

Radiactividad e interacción de la radiación con la materia.

Imágenes médicas: adquisición, instrumentación y gestión.

NIB

M.Sc. Carolina Rabin
Instituto de Física, Facultad de Ciencias

marzo 2015

Materia = combinación de moléculas

Molécula = combinación de átomos

Átomo = núcleo + electrones (modelo de Rutherford, 1911)

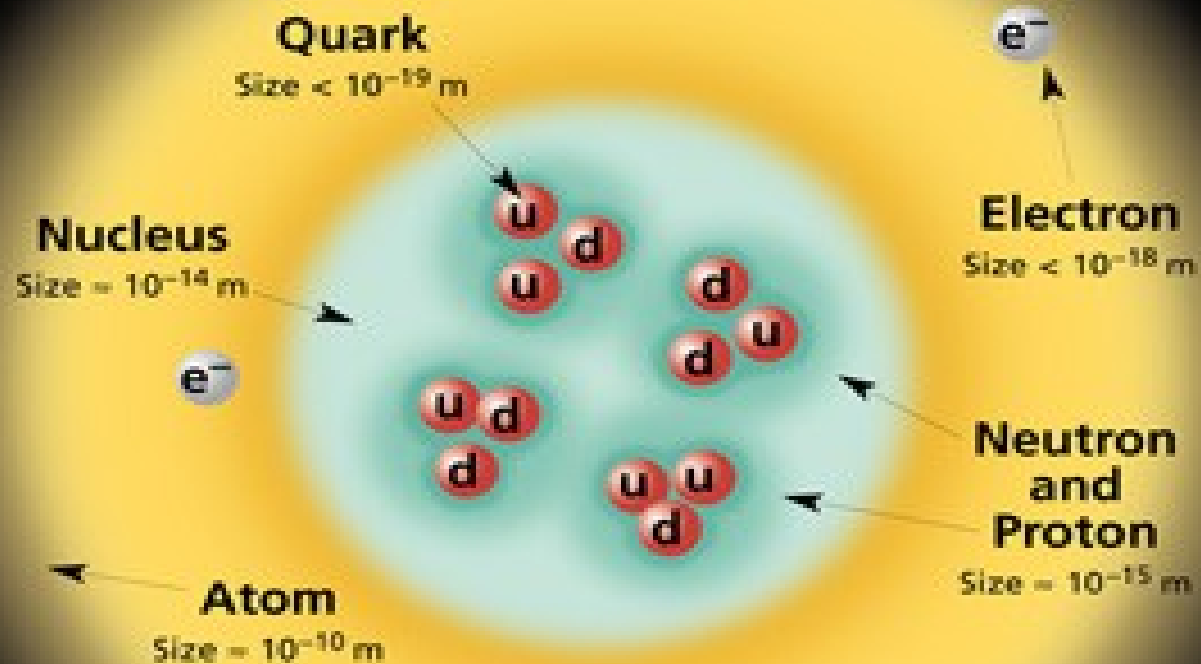
Núcleo = protones + neutrones

Electrón = partícula elemental

Protones y neutrones = combinación de quarks

Quarks = partículas elementales (Gell-Man, Sweig 1964)

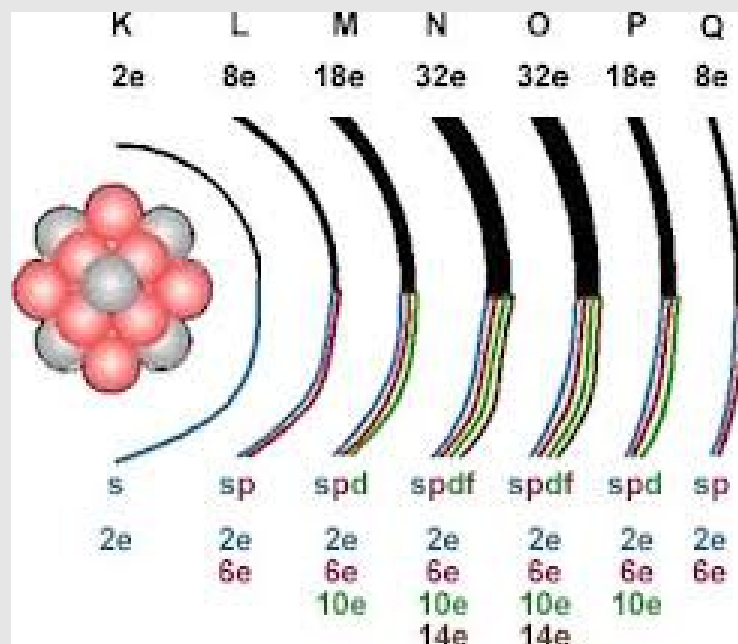
Structure within the Atom



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Los electrones ocupan orbitales ($P \alpha |\psi|^2$), de forma que en cada uno se pueden ubicar solamente 2 de ellos (spin (1925): ppio de exclusión de Pauli, 1925. Premio Nobel, 1945)

Se introduce así una estructura de capas que suele representarse: K, L, M, N, etc.. en donde el número de electrones en cada una de ellas toma valores fijos: 2, 8, 18, 32 respectivamente.



Dentro del núcleo, los protones y neutrones también ocupan orbitales, formando un sistema de capas similar al de los electrones.

En general la mayoría de los procesos emisores de radiación ocurren a nivel nuclear.

Representación de un átomo/núcleo : ${}^A_Z\mathbf{X}$

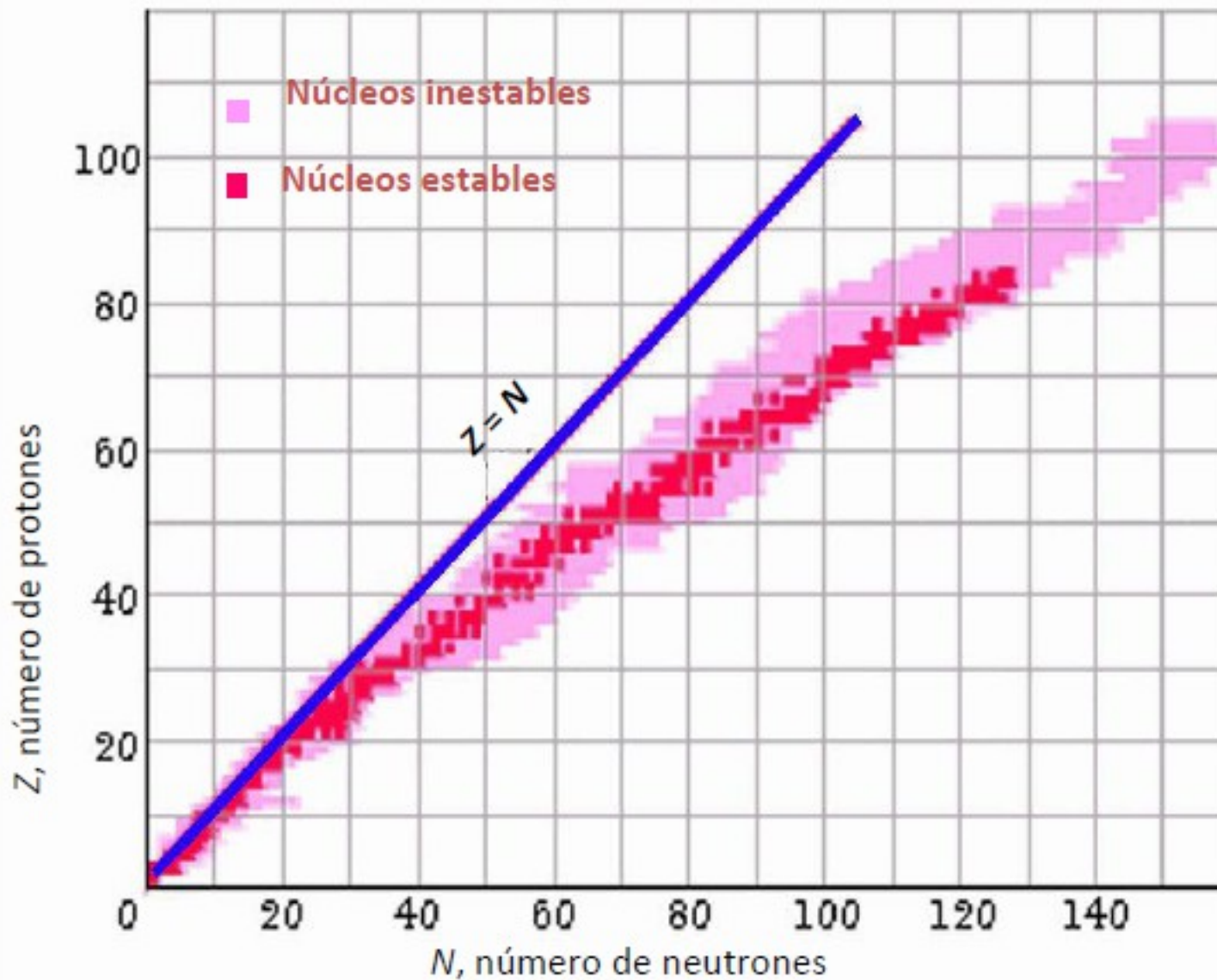
X: hace mención al nombre del elemento

A: Índice de masa = n° de protones + neutrones

Z: n° atómico = n° de protones (y n° de electrones)

Los isótopos entonces tienen igual **Z**, pero distinto **A**.

Curva de estabilidad



¿Qué es la radiación?

Es el transporte o la propagación de energía en forma de partículas u ondas. Si la radiación es debida a fuerzas eléctricas o magnéticas se llama *radiación electromagnética*. Pero la materia también puede emitir otras formas de radiación.

Por ejemplo existen algunos núcleos (*radionucleidos*) que emiten espontáneamente partículas o fotones (*radioactividad*), así como también existen átomos capaces de emitir fotones debido a transiciones electrónicas.

La radioactividad fue descubierta por Becquerel en 1896. Premio Nobel de Física en conjunto con Marie Curie, 1903.

La radioactividad es un proceso al azar, y la física únicamente puede predecir la frecuencia o el ritmo en que sucede. No depende de las influencias del entorno, como presión, temperatura, reacciones químicas y otros.

Cada radionucleido está caracterizado por su *vida media*, que es el tiempo en el que la mitad de un conjunto de núcleos radioactivos se desintegra.

VIDA MEDIA

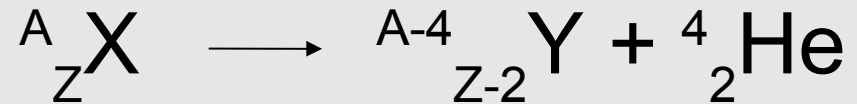
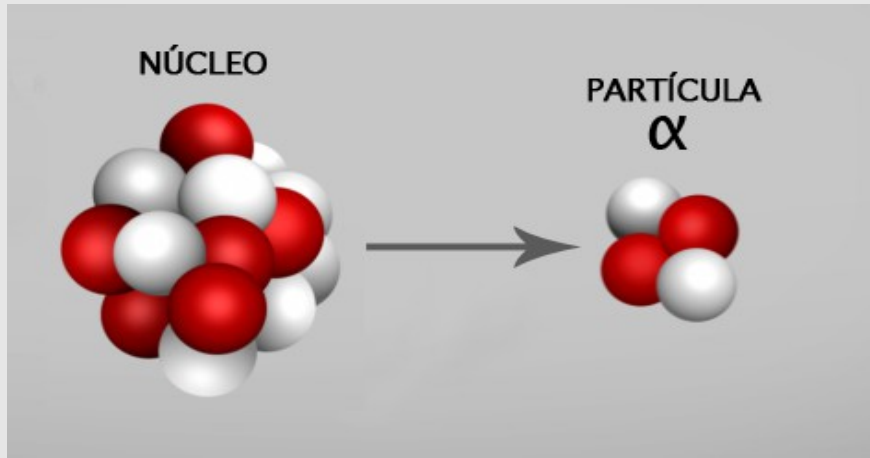
TIEMPO EN EL CUAL
LA MITAD DE LOS NÚCLEOS
DE UNA MUESTRA DECAEN.

Vida media de algunos elementos

^{15}O (Oxígeno 15)	122 segundos
^{222}Rn (Radón 222)	3,8 días
^{131}I (Yodo 131)	8 días
^{90}Sr (Estroncio 90)	29,1 años
^{137}Cs (Cesio 137)	30 años
^{14}C (Carbono 14)	5730 años
^{41}Ca (Calcio 41)	103.000 años
^{40}K (Potasio 40)	1,3 millones de años
^{235}U (Uranio 235)	703,8 millones de años

Aquellas radiaciones que posean la energía suficiente como para ionizar un átomo o molécula son llamadas *radiaciones ionizantes*. Estas son de gran importancia ya que pueden generar efectos indeseados sobre la salud.

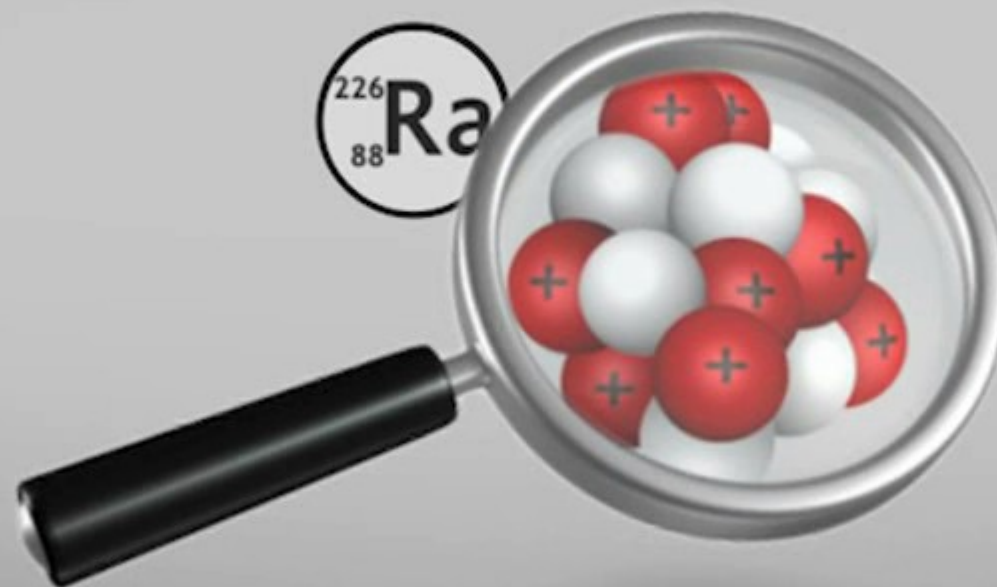
Radiación alfa (α)



Un núcleo inestable emite un núcleo de helio (formado por dos protones y dos neutrones); el núcleo original se transforma en otro.

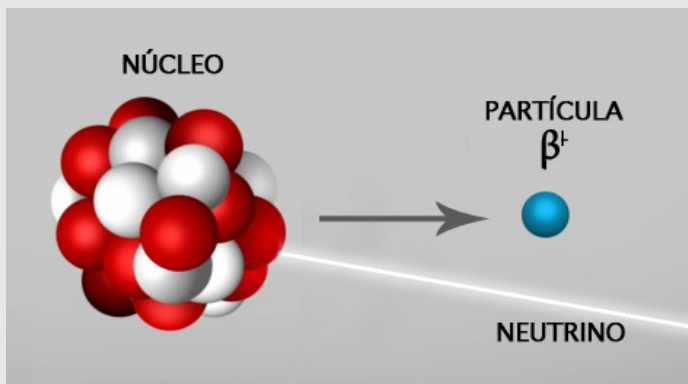
Ocurre para nucleidos cuyo $A > 83$

RADIACIÓN ALFA (α)

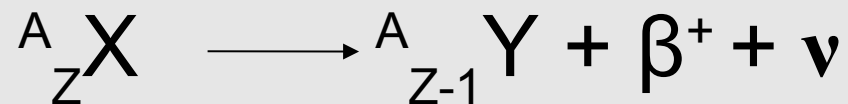


Radiación beta (β)

Existen dos tipos de radiación beta: β (electrones) y β^+ (positrones)

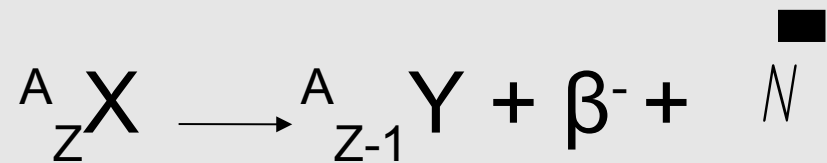


Radiación β^+



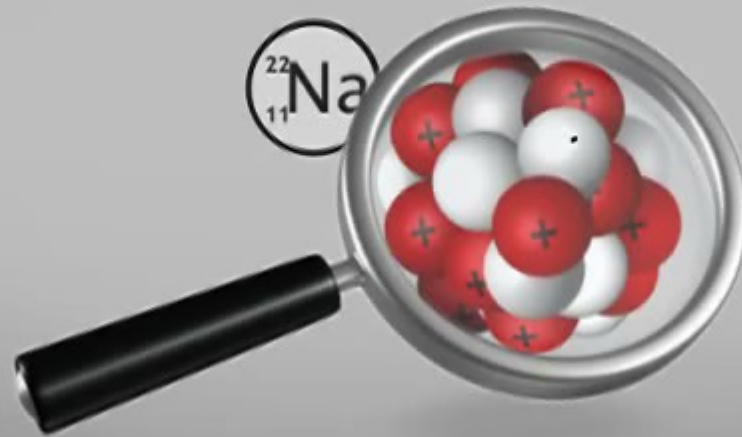
Un núcleo inestable emite un positrón (antipartícula del electrón) y un neutrino (Pauli, 1930); el núcleo original se transforma en otro.

Radiación β^- :



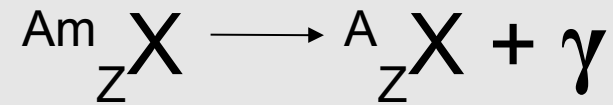
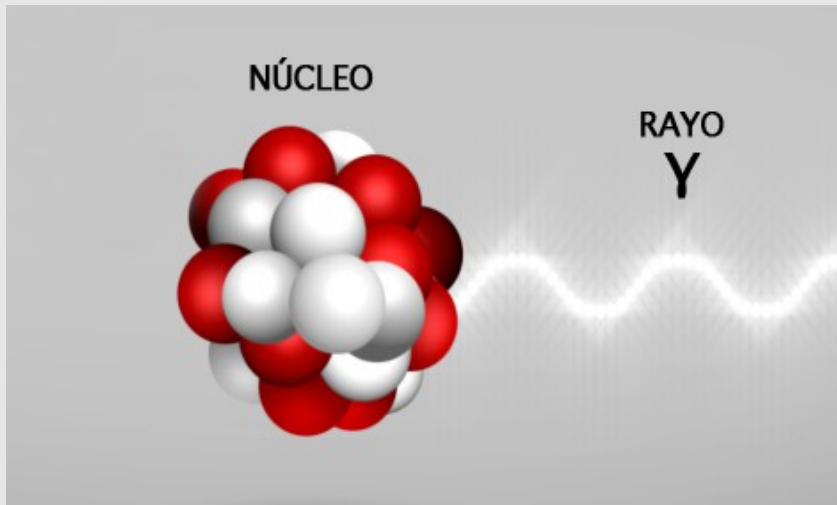
Un núcleo inestable emite un electrón y un antineutrino; el núcleo original se transforma en otro.

RADIACIÓN BETA (β^+)



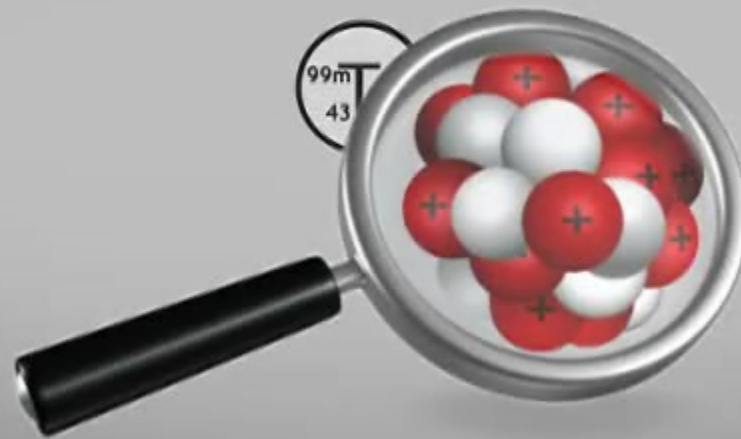
Podría ocurrir que un electrón atómico sea absorbido por un núcleo y como consecuencia que se emita un neutrino y que el núcleo original se transforme en otro. Este proceso es llamado *captura electrónica*.

Radiación Gamma γ



Son fotones usualmente de muy alta energía, emitidos por núcleos inestables u otros procesos. El núcleo no cambia su identidad sino que únicamente pierde energía.

RADIACIÓN GAMA (γ)



Existe un proceso que compita con la emisión gamma, la *conversión interna*.

La energía de un núcleo excitado es transferida a un electrón atómico expulsándolo.

$$C_{IA} \propto \frac{Z^3}{E}$$

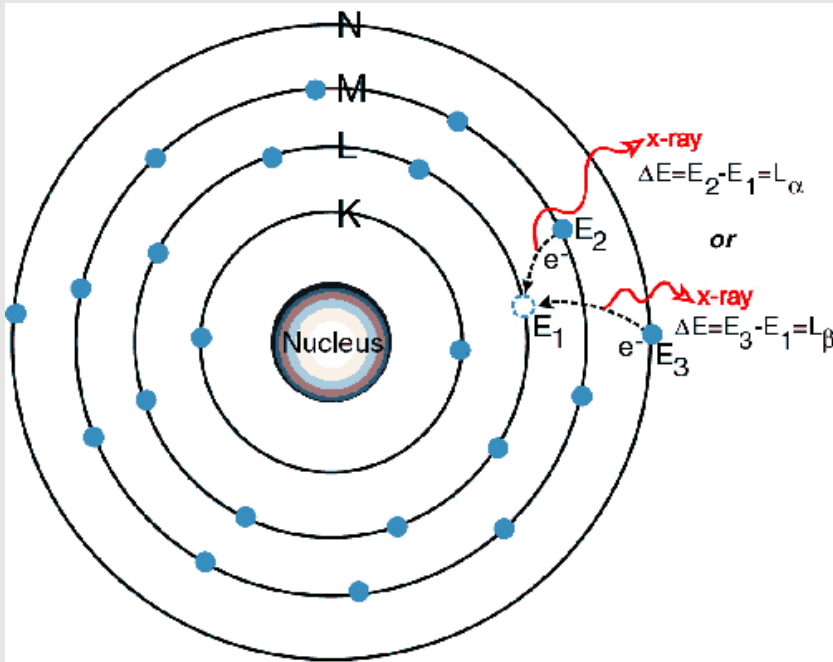
Rayos X

- Descubiertos por Röntgen en 1895. Primer Premio Nobel de Física, 1901.
- Hay 2 clases:
 - Característicos
 - De frenado (bremsstrahlung)



Primera radiografía.
Mano de la esposa
de Roentgen (1895)

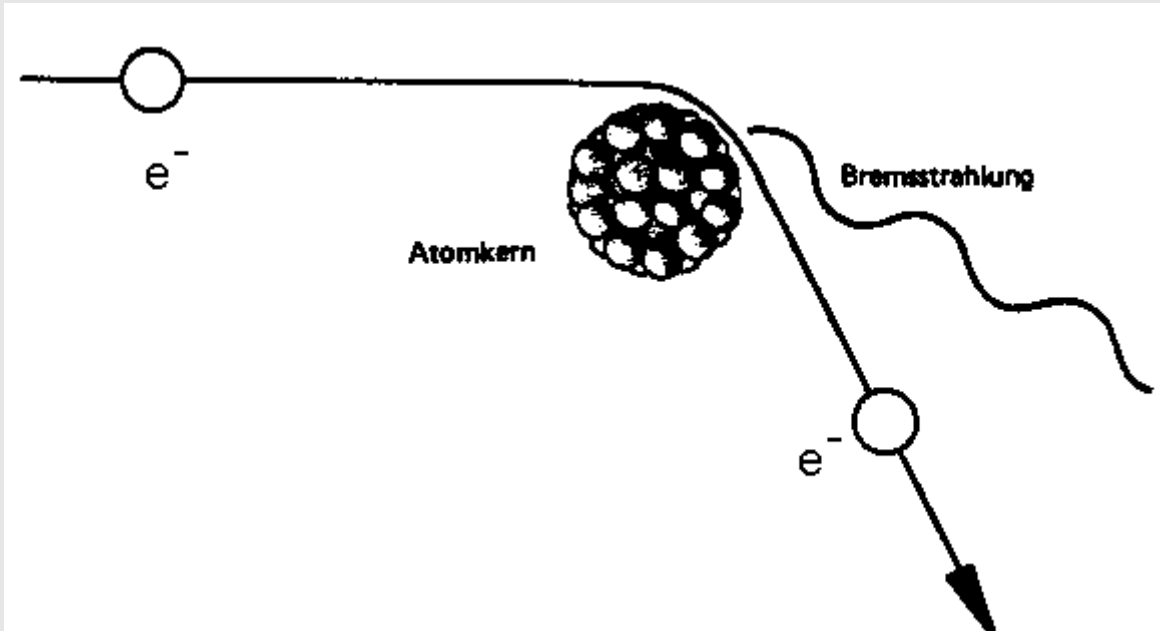
Característicos



Cuando en un átomo excitado o ionizado un electrón pasa de una órbita de mayor energía a una de menor energía.

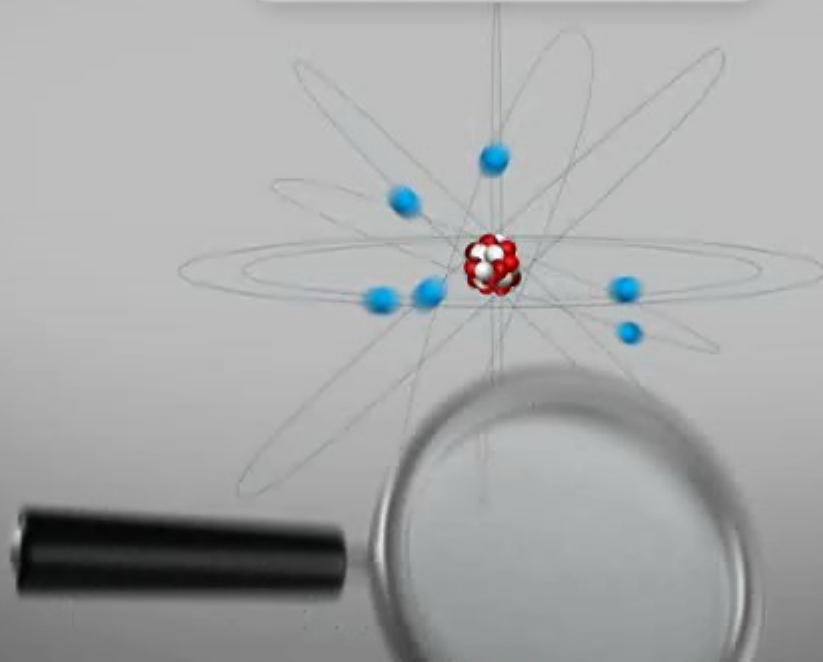
Su nombre es debido a que cada átomo tiene su espectro característico.

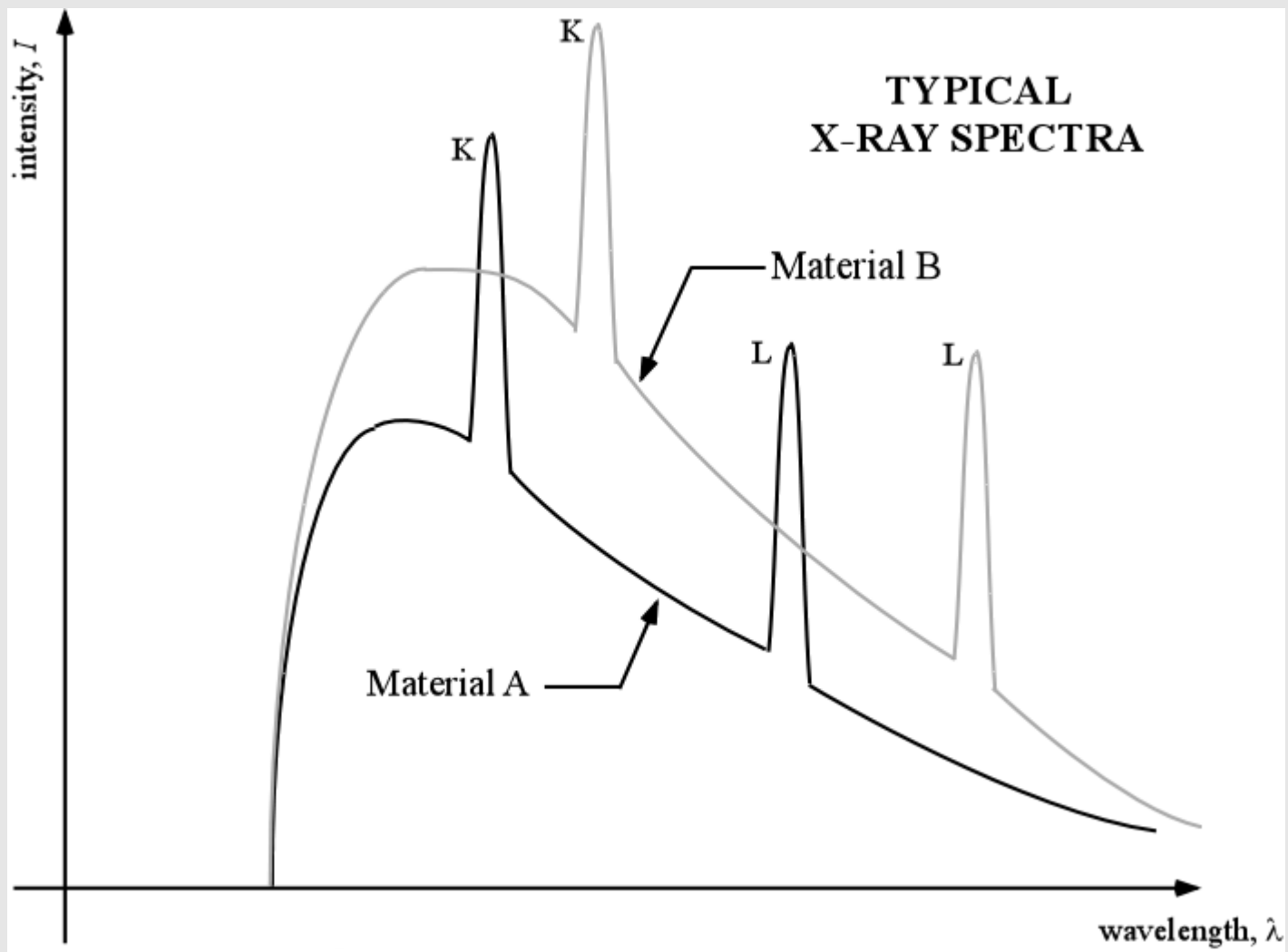
Bremmstrahlung



Cuando un electrón pasa cerca de un núcleo es desviado debido a la fuerza coulombiana y pierde parte de su energía emitiendo un foton.

CARACTERÍSTICOS

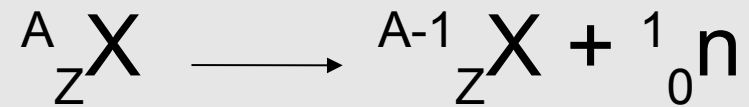
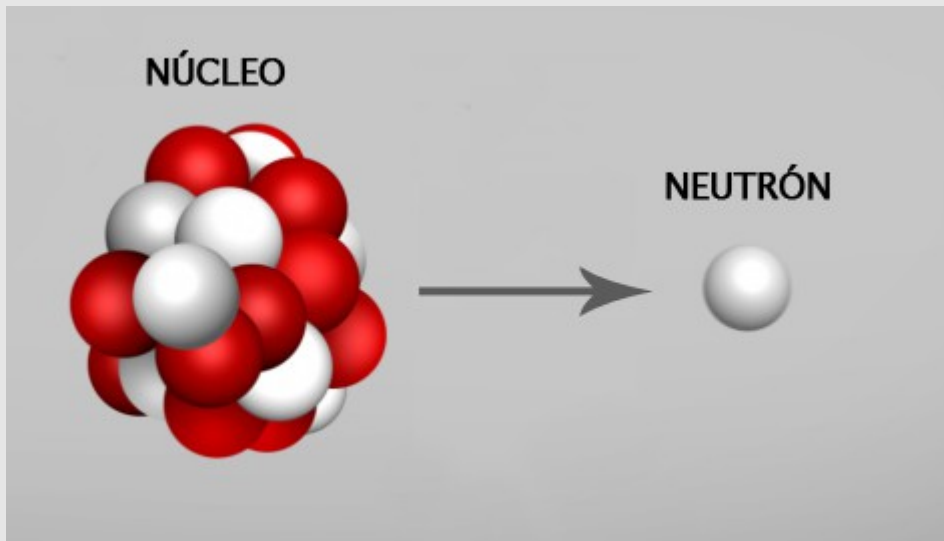




La emisión de electrones Auger es un proceso que compite con la emisión de rayos X.

Puede ocurrir que cuando un electrón de un átomo excitado o ionizado pasa de una órbita de mayor energía a una de menor energía, el exceso de energía expulse a otro electrón del átomo y se repita el proceso, generándose una cascada de electrones.

Radiación neutrónica



Cuando un núcleo inestable emite un neutrón. Generalmente es un proceso que ocurre durante la fisión o la fusión nuclear.

FISIÓN

^{235}U



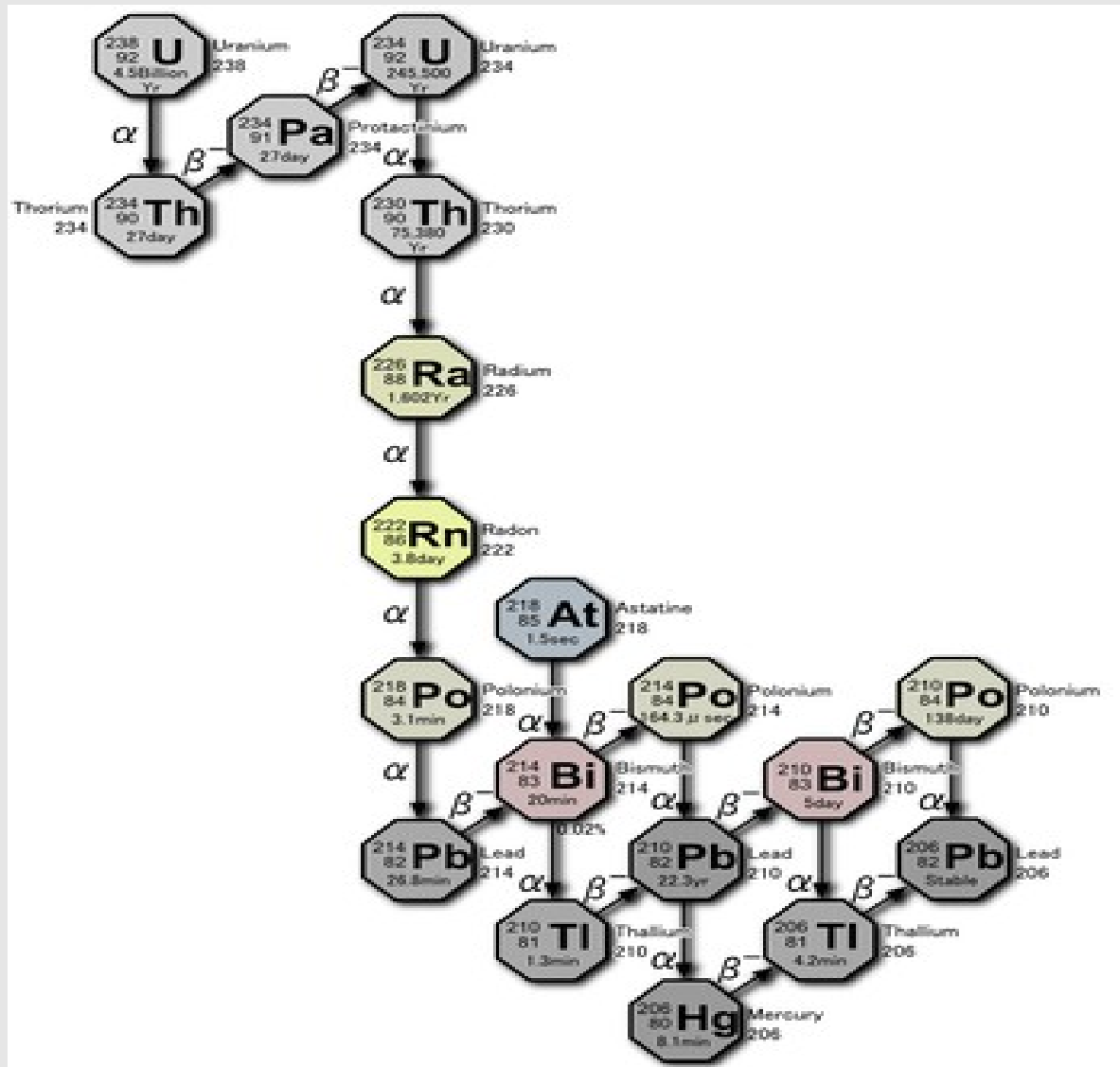
Ley de decaimiento exponencial

- Rutherford planteo que era la misma para todos los tipos de radiación.
- Para un radionucleido puro se cumple:

$$N(t) = N_0 e^{(-\lambda t)}$$

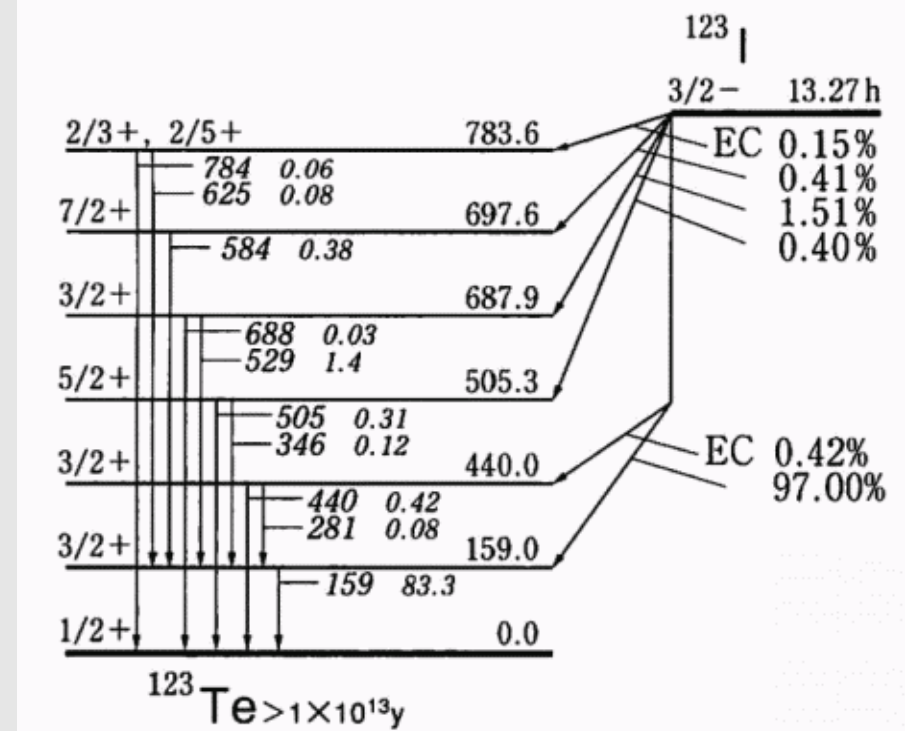
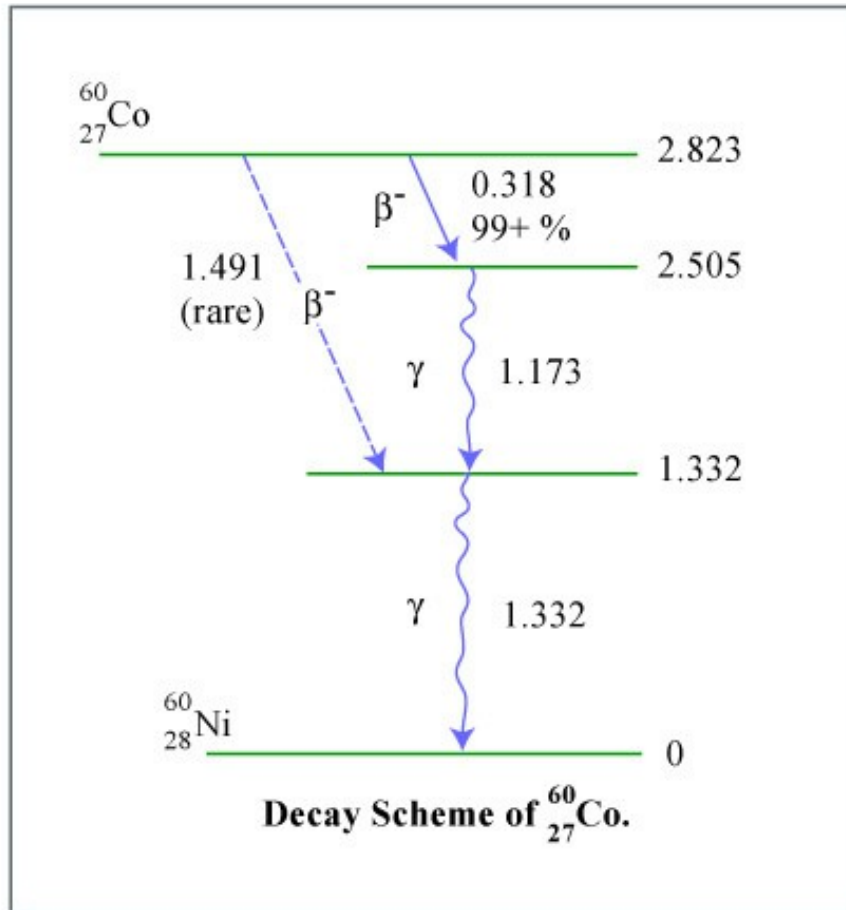
$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

Pero puede ocurrir que el radionucleido decaiga en un elemento que es también radioactivo: generando una *serie radioactiva*.



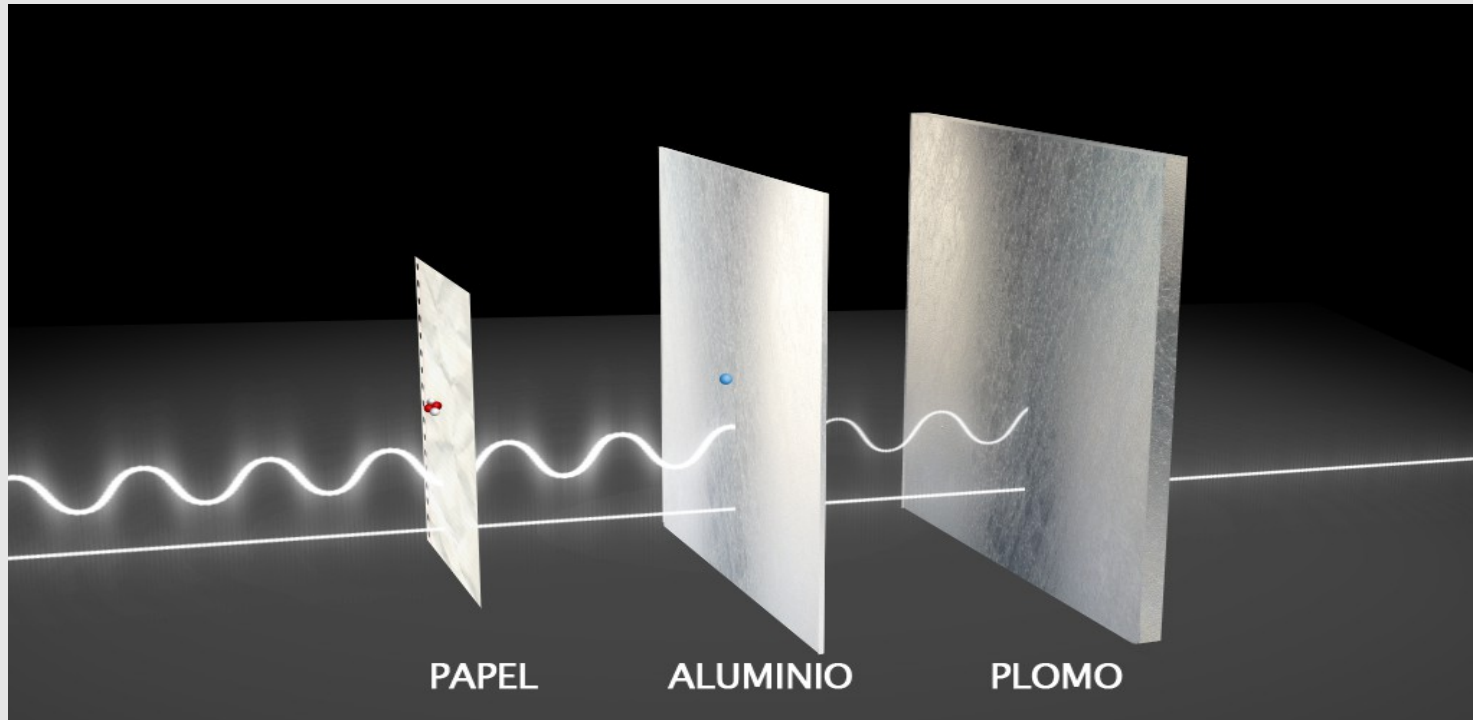
Serie del Uranio

En la mayoría de los procesos radioactivos, se emite más de un tipo de radiación.



Interacción de la radiación con la materia

Penetración en materiales



Esta propiedad es la que determina el riesgo que implica su uso y sus potenciales aplicaciones.

La radiación puede *excitar* y *ionizar* la materia.
Las partículas producidas en la ionización se llaman *partículas secundarias* y pueden a su vez repetir el proceso.

Las partículas alfa y beta, generan efectos locales, pero los fotones, que son muy penetrantes, pueden sufrir varios procesos.

Interacción de partículas cargadas con la materia

Pérdida de energía por unidad de longitud

Las partículas cargadas pierden energía a lo largo de sus trayectoria por medio de interacción electromagnética (colisión) y por emisión de radiación de frenado (bremsstrahlung):

$$\left(\frac{dE}{dx}\right) = \left(\frac{dE}{dx}\right)_c + \left(\frac{dE}{dx}\right)_r$$

Para partículas β :

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_r / \left(\frac{dE}{dx}\right)_c \approx \frac{ZE}{800}$$

PICO DE BRAGG: Electromagnético, Fórmula de Bethe-Bloch:

$$-\frac{dE}{dx_c} = \frac{4\pi k^2 Z_{ef}^2 e^4 n}{m_e c^2 \beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2 m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} - \frac{C}{Z} \right]$$

β, γ : parámetros relativistas

I : energía de ionización media

M, Z_p : masa y carga del proyectil

n : densidad electrónica del medio

T_{max} : energía cinética máxima del e^-

$\delta(\beta\gamma)$: corrección de densidad

C/Z : corrección de Barkas

$$Z_{ef} = Z_p \left(1 - e^{-125 \beta / Z_p^{2/3}} \right) \longrightarrow \text{Decaimiento abrupto}$$

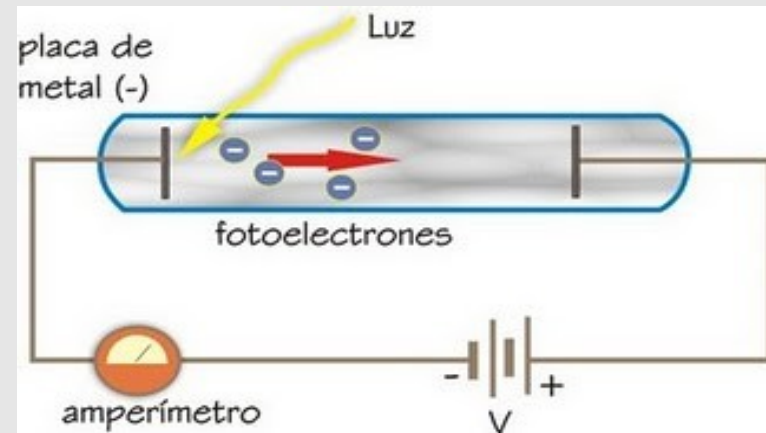
$$T_{max} = \frac{2 m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{\left(1 + 2 \gamma \frac{m_e}{M} + \left(\frac{m_e}{M} \right)^2 \right)}$$

Interacción de los fotones con la materia

- Colisión de Rayleigh (colisión elástica)
- Efecto fotoeléctrico
- Efecto Compton
- Creación de Pares
- QED (Quantum ElectroDynamics): Premio Nobel de Física, 1965.

Efecto fotoeléctrico

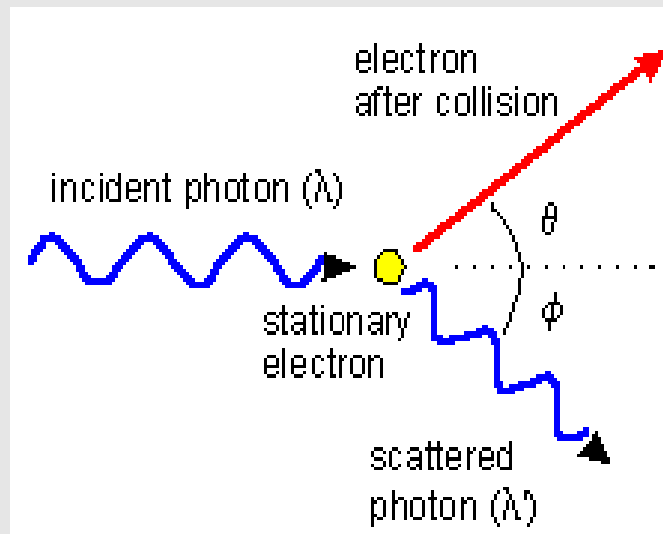
- Es la emisión de electrones al incidir fotones sobre un medio material



- Contradecía lo esperado por la física clásica.
- Introduce la noción de fotón.
- Precursor de la “Dualidad onda-partícula”(De Broglie, Nobel de Física, 1929)
- Premio Nobel de Física 1921, Einstein y Millikan

Efecto Compton

- Cuando un fotón(X o gamma) colisiona con un electrón libre de un material, puede cambiar su longitud de onda y por lo tanto su energía.



$$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta)$$

$$h / m_0 c = 0.0243 \text{ \AA}$$

- Premio Nobel de Física 1927

Compton vs. Fotoeléctrico

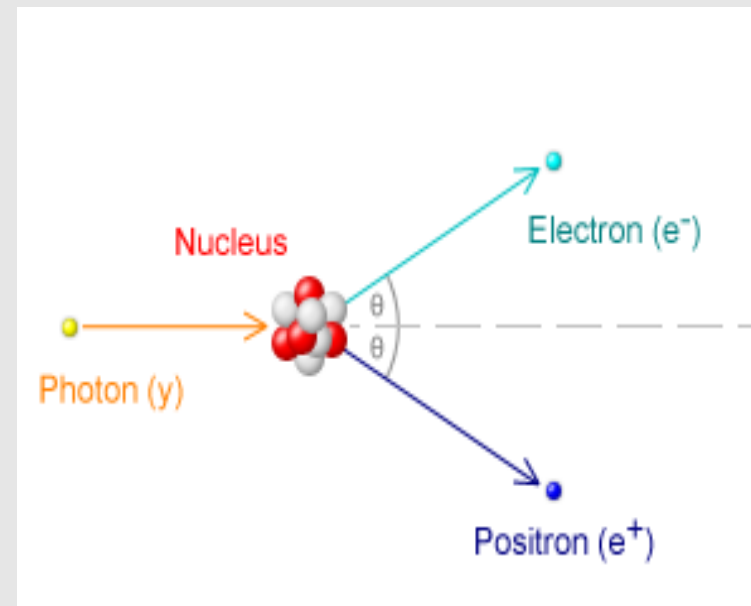
Fotoeléctrico $A \frac{R Z^4}{E^3}$

Compton $A \frac{R Z}{E}$

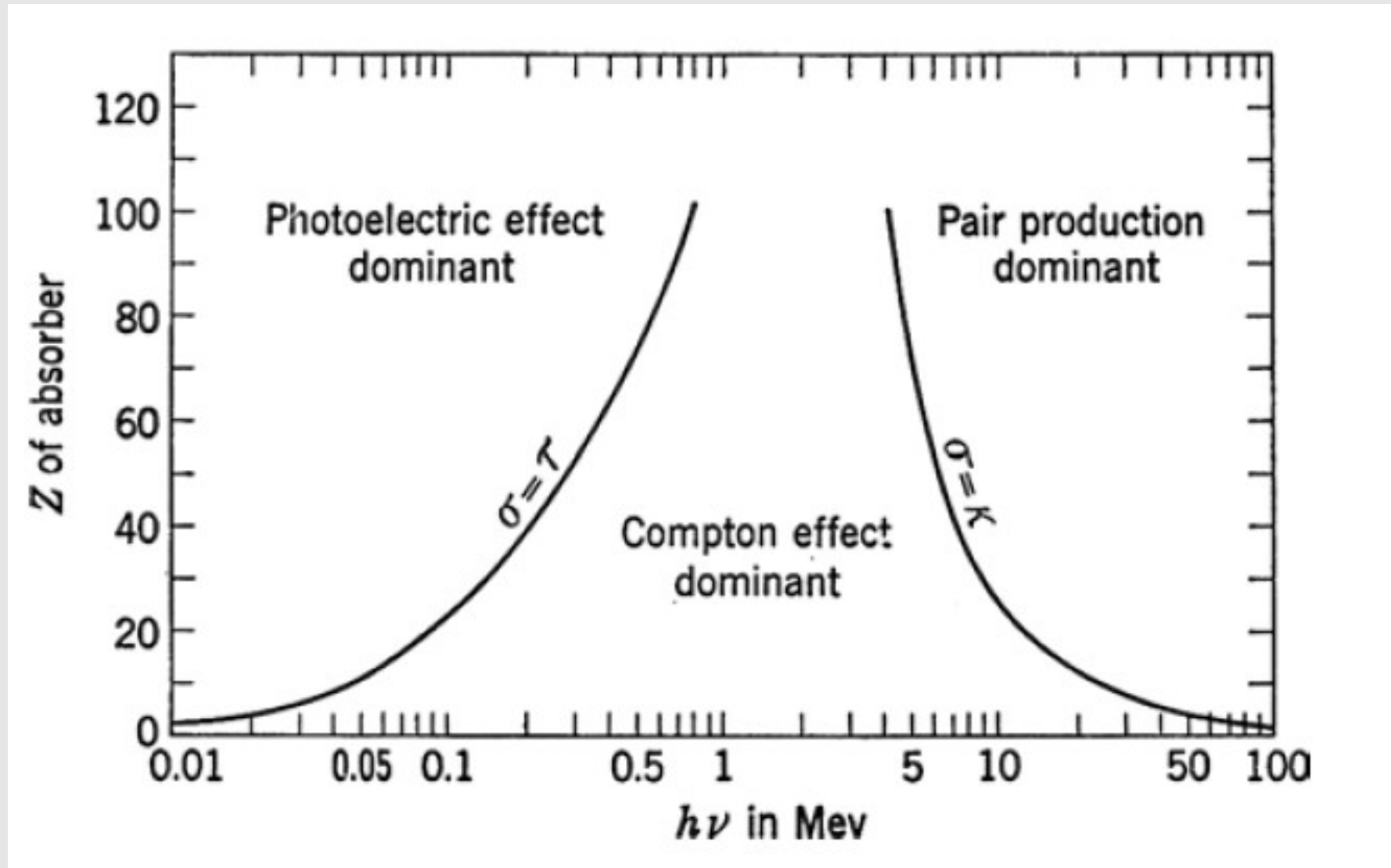


Creación de pares

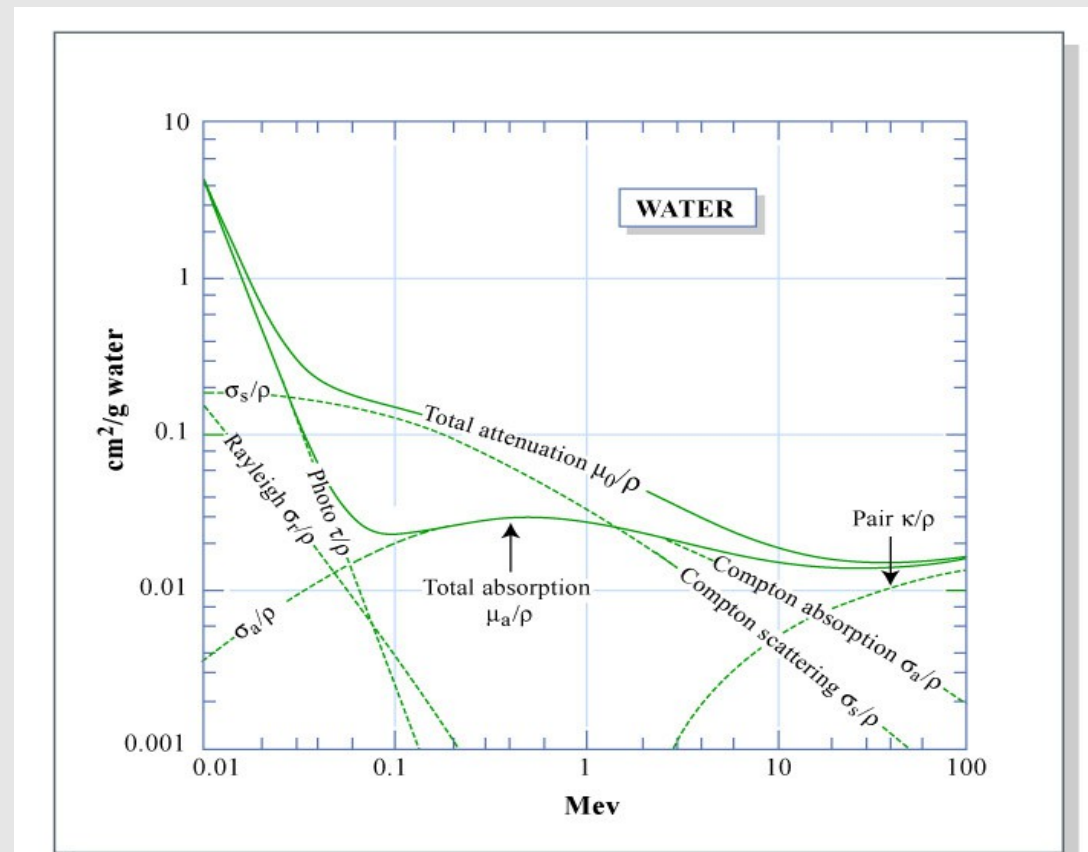
- Si un fotón en la cercanía de un núcleo tiene la energía suficiente (1,022 MeV) puede crear un par electrón-positrón. Una vez creadas estas partículas, el positrón se aniquilará con un electrón de la materia emitiéndose dos fotones a 180° uno del otro.
- Premio Nobel de Física, 1948



Dominio energético de los procesos

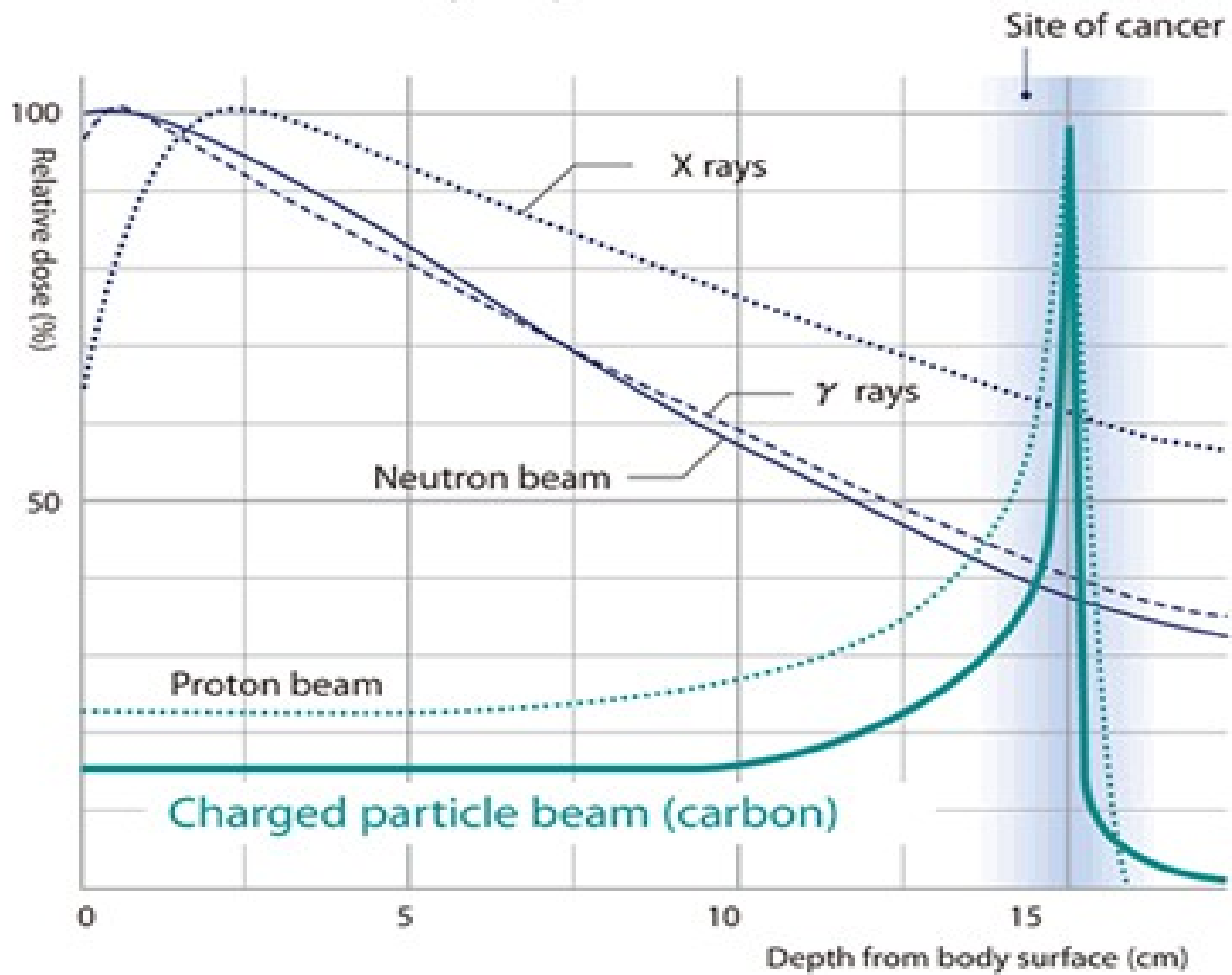


La probabilidad de que se produzca una u otra interacción en un material determinado se representa mediante la *sección eficaz* (*Probabilidad por unidad de longitud recorrida dentro del medio*). Es posible calcularla teóricamente (Diagramas de Feynman) y es ampliamente verificada en forma experimental.



<Fig. 2>

Distribution of depth versus dose for various types of radiation in the living body



Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes

Magnitudes

Dosis absorbida: es la cantidad de energía que deposita la radiación por unidad de masa irradiada. Se mide en grays ($\text{Gy} = \text{J/Kg}$)

Dosis equivalente: es la que se obtiene multiplicando la dosis absorbida por un factor que hace referencia al tipo de radiación. Se mide en sievert (Sv).

$$H_T = \sum_{Rad} w_R Dosis$$

Tipo de radiación	W_R
Fotones de todas las energías	1
Electrones y muones, todas las energías	1
Neutrones con energías, <10 keV 10 keV a 100 keV >100 keV a 2 MeV >2 MeV a 20 MeV >20 MeV	5 10 20 10 5
Protones, salvo los de retroceso, de energías mayores que 2 MeV	5
Partículas alfa, fragmentos de fisión y núcleos pesados	20

Dosis efectiva: es la que se obtiene multiplicando la dosis equivalente por un factor que hace referencia al órgano que fue radiado. También se mide en sievert (Sv).

$$E_T = \sum_T w_T H_T$$

Tejido u órgano	w_T
Gonadas	0,20
Médula ósea (roja)	0,12
Colon	0,12
Pulmón	0,12
Estómago	0,12
Vejiga	0,12
Mamas	0,05
Hígado	0,05
Esófago	0,05
Tiroides	0,05
Piel	0,01
Superficie ósea	0,01
Resto	0,05

Exposición (definida para RX y gamma): es el cociente entre la suma de todas las cargas de un mismo signo (ΔQ) que se producen en una masa (Δm) de aire, cuando todos los electrones liberados por los fotones son frenados. Se mide en C/Kg.

Kerma (**k**inetic **e**nergy **r**eleased in **m**aterial): es una magnitud definida para fotones y neutrones y representa la energía cinética inicial de todas las partículas cargadas liberadas por la radiación por unidad de masa irradiada. Se mide en grays (Gy).

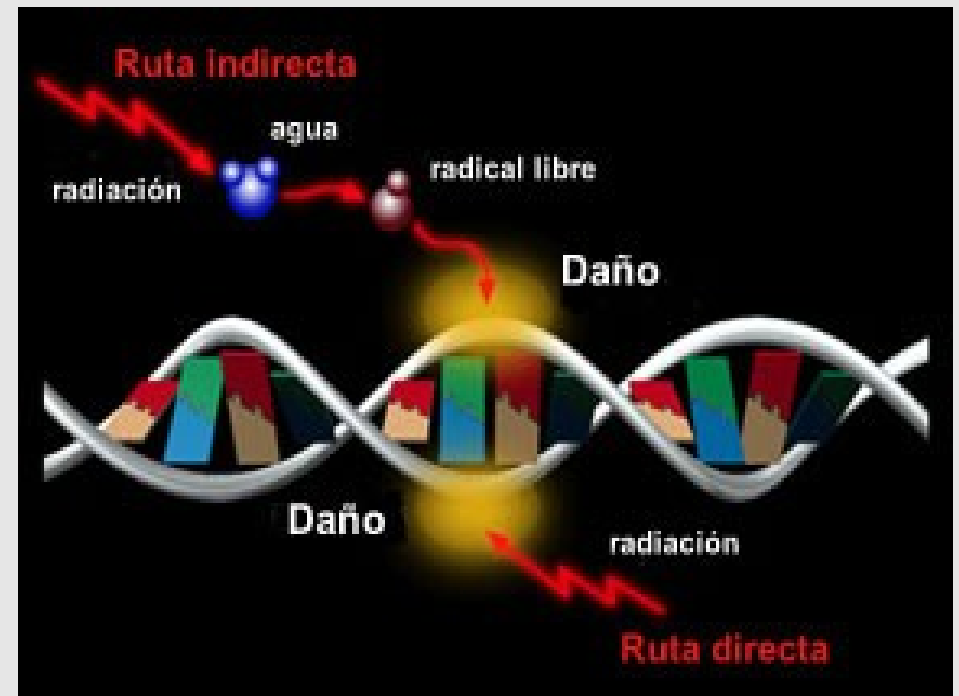
- Para fotones de baja energía se aproxima numéricamente a la dosis absorbida.
- Para fotones de alta energía difiere de la dosis absorbida por bremsstrahlung y porque se deposita energía fuera de la zona de interés.

Las radiaciones ionizantes pueden *excitar* y *ionizar* los átomos y moléculas que componen la materia.

Las partículas producidas en la ionización se llaman *partículas secundarias* y pueden a su vez repetir el proceso.

Clasificación:

- Daño directo: la radiación daña a la molécula de ADN
- Daño indirecto: la radiación ioniza las moléculas de H_2O generando radicales libres



Efecto:

- Subletal: célula se autorepara
- Letal: célula muere

Efectos dependen de:

- Dosis
- Fraccionamiento de la dosis
- Radiosensibilidad :
 - velocidad de reproducción
 - fase del ciclo de división
 - contenido de oxígeno
 - presencia de radioprotectores

Efectos determinísticos

Son los que necesitan de una cantidad de radiación umbral y su severidad depende de la cantidad de radiación recibida. Se presentan rápidamente después de la exposición.

Ej: enrojecimiento de la piel, las cataratas y la esterilidad.

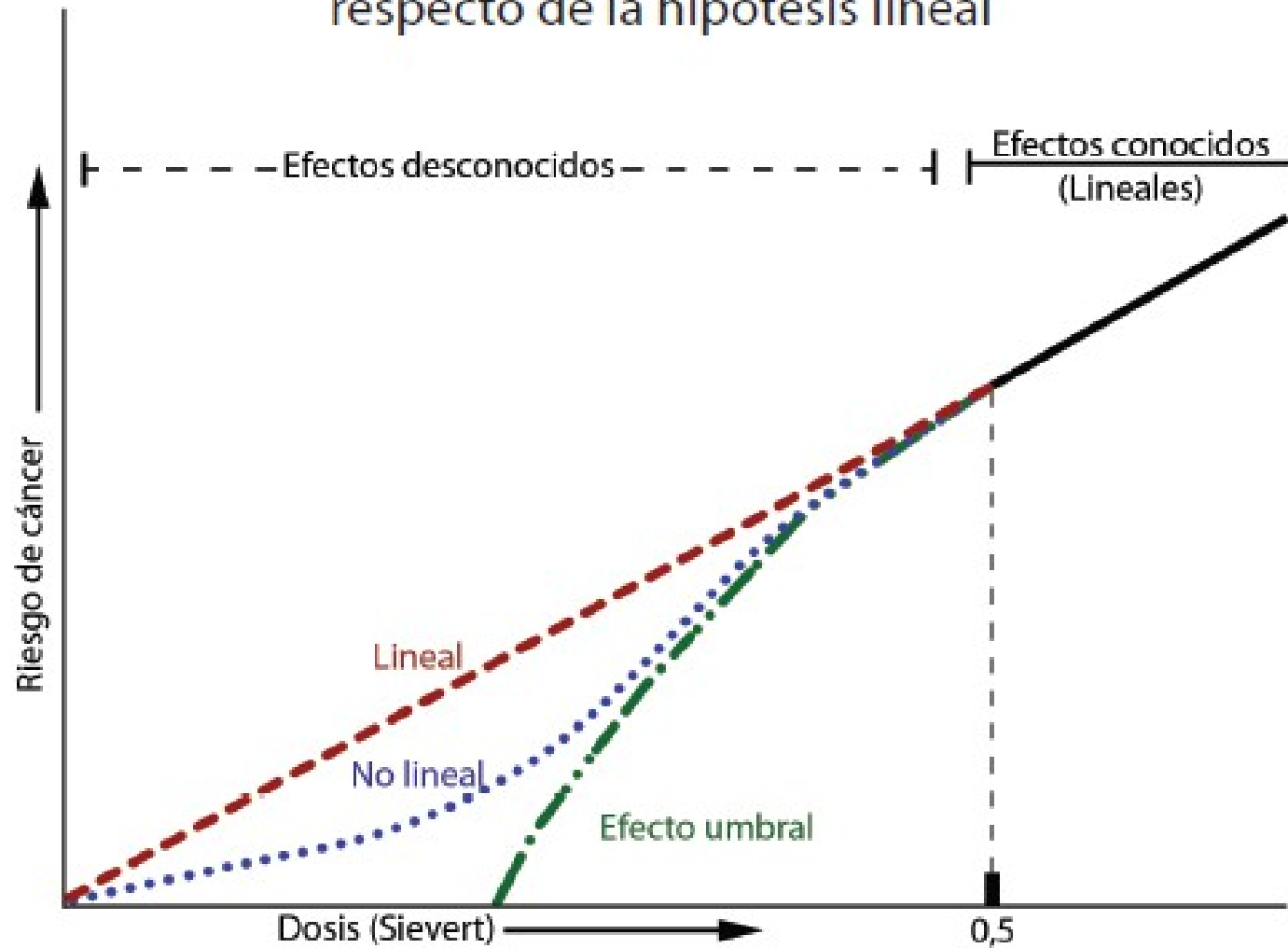
Efectos estocásticos

Son los que no necesitan de una cantidad mínima de radiación. La **probabilidad** de su aparición depende de la cantidad de radiación recibida, pero no su gravedad.

Pueden ser: - somáticos
- hereditarios

El ejemplo más conocido es el cáncer.

Diferentes posibilidades a bajas dosis respecto de la hipótesis lineal



La hipótesis lineal es la proporcionalidad entre la dosis y el exceso de cáncer

Exposición anual a fuentes de radiación

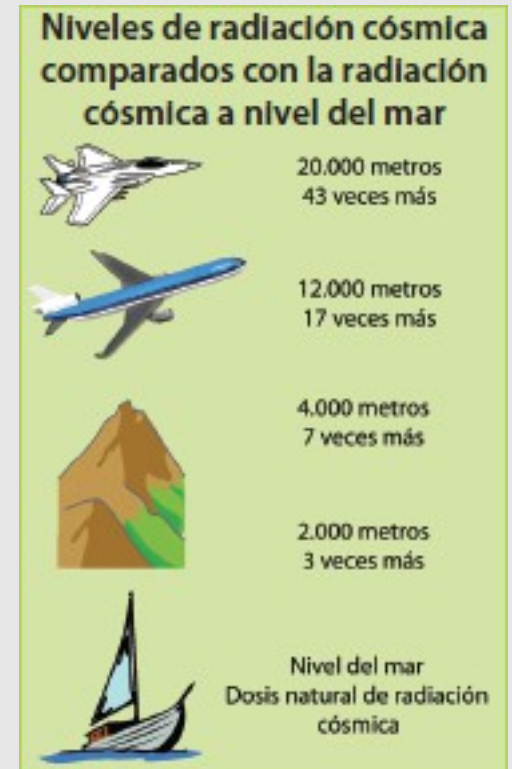
Fuentes naturales	Porcentaje de la radiación anual
Radiación cósmica	14%
Radiación terrestre	18%
Radiación interna	11%
Radón	43%
Total	86%

Fuentes artificiales	Porcentaje de la radiación anual
Médicas	14%
Ensayos nucleares	0,2%
Chernobyl	0,07%
Centrales nucleares	0,01%
Total	~14%

Dosis anual de radiación ≈ 3 mSv

Rayos cósmicos

Radiación proveniente del espacio
Compuesta por: protones, partículas alfa y electrones entre otras. Estas partículas interaccionan fuertemente con la atmósfera y a la tierra principalmente llegan neutrones, muones, positrones y fotones.



Dosis máximas de diferentes estudios y comparación con la dosis anual de radiación

Estudio	Dosis en Sv	Porcentaje de la dosis anual
Placa dental	0,0001	4%
Placa de tórax	0,0001	4%
Mamografía	0,001	36%
Tomografía de cabeza	0,005	180%
Tomografía de tórax	0,01	360%
Cateterismo cardíaco	0,05	1800%

Riesgo de cáncer por radiación

Fuente de radiación	Probabilidad de contraer cáncer
Rayos X de tórax o dental Habitantes cercanos a central nuclear	1 en 60.000
Rayos X de abdomen o columna Mamografía	1 en 6.000
Tomografía de cráneo Dosis anual Diagnóstico en medicina nuclear	1 en 1.200
Tomografía de tórax o abdomen	1 en 600
Cateterismo cardíaco	1 en 120

¿Es necesario tomar precauciones a la hora de exponerse a la radiación?

Sí. Es necesario tomar precauciones y utilizarlas correctamente, siguiendo los protocolos y en forma supervisada .

Para ello existe la ICRP (**C**omisión **I**nternacional de **P**rotección **R**adiológica) que es una organización científica no gubernamental que publica recomendaciones de protección frente a las radiaciones ionizantes.

En Uruguay existe un organismo estatal, la ARNR (**A**utoridad **R**eguladora **N**acional en **R**adioprotección), con sede en el MIEM. Esta trabaja en base a las recomendaciones publicadas por la ICRP y por la IAEA (**A**gencia Internacional para la **E**nergía **A**tómica).

La ARNR es quién establece un marco regulador para la utilización de radiaciones ionizantes (compra de equipos y material radioactivo, habilitación de salas para diagnóstico y tratamiento, revisión del cálculo de blindaje y su colocación, control de equipos, establecimiento de límites de dosis, control de la dosis de radiación recibida por personal expuesto, deposición de desechos nucleares).

Radioprotección: es la disciplina que establece las recomendaciones que se deben tomar al estar expuesto las radiaciones ionizantes.

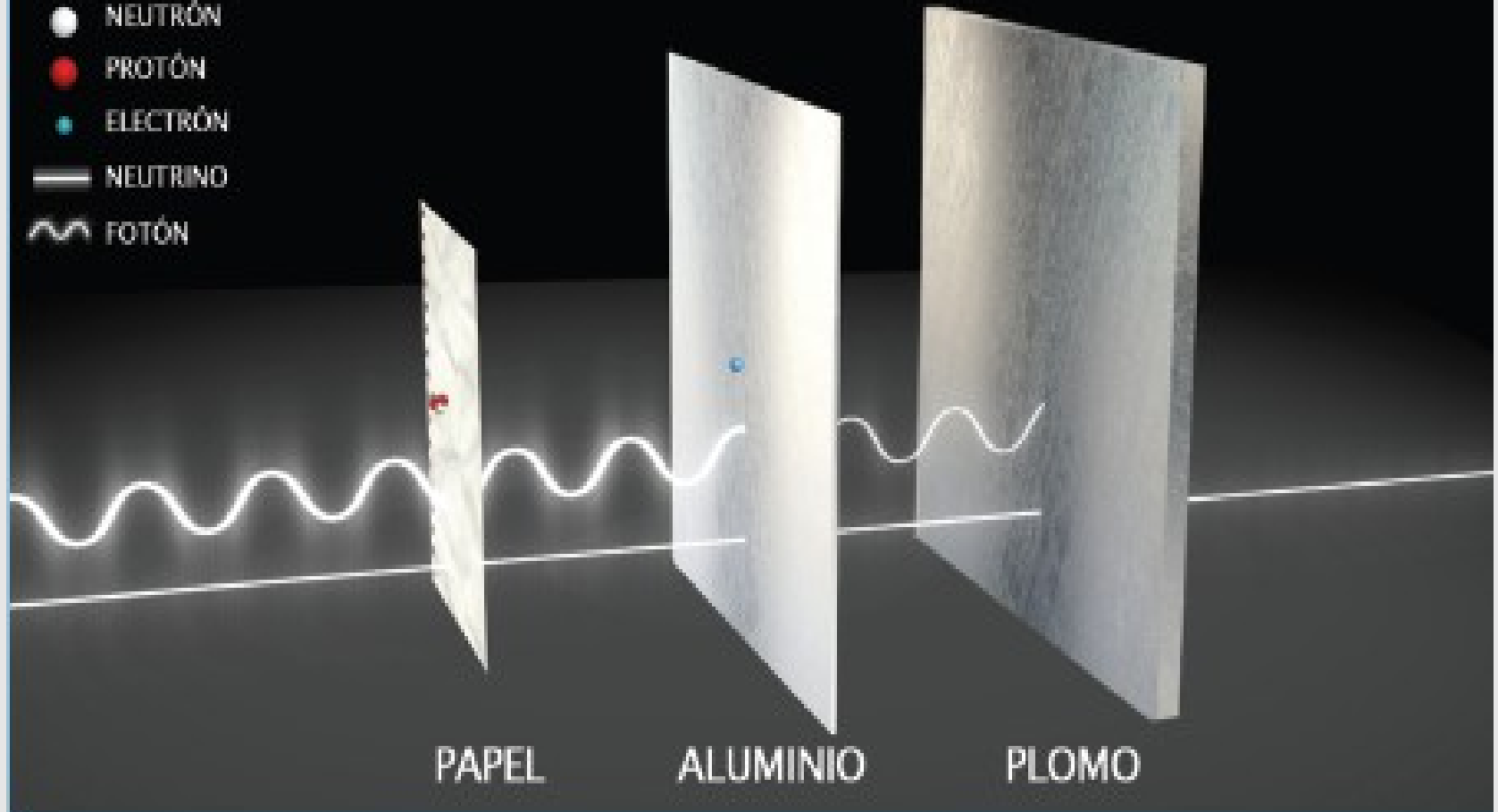
Principios básicos de radioprotección:

- Justificación de la práctica.
- Optimización de la protección.
- Aplicación de los límites de dosis individuales.

Límites de dosis

	Área controlada	Área no controlada
Límite de dosis anual	20 mSv/año	1 mSv/año
Extremidades, superficie de la piel	500 mSv/año	50 mSv/año
Cristalino del ojo	20 mSv/año	20 mSv/año

-  PARTÍCULA ALFA
-  NEUTRÓN
-  PROTÓN
-  ELECTRÓN
-  NEUTRINO
-  FOTÓN



La radiación alfa y la radiación beta son poco penetrantes. Son una fuente importante de irradiación interna y los modelos de dosimetría interna son los que permiten estudiar su diseminación dentro del organismo.

La radiación gamma es muy penetrante y es por este motivo que es necesario realizar el cálculo de blindaje adecuado para cada recinto, colocar el blindaje correctamente y que este sea verificado por las autoridades pertinentes.

¿Cómo se puede disminuir la dosis recibida?

(ALARA: **A**s **L**ow **A**s **R**easonably **A**chievable)

Disminuyendo el tiempo de exposición.

Aumentando la distancia al emisor.

Ajustando correctamente los parámetros técnicos.

Manteniendo los equipos debidamente calibrados

Interponiendo blindajes.

Blindaje

Sala de rayos X (convencional, fluoroscopia, TC, intervencionismo, mamografía, etc.).

Sala de radiografía dental.

Salas de radioterapia.

Instalaciones de medicina nuclear.

Radioisótopos (producción, transporte, almacenamiento, dispensación)

Instalaciones de PET/CT.

Instalaciones industriales.

Materiales para blindaje

Hormigón / Hormigón baritado.

Ladrillo (campo, prensa), ticholo.

Plomo, acero.

Yeso / Yeso baritado

Vidrio plomado / Vidrio laminado.

Polietileno boratado al 5%

Colocación

Láminas: generalmente hasta una altura de 2,1m respecto del piso

Entre láminas metálicas adyacentes debe haber al menos 1cm de superposición.

Los marcos blindados de ventanas deben superponerse con la mampostería.

Generalmente es necesario blindar los marcos de las puertas y superponer con la mampostería.

Fuente puntual de radiación gamma

$$\dot{D} = \frac{1,27 \cdot 10^{-6} E A}{d^2} \quad \text{:Tasa de dosis en aire (Gy/s)}$$

A es la actividad de la fuente (número de desintegraciones por segundo que ocurren en un material que contiene radionucleídos), medida en curie (Ci),

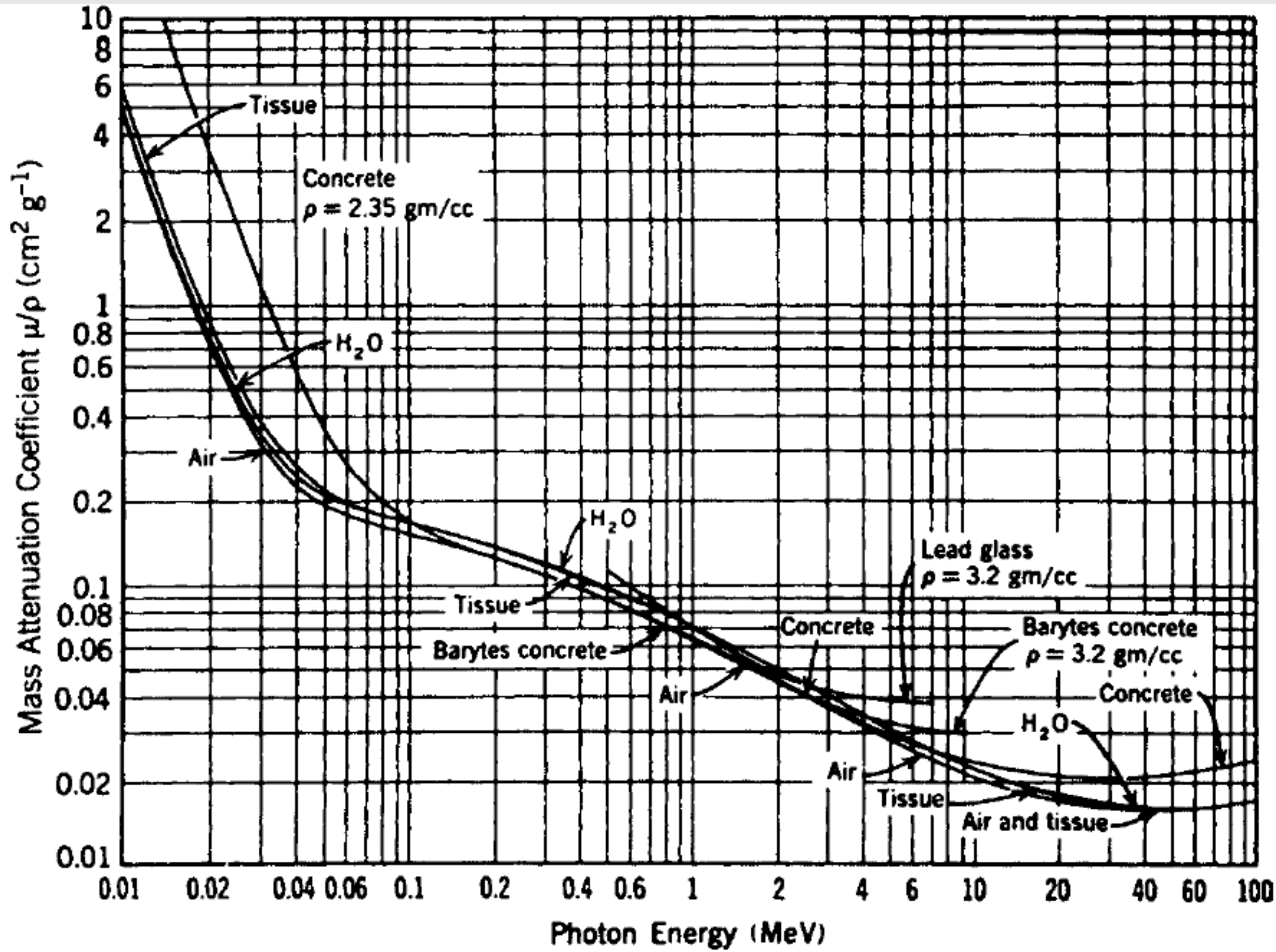
E es la energía en MeV de los fotones,

d distancia en m

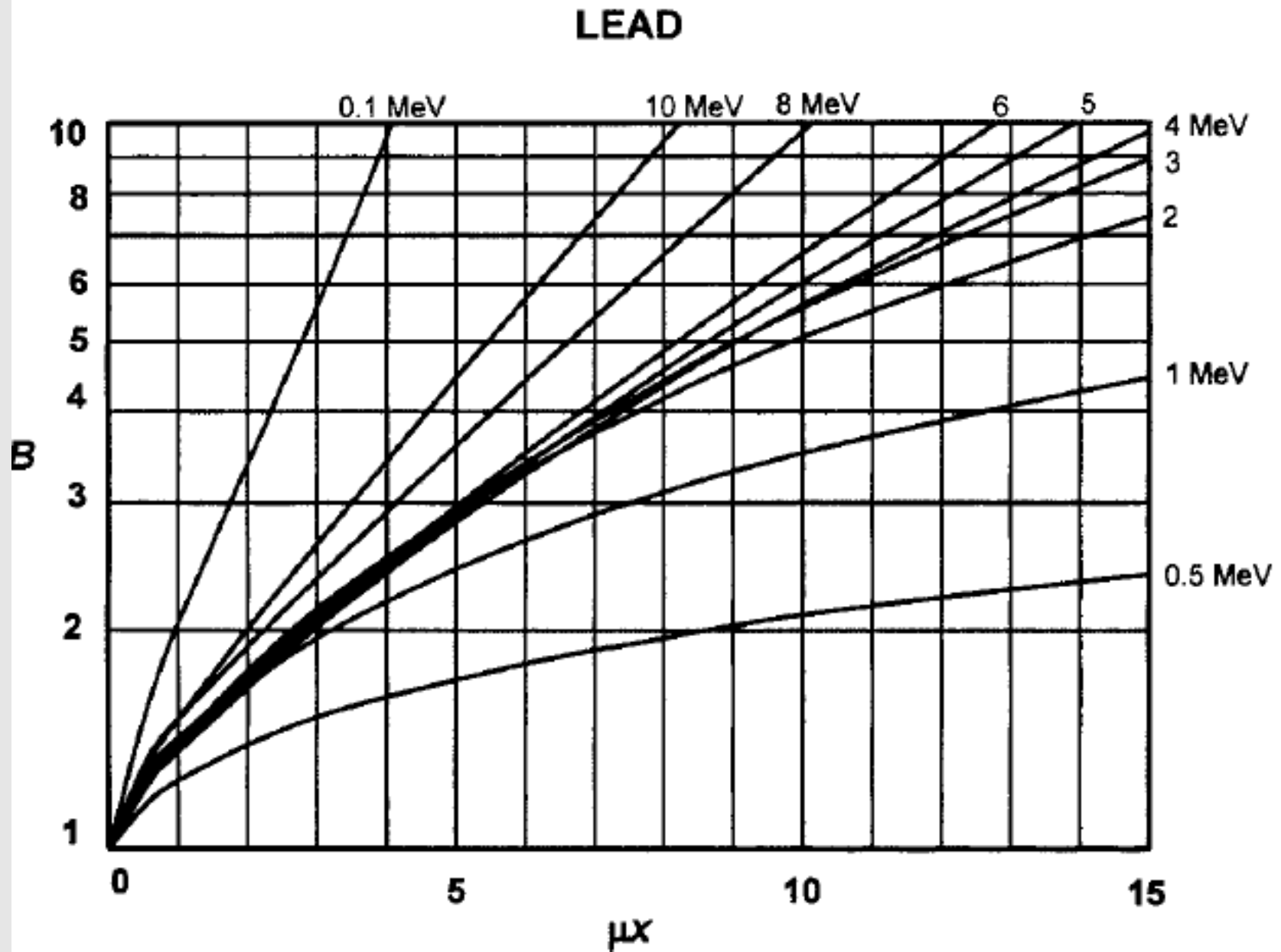
Atenuación

$$\dot{D}_p = B(\mu x, E) \dot{D}_{p,0} e^{-\mu x}$$

Donde μ es el coeficiente de atenuación lineal que depende del material, x es el espesor del material y $B(\mu x, E)$ el factor de “*buildup*”.



Factor de "Build up"



HVL (Half Value Layer)

- Es el espesor de material blindante que reduce a la mitad la dosis de radiación en un punto.

Depende del material y la energía de los fotones incidentes.

Para un haz de radiación

monoenergético:

$$HVL = \frac{L_2}{\mu}$$

<http://radiaciones.fisica.edu.uy/>



Fin