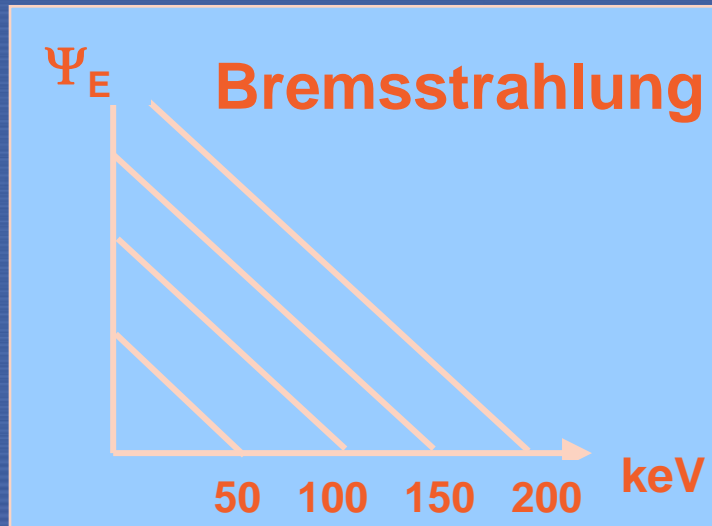


De un blanco “grosso”

E_0 = energía de los electrones, E = energía de los fotones emitidos

Energía del espectro de rayos X

- Energía máxima de los fotones de Bremsstrahlung
 - Energía cinética de los electrones incidentes
- En el espectro de rayos X de las instalaciones de radiología:
 - Máx (energía) = Energía al voltaje de pico del tubo de rayos X



Ionización y transferencias de energía asociadas

- Ejemplo: electrones en **agua**
- Energía de ionización: 16 eV (para una molécula de agua)
- Otras transferencias de energía asociadas a la ionización
 - **excitaciones** (cada una requiere solo unos pocos eV)
 - **transferencias térmicas** (a incluso menor energía)
- $W = 32 \text{ eV}$ es la pérdida promedio por ionización
 - es característica del medio
 - independiente de la partícula incidente y de su energía

Parte 5: Interacción de la radiación con la materia

Tema 4: Rayos X característicos



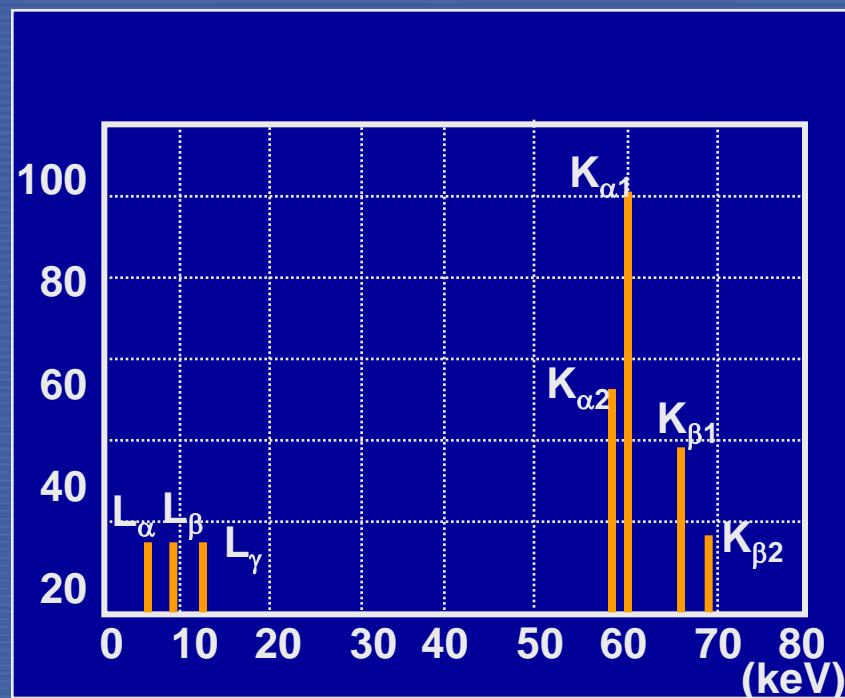
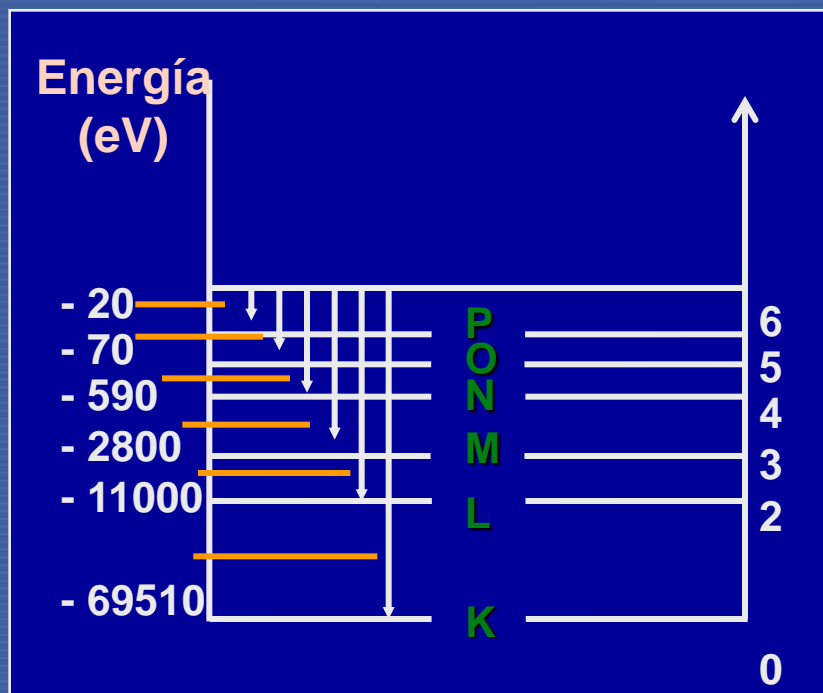
IAEA

International Atomic Energy Agency

Distribución espectral de los rayos X característicos (I)

- Comienza con la eyección de e^- principalmente de la capa K (también es posible de L, M,...) por ionización
- e^- de las capas L o M caen en la vacante creada en la capa K
- La diferencia en energías de enlace se emite como fotones
- Una secuencia de transiciones electrónicas sucesivas entre niveles de energía
- La energía de los fotones emitidos es característica del átomo

Distribución espectral de los rayos X característicos (II)



Material de entrenamiento del OIEA sobre Protección Radiológica en radiodiagnóstico y en radiología intervencionista

Parte 5: Interacción de la radiación con la materia

Tema 5: Ionización primaria y secundaria



IAEA

International Atomic Energy Agency

Poder de frenado

- Pérdida de energía a lo largo del recorrido tanto por colisiones como por Bremsstrahlung
- Poder de frenado lineal del medio

$$S = \Delta E / \Delta x \quad [\text{MeV} \cdot \text{cm}^{-1}]$$

- ΔE : pérdida de energía
- Δx : recorrido elemental
- Para colisiones distantes: a menor energía de los electrones, más alta es la cantidad transferida
- La mayoría de los fotones de Bremsstrahlung son de baja energía
- Las colisiones (por tanto, la ionización) son la principal fuente de pérdida de energía
- Excepto a altas energías o en medios de alto Z

Transferencia lineal de energía

- Eficacia biológica de la radiación ionizante
- Transferencia lineal de energía (LET): cantidad de energía transferida al medio por unidad de recorrido de la partícula
- Unidad: p.ej., [$\text{keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$]

Material de entrenamiento del OIEA sobre Protección Radiológica en radiodiagnóstico y en radiología intervencionista

Parte 5: Interacción de la radiación con la materia

Tema 6: Efecto fotoeléctrico y dispersión Compton



IAEA

International Atomic Energy Agency

Efecto fotoeléctrico

- Fotón incidente con energía $h\nu$
- \approx absorción de toda la energía del fotón por un electrón orbital firmemente ligado
 - Eyección del electrón del átomo
 - Energía cinética del electrón eyectado: $E = h\nu - E_B$
- Condición: $h\nu > E_B$ (energía de enlace del electrón)
- Retroceso del átomo residual
- Coeficiente de atenuación (o interacción)
 - coeficiente de absorción fotoeléctrica

Factores que influyen en el efecto fotoeléctrico

- Energía del fotón ($h\nu$) $>$ energía de enlace del electrón E_B
- La probabilidad de interacción decrece al aumentar $h\nu$
- Es el efecto principal a bajas energías de los fotones
- La probabilidad de interacción aumenta con Z^3 (Z : número atómico)
- Materiales de alto Z son fuertes absorbentes de rayos X

Dispersión Compton

- Interacción entre un fotón y un electrón
- $h\nu = E_a + E_s$ (se conserva la energía)
 - E_a : energía transferida al átomo
 - E_s : energía del fotón disperso
 - Se conserva el momento en las distribuciones angulares
- A baja energía, la mayor parte de la energía inicial es dispersada
 - ej: $E_s > 80\% (h\nu)$ si $h\nu < 1 \text{ keV}$
- Al aumentar Z , aumenta la probabilidad de interacción.
- En el rango de energías del diagnóstico, el efecto Compton es prácticamente independiente de Z
- La probabilidad de interacción disminuye al aumentar $h\nu$

Dispersión Compton y densidad de los tejidos

- El efecto Compton varía de acuerdo con:
 - La energía (relacionada con el kV del tubo de rayos X) y con el material
 - Reducir E \downarrow el proceso de dispersión Compton $\approx 1/E$
- Incrementar E supone reducir el ángulo de desviación del fotón
- Coeficiente de atenuación másico \approx constante con Z
 - Efecto proporcional a la densidad de electrones en el medio
 - Pequeña variación con el número atómico (Z)

Parte 5: Interacción de la radiación con la materia

Tema 7: Atenuación del haz y espesor hemirreductor



IAEA

International Atomic Energy Agency

Ley de atenuación exponencial de los fotones (I)

- Cualquier interacción \Rightarrow cambio en la energía del fotón y/o en la dirección
- Tiene en cuenta todos los efectos: Compton, fotoeléctrico,...

$$dI/I = -\mu dx$$

$$I_x = I_0 \exp(-\mu x)$$

- **I**: número de fotones por unidad de área y por segundo [s^{-1}]
- **μ** : coeficiente de atenuación lineal [m^{-1}]
- **μ/ρ** [$m^2 \cdot kg^{-1}$]: coeficiente de atenuación másica
- **ρ** [$kg \cdot m^{-3}$]: densidad del material

Coeficientes de atenuación

La atenuación lineal depende de:

- Las características del medio (densidad ρ)
- La energía de los fotones del haz

Coeficiente de atenuación másico: μ/ρ [$\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$]

- μ/ρ es idéntico para agua y vapor de agua (diferente ρ)
- μ/ρ es similar para aire y agua (diferente μ)

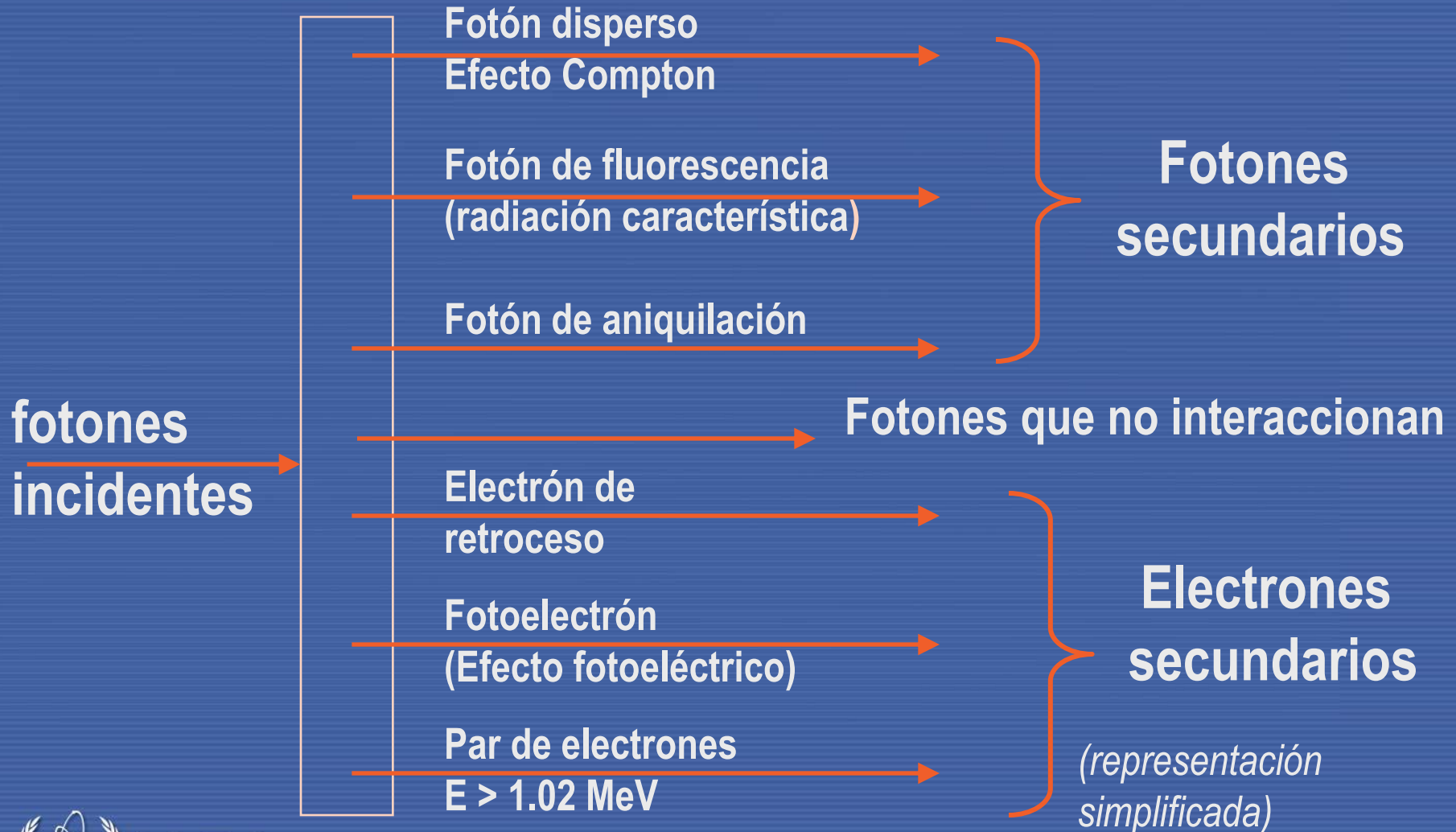
Atenuación de un haz heterogéneo

- Diversas energías \Rightarrow Ya no hay atenuación exponencial
- Eliminación progresiva de fotones a través de la materia
- Energías menores preferentemente
- Este efecto se usa en el diseño de filtros
 \Rightarrow efecto de endurecimiento del haz

Capa hemirreductora (CHR)

- CHR: espesor que reduce la intensidad del haz al 50%
- La definición sirve estrictamente para haces monoenergéticos
- En haz heterogéneo, efecto endurecedor
- $I/I_0 = 1/2 = \exp(-\mu \text{ CHR})$ $\text{CHR} = 0.693/\mu$
- CHR depende del material y de la energía de los fotones
- La CHR **caracteriza** la calidad del haz
- Modificación de la calidad del haz mediante filtración
- CHR (haz filtrado) \neq CHR (haz antes del filtro)

Interacciones de los fotones con la materia



Dependencia con Z y con la energía de los fotones

- $Z < 10$ predomina el efecto Compton
- Mayor Z incrementa el efecto fotoeléctrico
 - A baja E : el efecto fotoeléctrico predomina en hueso en comparación con el tejido blando
 - (absorción total del fotón)
- Productos de contraste \Rightarrow absorción fotoeléctrica alto Z (bario, 56; yodo, 53)
- Uso de absorción fotoeléctrica en protección radiológica
ej.: plomo ($Z = 82$) para fotones ($E > 0.5$ MeV)

Parte 5: Interacción de la radiación con la materia

Tema 8: Principios de la formación de la imagen radiológica



IAEA

International Atomic Energy Agency

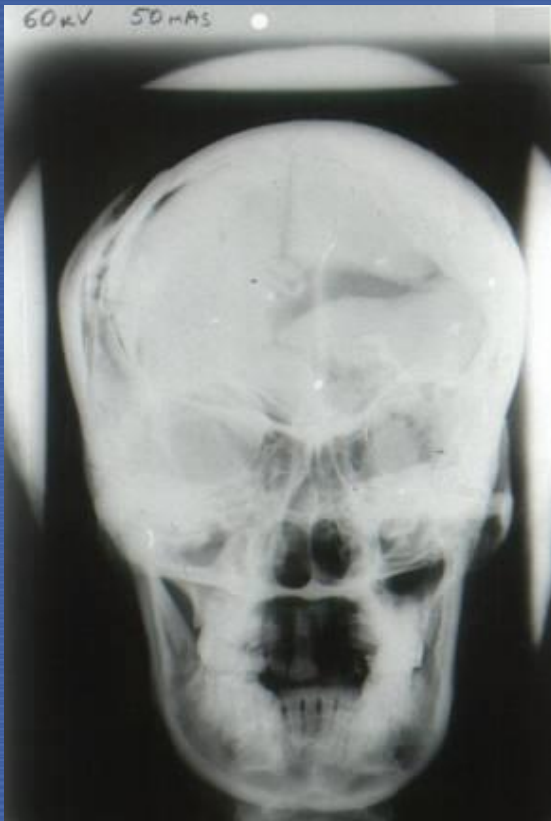
Penetración y atenuación de los rayos X en tejidos humanos

Atenuación de un haz de rayos X:

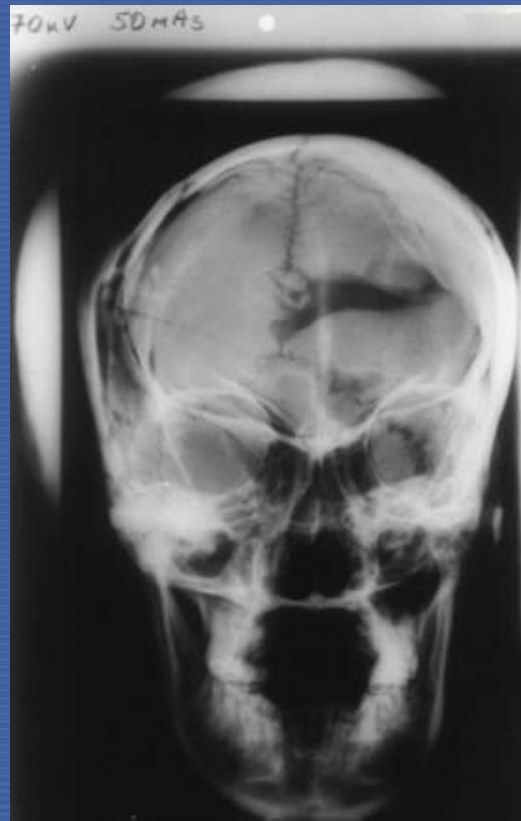
- aire: **despreciable**
- hueso: **significativa** debido a su relativa alta densidad (número de masa atómica del Ca)
- Tejido blando (ej., músculo,..): **similar** al agua
- Tejido adiposo: **menos importante que en agua**
- pulmones: **débil** debido a la densidad
 - Los huesos pueden permitir ver estructuras pulmonares con más alto kVp (reduciendo el efecto fotoeléctrico)
 - Las cavidades corporales se hacen visibles por medio de productos de contraste (yodo, bario).

Penetración de los rayos X en tejidos humanos

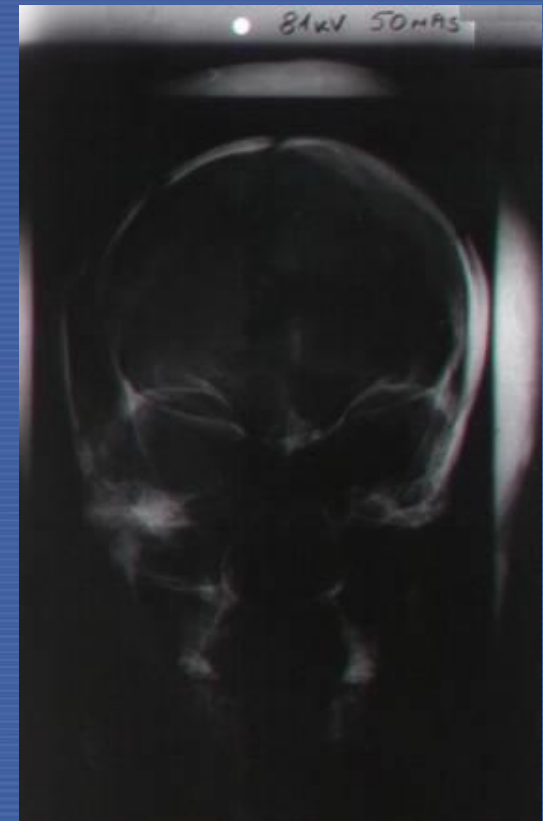
60 kV, 50 mAs



70 kV, 50 mAs

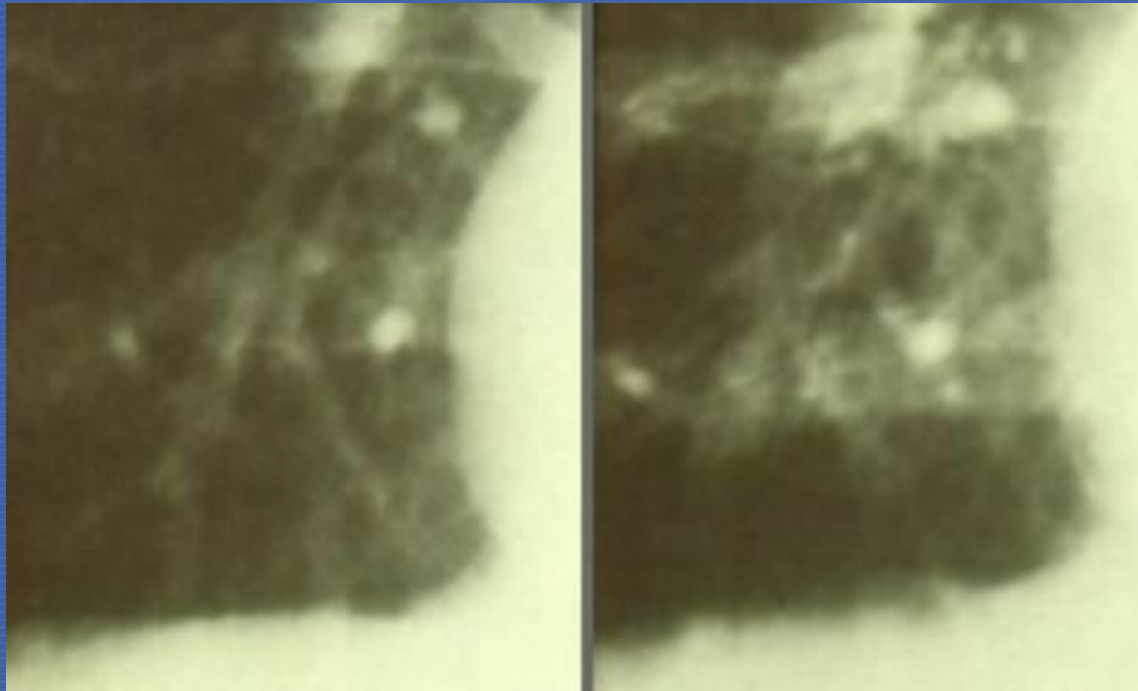


80 kV, 50 mAs



Penetración de los rayos X en tejidos humanos

Mejora del contraste de la imagen (pulmón)



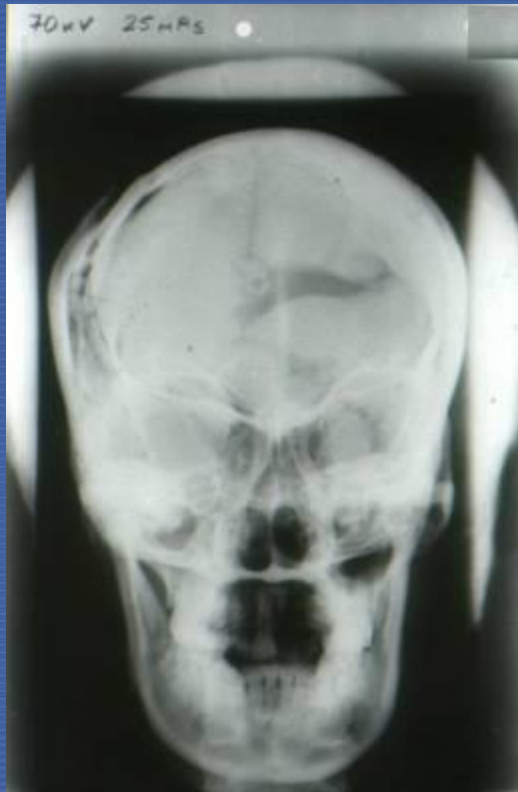
Penetración de los rayos X en tejidos humanos

Mejora del contraste de la imagen (hueso)

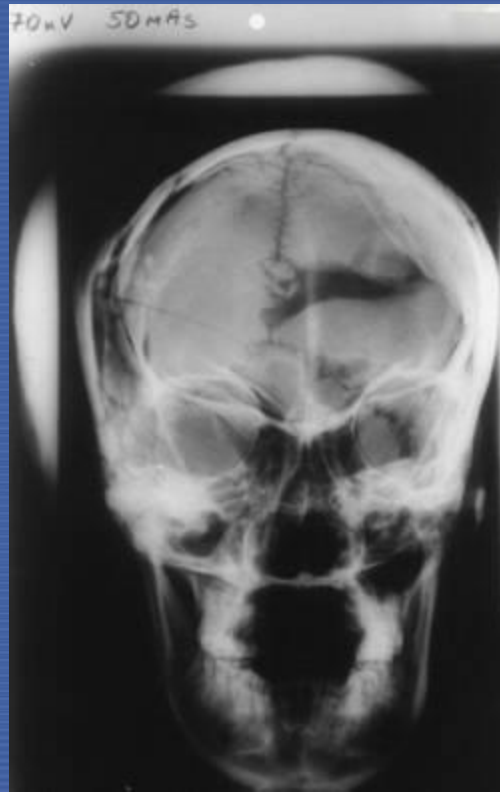


Penetración de los rayos X en tejidos humanos

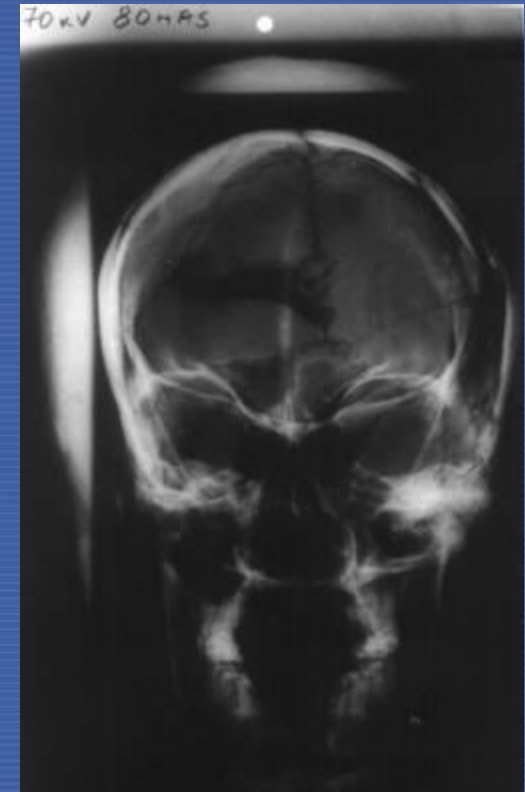
70 kV, 25 mAs



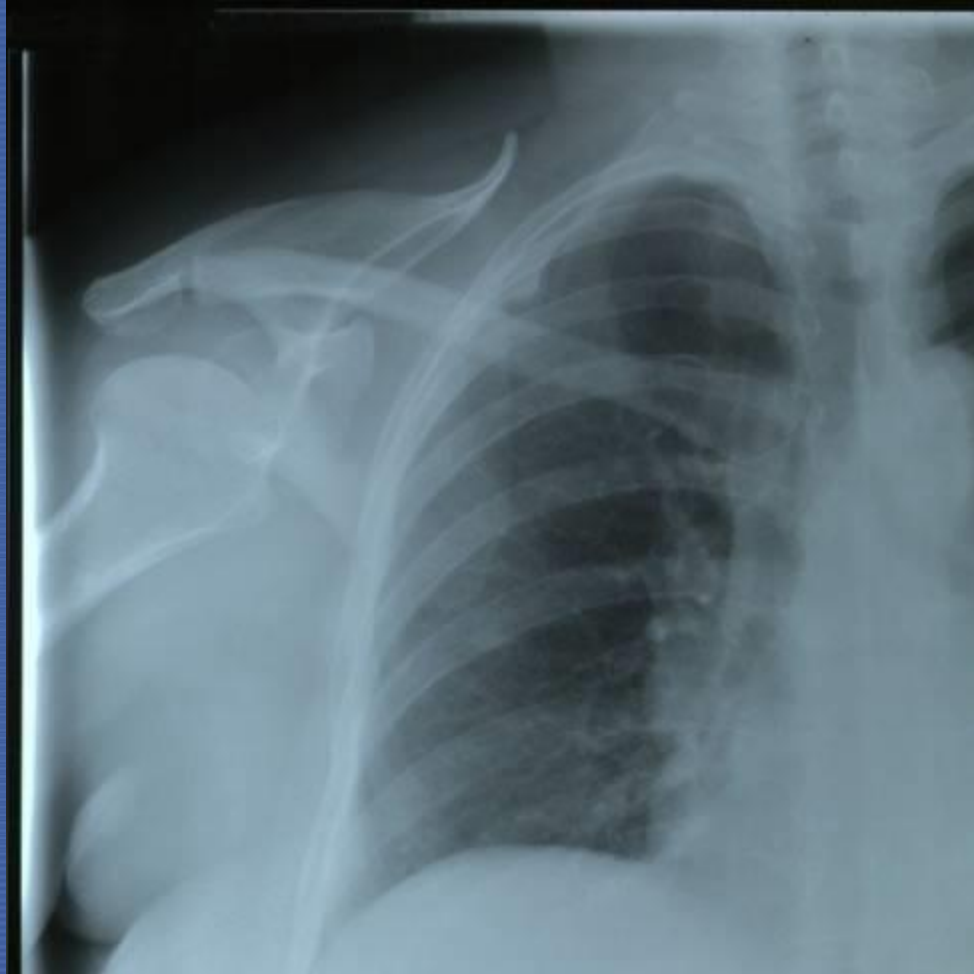
70 kV, 50 mAs



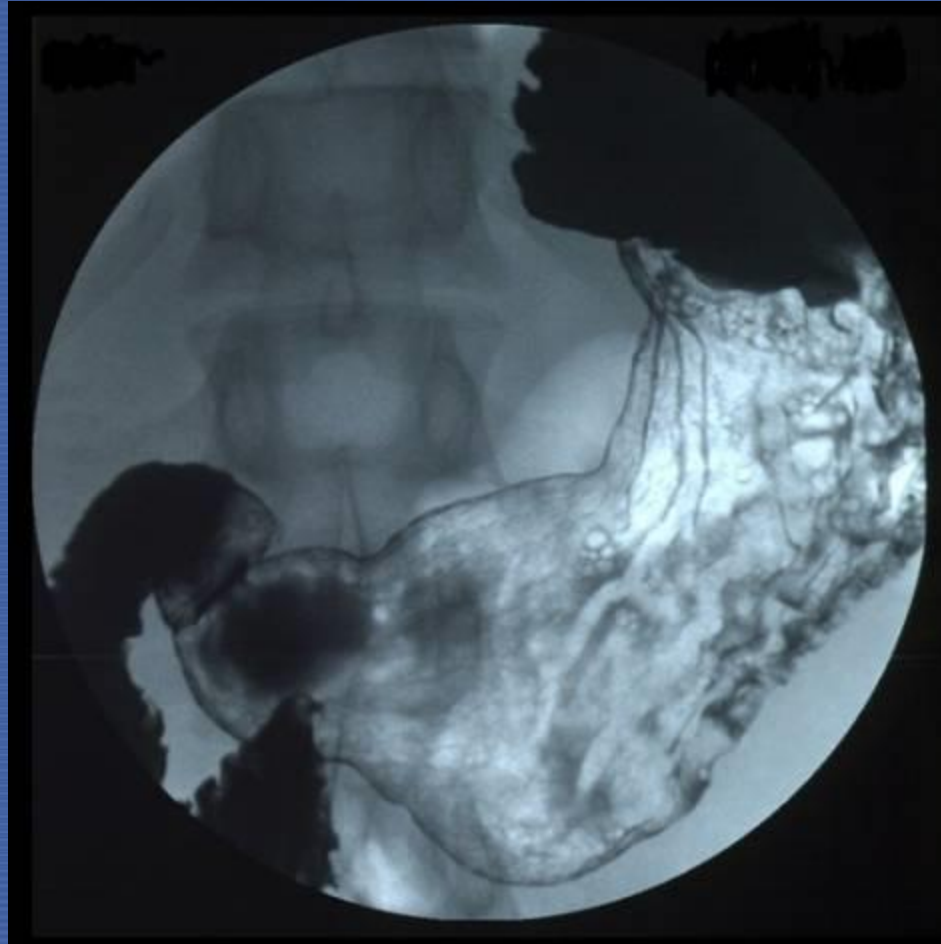
70 kV, 80 mAs



Penetración de los rayos X en tejidos humanos



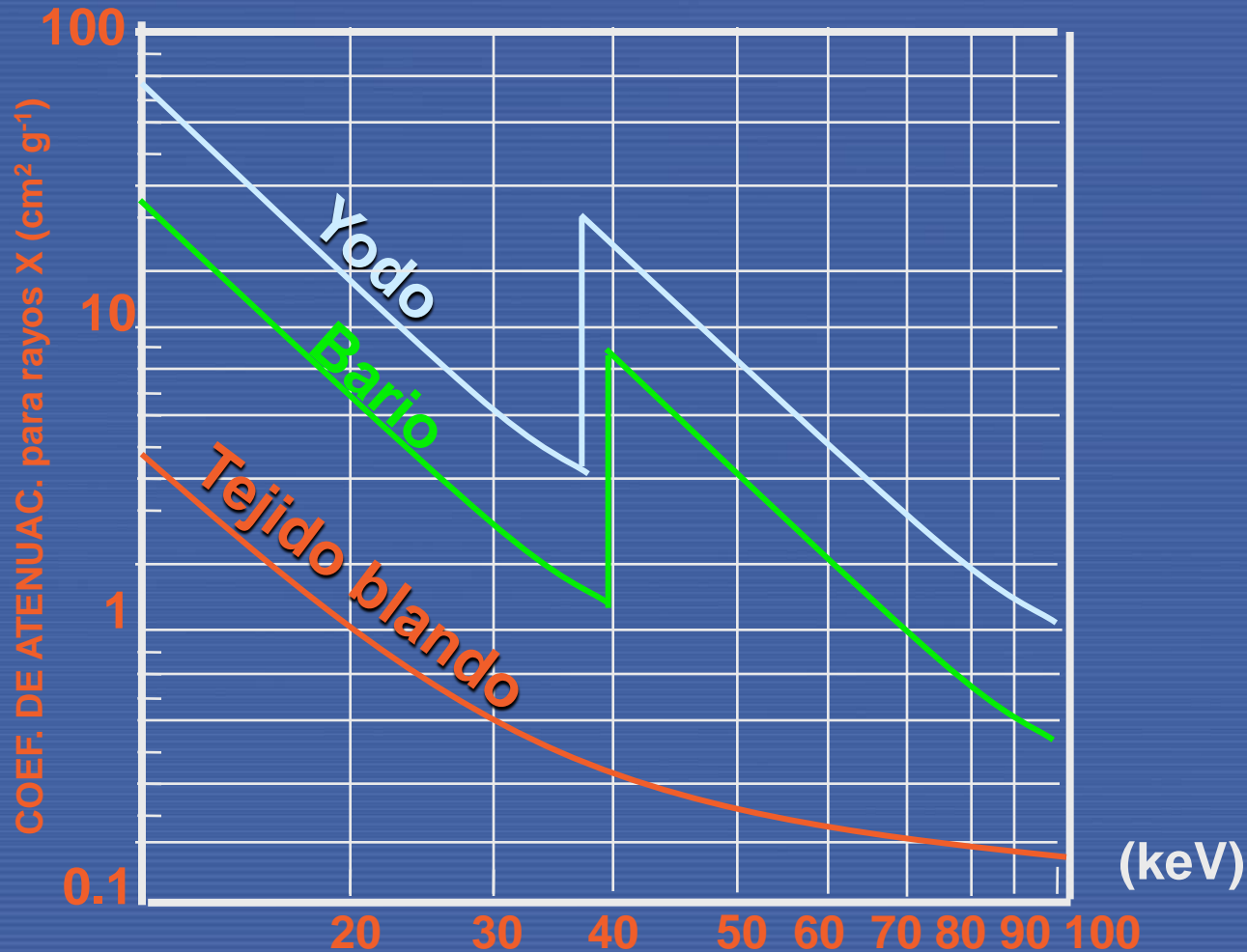
Penetración de los rayos X en tejidos humanos



Propósito de utilizar medios de contraste

- Hacer visibles tejidos blandos normalmente transparentes a los rayos X
- Realizar el contraste dentro de un órgano específico
- Mejorar la calidad de la imagen
- Principales sustancias utilizadas
 - Bario: partes abdominales
 - Yodo: urografía, angiografía, etc.

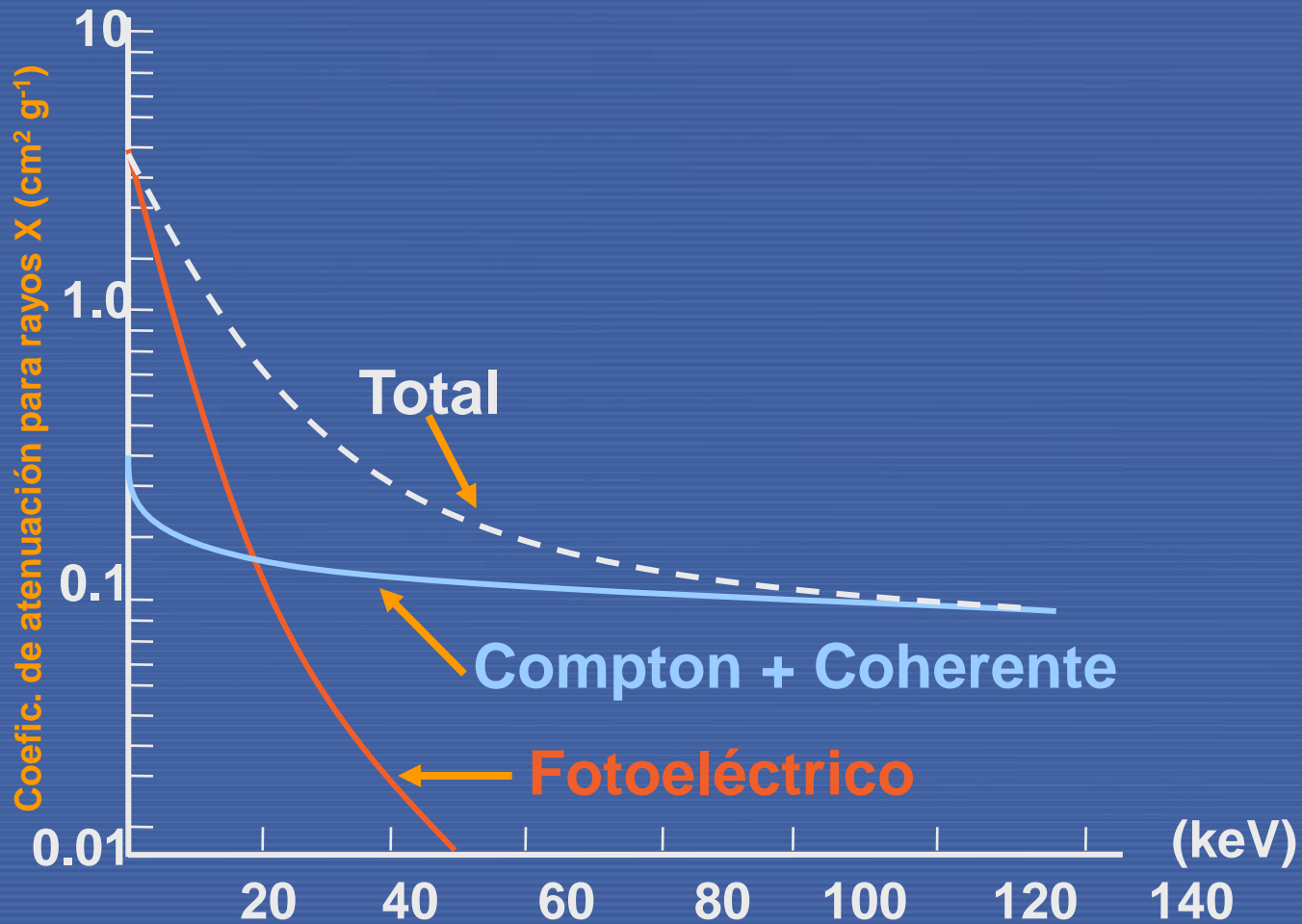
Características de absorción de los rayos X del yodo, bario y tejido corporal blando



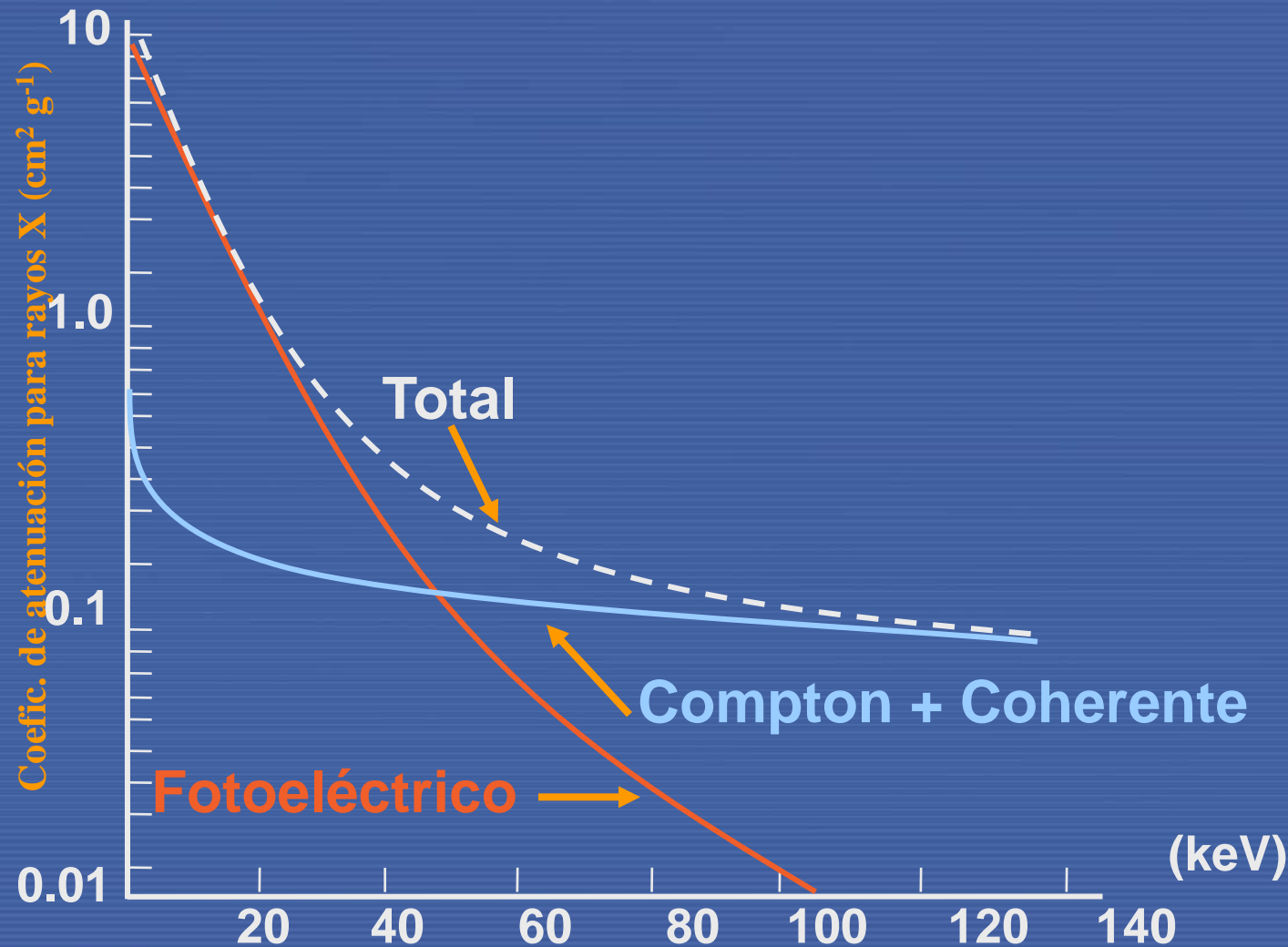
Absorción fotoeléctrica e imagen radiológica

- En tejidos blandos o grasa (próximos a agua), a bajas energías ($E < 25 - 30 \text{ keV}$)
- **Predomina** el efecto **fotoeléctrico**
- Principal contribución a la formación de la imagen en película radiográfica

Contribución de las interacciones fotoeléctricas y Compton a la atenuación de rayos X en agua (músculo)



Contribución de las interacciones fotoeléctricas y Compton a la atenuación de rayos X en hueso



Penetración de los rayos X en tejidos humanos

- Aumentar el kVp reduce el efecto fotoeléctrico
- El contraste de la imagen disminuye
- Las estructuras óseas y pulmonares pueden visualizarse simultáneamente

Nota: las cavidades corporales pueden hacerse visibles con medios de contraste: yodo, bario



Efecto de la dispersión Compton

Efectos de la radiación dispersa en:

- La calidad de imagen
- La energía absorbida por el paciente
- La radiación dispersa en la sala

Resumen

- Las partes elementales del átomo que constituyen las estructuras nuclear y extranuclear pueden representarse esquemáticamente.
- Los electrones y los fotones sufren diferentes tipos de interacciones con la materia.
- Dos formas diferentes de producción de rayos X, **Bremsstrahlung** y **radiación característica** contribuyen al proceso de formación de la imagen.
- Los efectos fotoeléctrico y Compton tienen una significativa influencia en la calidad de la imagen.

Dónde conseguir más información (1)

- Parte 2: Lección sobre “Magnitudes y unidades radiológicas”
- Attix FH. Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. New York, NY: John Wiley & Sons, 1986. 607 pp. ISBN 0-47101-146-0.
- Johns HE, Cunningham JR. Solution to selected problems from the physics of radiology 4th edition. Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1991.

Dónde conseguir más información (2)

- Wahlstrom B. Understanding Radiation. Madison, WI: Medical Physics Publishing, 1995. ISBN 0-944838-62-6.
- Evans RD. The atomic nucleus. Malabar, FL: R.E. Krieger, 1982 (originally 1955) ISBN 0-89874-414-8.