



ESCUELA TÉCNICO PROFESIONAL
EN CIENCIAS DE LA SALUD
clínica mompía

ASIGNATURA: Fundamentos Físicos y Equipos

TEMA 1: Caracterización de las radiaciones y las ondas

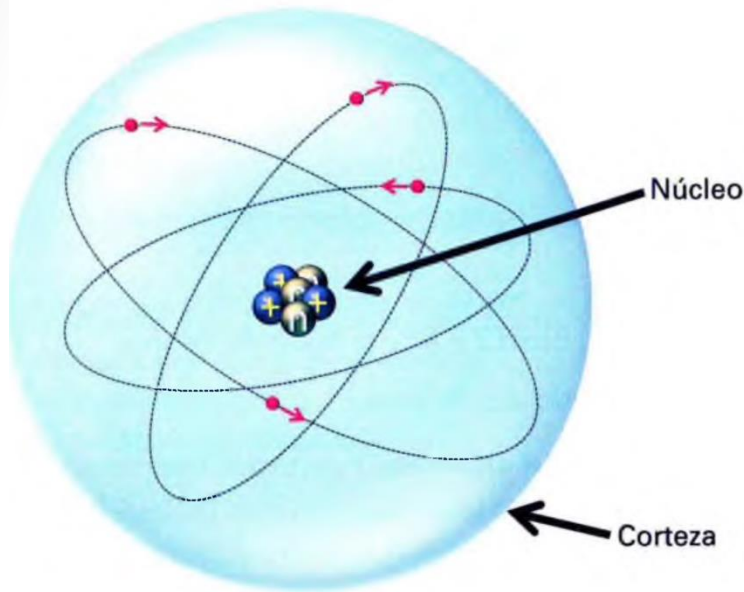
PROFESOR: Jérica Sánchez Mazón

*Ciclo Formativo de Grado Superior
Imagen para el Diagnóstico y
Medicina Nuclear
Radioterapia y Dosimetría*

ÍNDICE

- RADIACIÓN IONIZANTE Y NO IONIZANTE
- RADIACIÓN EM Y DE PARTÍCULAS
- ONDAS MATERIALES Y ULTRASONIDOS
- MAGNETISMO Y APLICACIONES EN LA OBTENCIÓN DE IMÁGENES DIAGNÓSTICAS
- APLICACIONES DE LAS RRII EN RT E IMAGEN PARA EL DIAGNÓSTICO
- APLICACIÓN DE LAS RADIACIONES NO IONIZANTES Y LAS ONDAS MATERIALES EN RT E IMAGEN PARA EL DIAGNÓSTICO
- UNIDADES Y MAGNITUDES

Estructura atómica de la materia

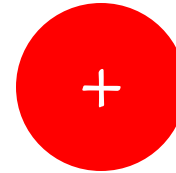


- Un átomo es la partícula más pequeña que forma cualquier sustancia y que posee **propiedades químicas bien determinadas**.
- Pueden combinarse con otros átomos para formar **moléculas**.
- Los átomos son muy pequeños, su diámetro es del orden de 10^{-10} m.
- Están formados por partículas de menor tamaño distribuidas en dos partes claramente diferenciadas: **núcleo y corteza**



El núcleo

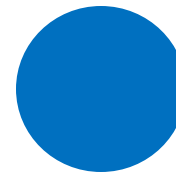
- El núcleo alberga casi la totalidad de la masa del átomo (99,9 %) aunque su tamaño es diminuto, unas 10.000 veces más pequeño.
- En su interior se encuentran dos tipos de partículas diferentes: los **protones** y los **neutrones** → **NUCLEONES**



Protón

$$Q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$Z = \text{n}^\circ \text{ de protones}$
(n° atómico)



Neutrón

$$Q = 0$$

A (Número másico) = **Protones** + **Neutrones**



Isótopos

- Átomos con el mismo número de protones pero distinto número de neutrones.
- Tienen las mismas propiedades químicas y por tanto **son del mismo elemento**, aunque tienen masas diferentes.

Ejemplo

El hidrógeno es elemento químico con el núcleo más ligero: tiene un solo protón. Sin embargo, tiene tres isótopos: el hidrógeno sin neutrones, el deuterio con un neutrón y el tritio con dos. ¿Cuáles son sus números Z , A y sus símbolos atómicos?

Para el hidrógeno, $Z = 1$ y $A = 1 + 0 = 1$. Símbolo ^1H .

Para el deuterio, $Z = 1$ y $A = 1 + 1 = 2$. Símbolo ^2H .

Para el tritio, $Z = 1$ y $A = 1 + 2 = 3$. Símbolo ^3H .

Desintegración

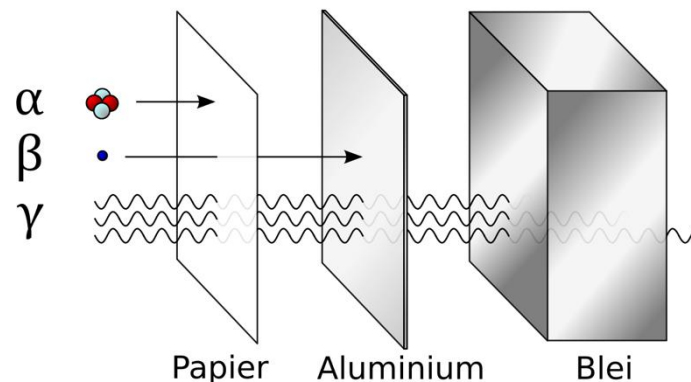
- Algunos núcleos no pueden mantenerse unidos a lo largo del tiempo y tarde o temprano acaban por **romperse emitiendo radiación**.



DESINTEGRACIÓN

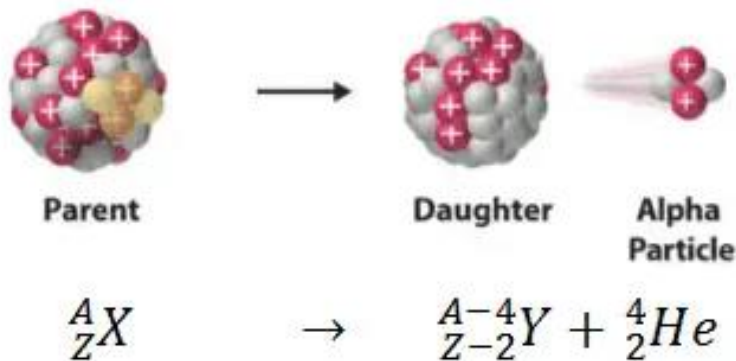


Núcleos inestables o RADIATIVOS



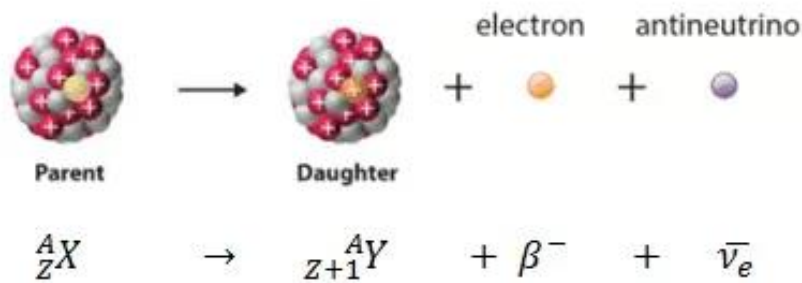
Desintegración

DESINTEGRACIÓN ALFA:



- Núcleo de He (2p+2n)
- Propia de núcleos pesados ($A > 150$)
- Poco penetrantes pero muy ionizantes

Desintegración

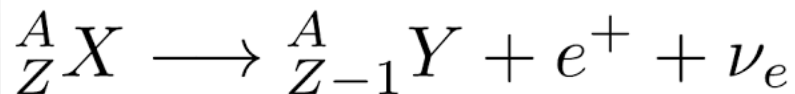


DESINTEGRACIÓN BETA $-$:

- Electrones de la corteza
- Más penetrante que la alfa pero menos ionizante
- Elementos distribuidos por toda la tabla periódica

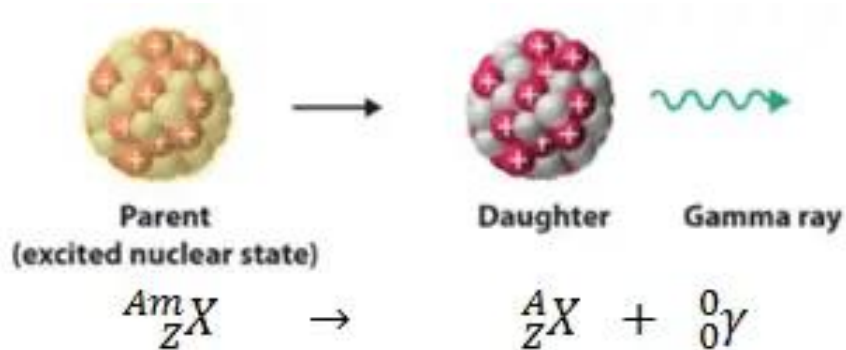
DESINTEGRACIÓN BETA $+$:

- Positrones
- Más penetrante que la alfa pero menos ionizante
- Elementos distribuidos por toda la tabla periódica



Desintegración

DESINTEGRACIÓN GAMMA:



- Radiación EM de alta energía
- Reorganizaciones internas del núcleo
- Suele seguir a una desintegración de otro tipo

ACTIVIDAD:

nº de transformaciones nucleares por unidad de tiempo
(Bequerelio=Bq= nº transformaciones/s)

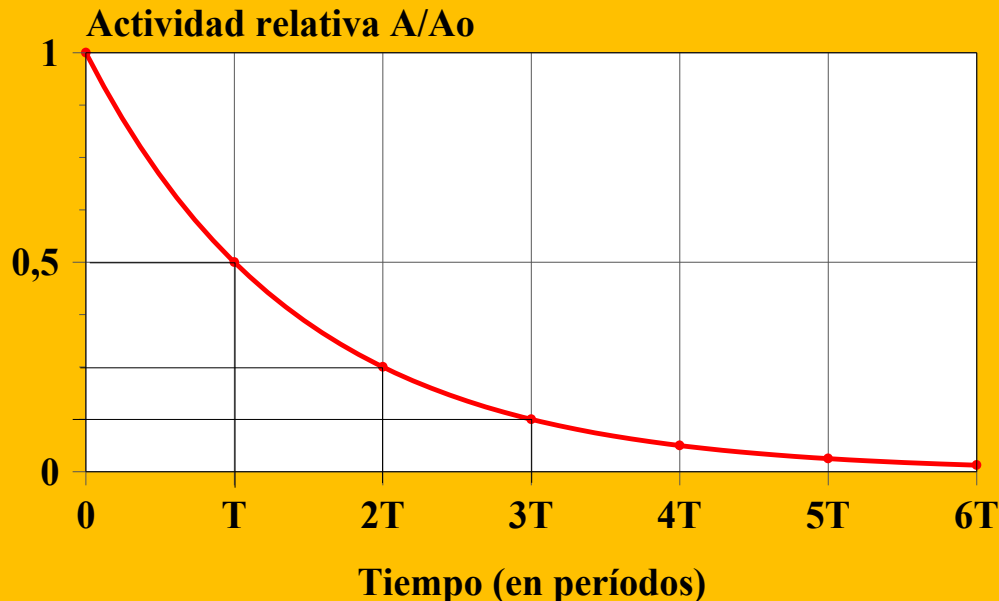
$$A = N \times \lambda$$



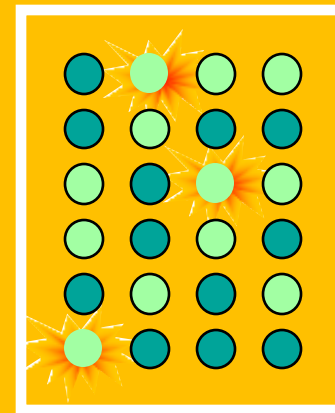
λ = probabilidad de que un átomo se desintegre por unidad de tiempo;

N = nº átomos

Comportamiento exponencial



$$A = A_0 e^{-(\lambda.t)}$$



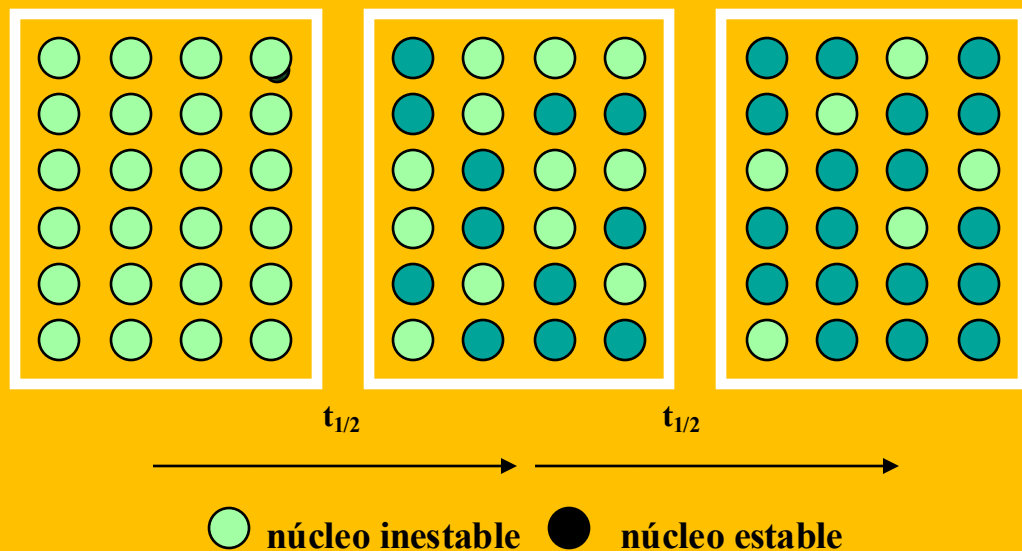
● núcleo estable

○ núcleo inestable

● núcleo inestable transformándose

PERIODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN:

Ritmo de desintegración: tiempo que ha de transcurrir para que la actividad de la muestra decaiga a la mitad



$$T_{1/2} = \ln(2) / \lambda$$

A mayor λ menor $t_{1/2}$
A menor λ mayor $t_{1/2}$

^{232}Th (torio)

$T_{1/2} = 14.000 \text{ M. de años}$

^{222}Rn (radón)

$T_{1/2} = 4 \text{ días}$

^{137}Cs (cesio)

$T_{1/2} = 30,2 \text{ años}$

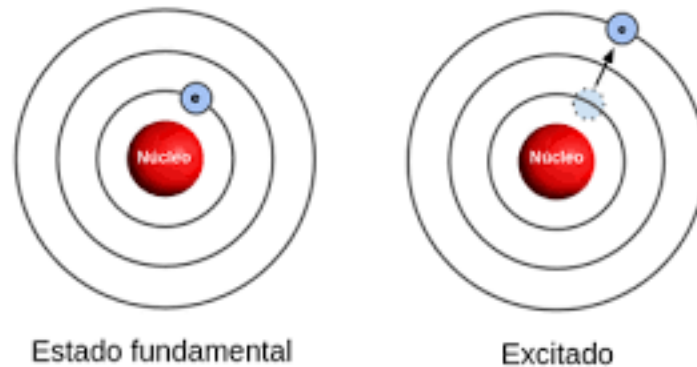
^{124}In (indio)

$T_{1/2} = 3 \text{ segundos}$

^{60}Co (cobalto)

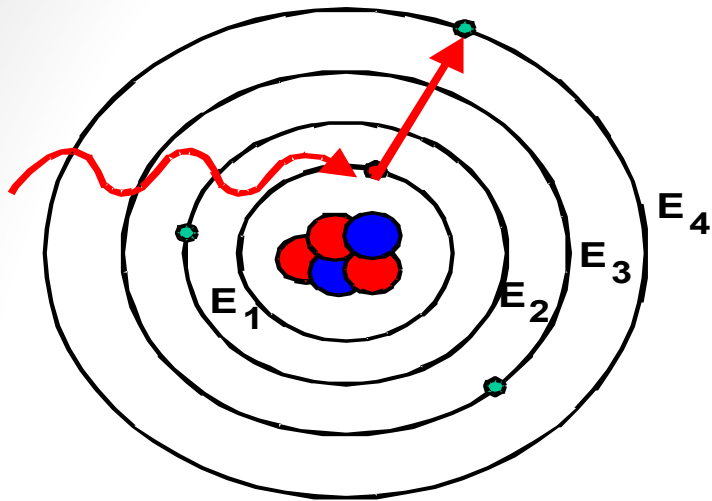
$T_{1/2} = 5,26 \text{ años}$

La corteza atómica



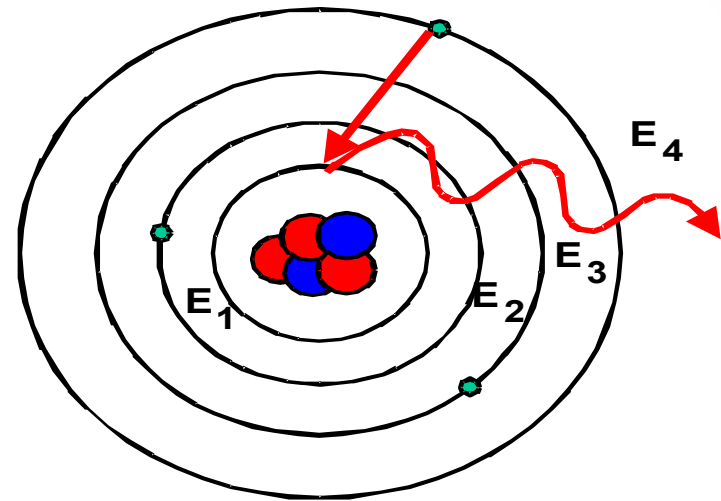
Cuando un átomo no es perturbado externamente, los electrones ocupan siempre las **capas más cercanas al núcleo**. Se dice que el átomo está en su **estado fundamental**.

1	1s ²	2
2	2s ² 2p ⁶	8
3	3s ² 3p ⁶ 3d ¹⁰	18
4	4s ² 4p ⁶ 4d ¹⁰ 4f ¹⁴	32
5	5s ² 5p ⁶ 5d ¹⁰ 5f ¹⁴	32
6	6s ² 6p ⁶ 6d ¹⁰ 6f ¹⁴	32
7	7s ² 7p ⁶ 7d ¹⁰ 7f ¹⁴	32



EXCITACIÓN: Absorción de energía

$$E_4 - E_1 = h \cdot \nu$$



DESEXITACIÓN: Emisión de energía

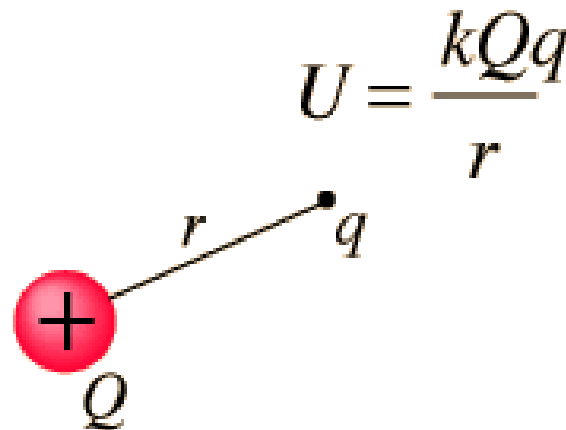
$$E_4 - E_1 = h \cdot \nu$$

Átomo excitado: el electrón está en niveles energéticos superiores

El átomo se desexcitará -un electrón de un nivel energético superior pasa a ocupar la vacante en el nivel energético inferior- **emitiendo un fotón de energía** igual a la diferencia de energía de los niveles inicial y final.

La energía potencial eléctrica de un electrón que gira a una distancia r de un núcleo con número atómico Z se calcula con la fórmula:

$$U = \frac{9 \times 10^9 \cdot Z \cdot (1.602 \times 10^{-19})^2}{r} \quad (1)$$



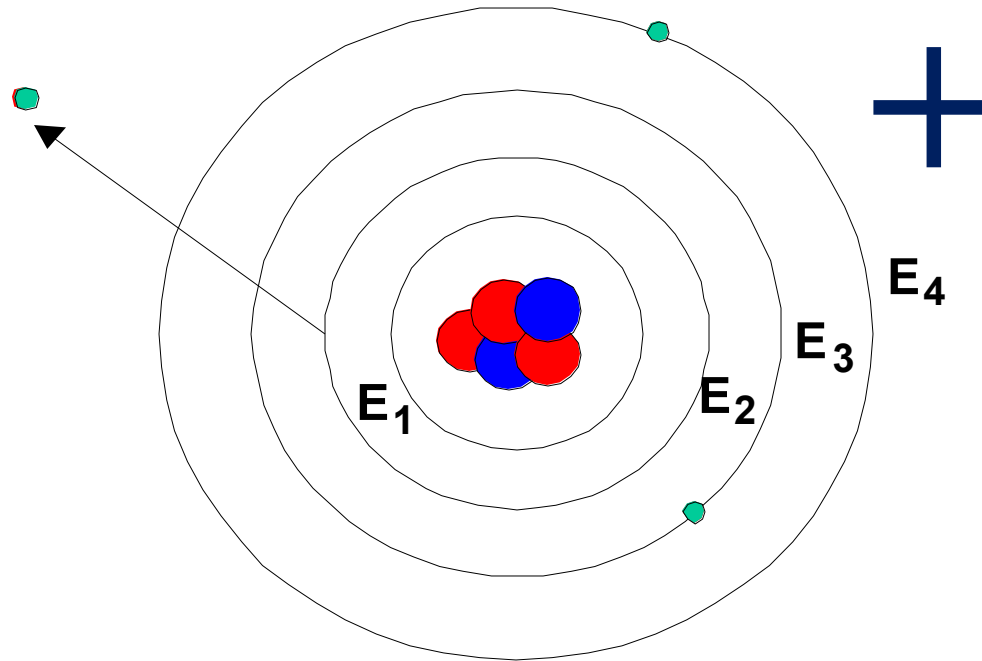
La energía necesaria para provocar la excitación de un electrón y que salte de una capa con energía U_1 a una capa más alta con energía U_2 tiene un valor:

$$E = U_2 - U_1$$

En el caso de que la energía de la radiación incidente tenga una energía **superior** al valor de la energía potencial del electrón, se producirá una **ionización** y el electrón saldrá despedido con una **energía cinética** igual a la diferencia de los dos valores.

$$K = \frac{1}{2} m \cdot v^2 (2)$$

IONIZACIÓN: ÁTOMO IONIZADO



Átomo ionizado: un electrón adquiere energía suficiente (potencial de ionización) y se escapa del átomo.

El **átomo** queda cargado **positivamente**.

UNIDADES EN FÍSICA ATÓMICA

MASA		DIMENSIONES		Mili = 10^{-3} Micro = 10^{-6} Nano = 10^{-9} Pico = 10^{-12} Fermi = 10^{-15}
Neutrón	$\sim 1,008 \text{ u.m.a.} = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	Átomos	10^{-10} m	
Protón	$\sim 1,007 \text{ u.m.a.} = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	Núcleo	10^{-15} m	
Electrón	$1/1836 \text{ u.m.a.} = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$			

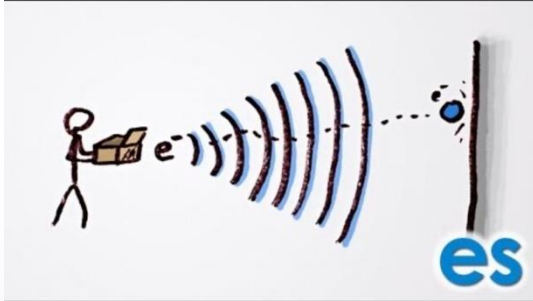
1 u.m.a. = Unidad atómica de masa = $1/12$ átomo ^{12}C (Carbono con 6 p + 6 n)

Energía			Kilo = 10^3 Mega = 10^6 Giga = 10^9
Electronvoltio	eV		
Kiloelectronvoltio	KeV	$1000 \text{ eV} = 10^3 \text{ eV}$	
Megaelectronvoltio	MeV	$1000000 \text{ eV} = 10^6 \text{ eV}$	
Gigaelectrovoltio	GeV	$1000000000 \text{ eV} = 10^9 \text{ eV}$	

1 eV = energía cinética que adquiere un e, inicialmente en reposo, cuando se le somete a una **diferencia de potencial de 1 voltio**.

Radiación EM y de partículas

La energía se transmite a distancia por medio de la radiación, que puede ser de dos naturalezas distintas: **ondas y partículas.**



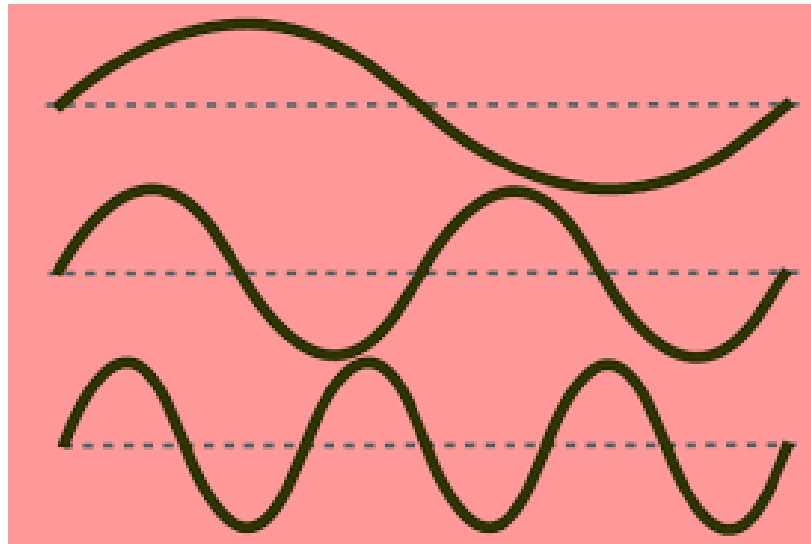
Radiación ondulatoria

Las ondas son perturbaciones que se transmiten a distancia sin que haya transporte de materia.

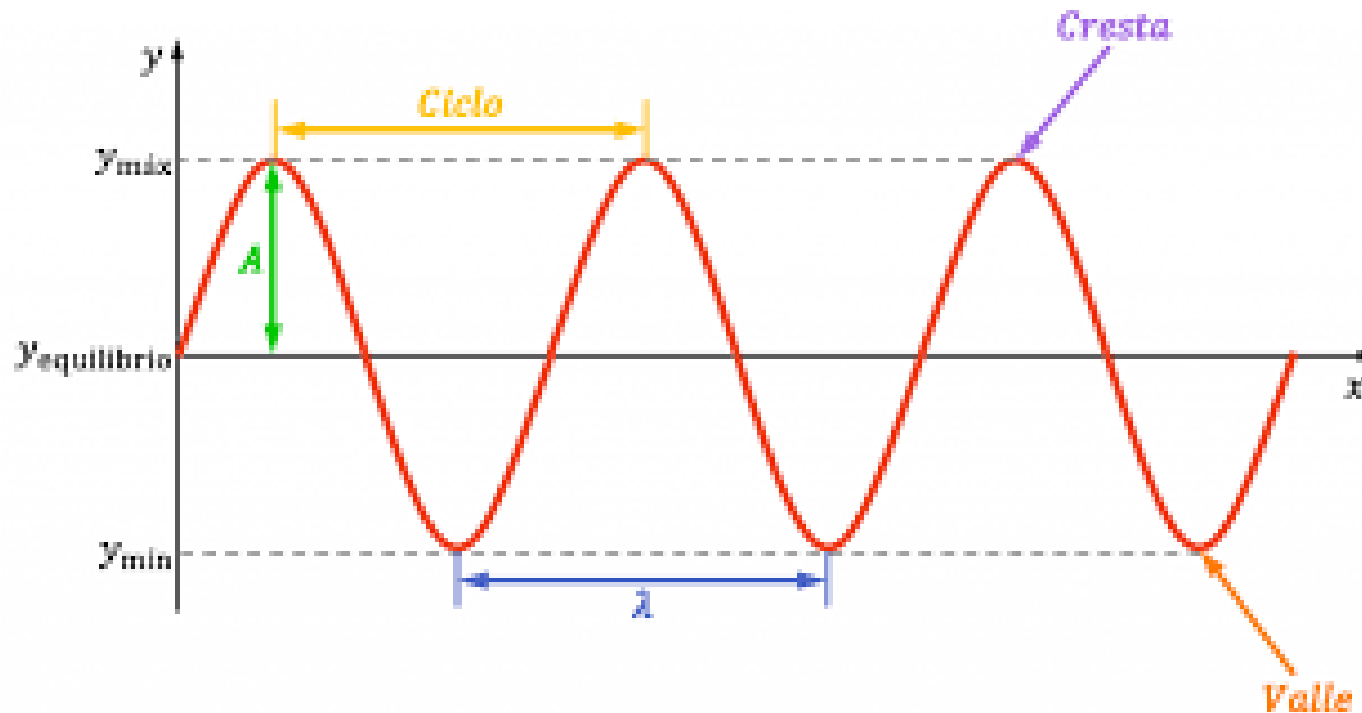
- **Ondas materiales:** solo pueden transmitirse a través de **medios materiales**, como el sonido o las olas del mar.
- **Ondas electromagnéticas:** no necesitan de un medio físico para desplazarse, y que por tanto pueden hacerlo también en el **vacío**.

Ondas periódicas

- La perturbación se repite a lo largo del tiempo.
- Los **ultrasonidos** y las **ondas electromagnéticas de uso en radioterapia e imagen** para el diagnóstico pertenecen a este tipo de ondas.



Caracterización de las ondas periódicas



Caracterización de las ondas periódicas

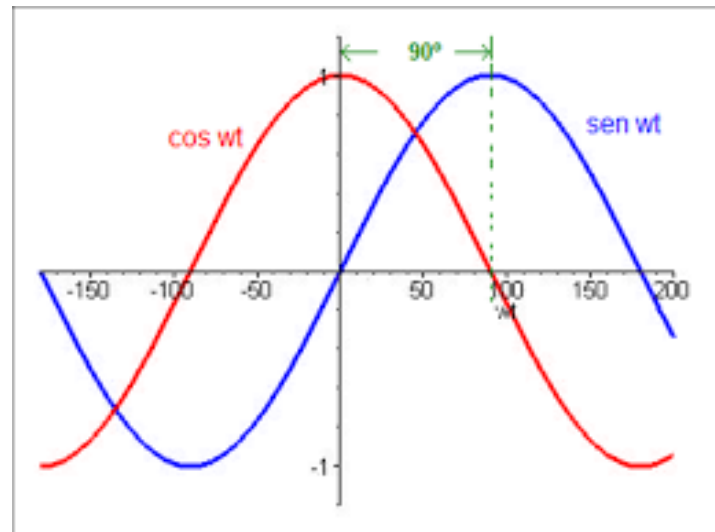
- **Longitud de onda (λ):** Distancia que separa dos puntos que estén en el mismo estado de oscilación en un instante de tiempo, esto es, la distancia que separa dos crestas consecutivas, o dos valles, etc. Sus unidades serán de longitud (metros en el SI).
- **Frecuencia (f):** Número de repeticiones de la perturbación por unidad de tiempo. Sus unidades en el SI son los hercios (Hz). Un hercio es la frecuencia de una onda que tiene un periodo de 1 s ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$).
- **Periodo (T):** Tiempo que tarda en repetirse la perturbación. Se mide en segundos. El periodo y la frecuencia están relacionados por la expresión:

$$T = \frac{1}{f}$$

- **Velocidad de propagación:** Distancia recorrida por la onda en la unidad de tiempo. Sus unidades en el SI son m/s. $v = \lambda \cdot f$
- **Amplitud:** diferencia entre el valor máximo de la magnitud objeto de la perturbación en una cresta y el valor cero

Ondas armónicas

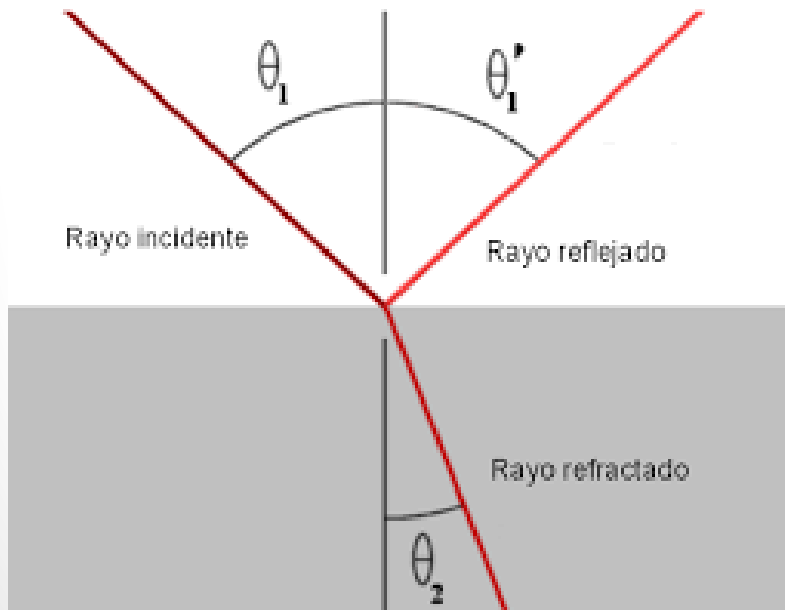
La perturbación transmitida sigue una **función sinusoidal** a lo largo del tiempo.



Cualquier onda puede ser representada como **combinación de ondas armónicas de diferentes frecuencias y amplitudes**, lo que facilita el estudio de su comportamiento y sus propiedades físicas.

Comportamiento de las ondas

La interacción de las ondas con el medio en el que se propagan produce diversos efectos que deben ser estudiados para conocer sus implicaciones en radioterapia y diagnóstico por la imagen.



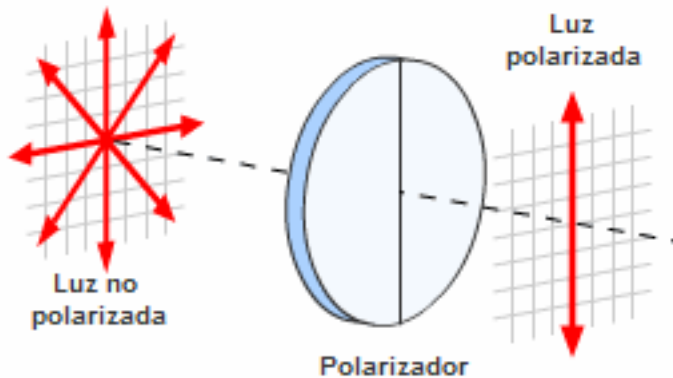
Reflexión: se produce en una onda al llegar a la interfase entre el medio del que procede y otro de densidad diferente. La onda **no penetra en el segundo medio** sino que vuelve a aquel por el que se propagaba.

$$\theta_1 = \theta_1'$$

Refracción: se produce al atravesar la interfase entre dos medios de distinta densidad. La onda penetra en el segundo medio pero **sufre una desviación en la dirección de propagación.**

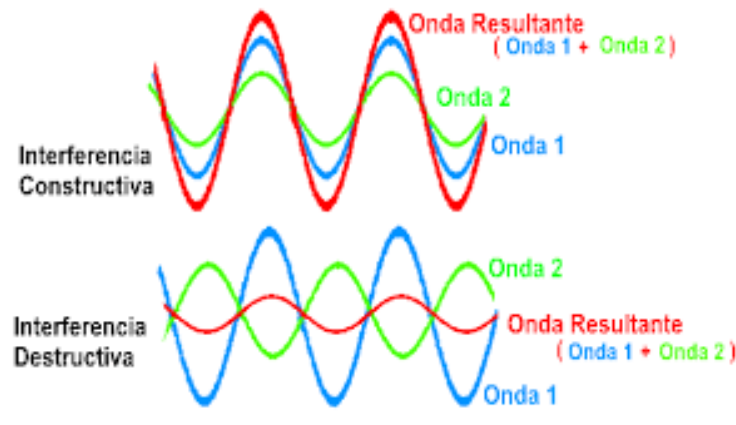
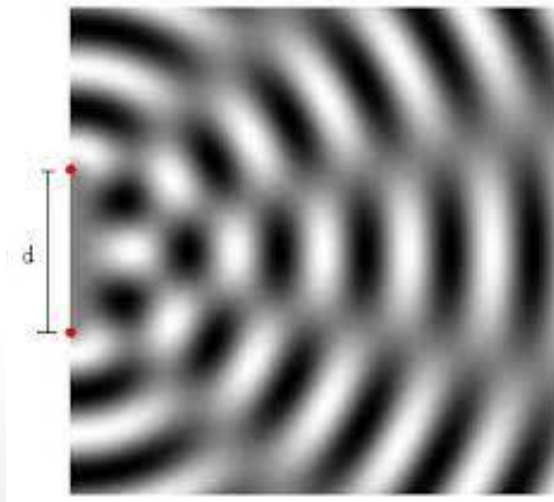
$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

Comportamiento de las ondas



Polarización: en este caso la oscilación solo puede darse en una dirección determinada del espacio.

Interferencia: se produce al coincidir dos ondas en el mismo punto del espacio. La perturbación es la suma algebraica de las dos oscilaciones en cada instante de tiempo.

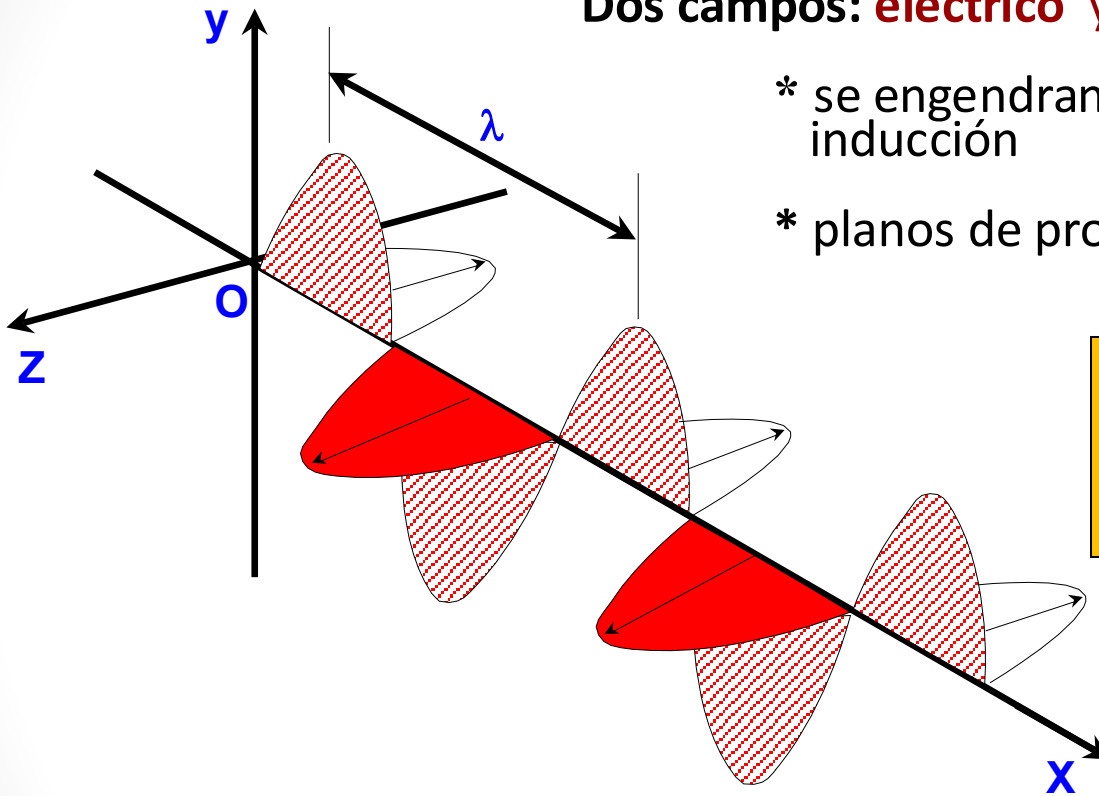


Radiación electromagnética

Dos campos: **eléctrico** y **magnético**

* se engendran secuencialmente por inducción

* planos de propagación perpendiculares.



$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

La **velocidad de propagación en el vacío** de tales ondas, **c**, es una constante fundamental, cuyo valor es aproximadamente: **$c = 3 \times 10^8$ m/s**

Radiación electromagnética

fotones o cuantos de radiación

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

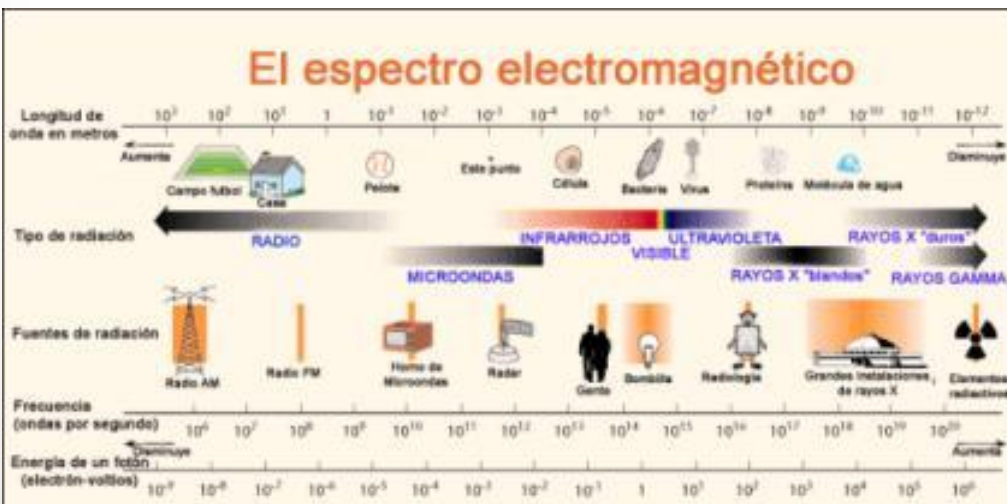
La **energía** que transporta un fotón es **proporcional** a la **frecuencia** de la onda asociada.

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$



El Espectro Electromagnético

A mayor energía de los fotones mayor frecuencia de la onda. Viajan a la velocidad de la luz.



Órdenes de magnitud de **la energía** que transportan los **fotones**:

Microondas: 0,0001-0,01 eV

Luz visible: 1 eV

Rayos X: 1.000-100.000 eV

Rayos gamma: 10.000-1.000.000 eV

La radiación **X** y **gamma** posee suficiente energía como para “**arrancar**” **electrones** a los átomos del medio de forma significativa: **radiaciones ionizantes**.

El Espectro Electromagnético

La **RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA** es un **transporte de energía** a través del espacio que puede ser interpretar de dos maneras (naturaleza dual):

- 1) como una **ONDA** combinación de un campo eléctrico y otro magnético
- 2) como pequeños paquetes (**FOTONES**) de energía, sin soporte material

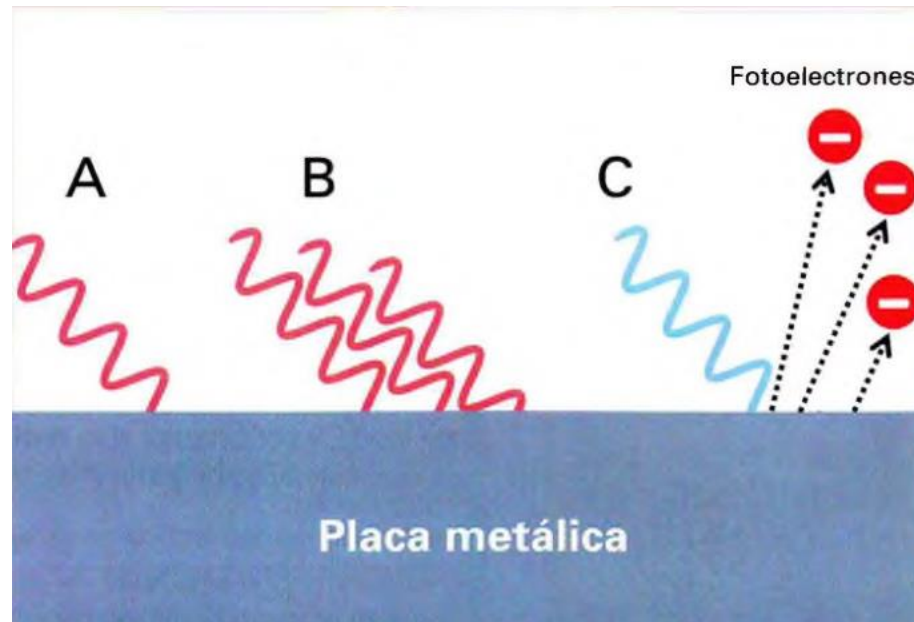
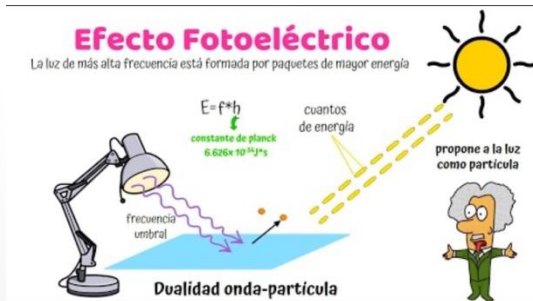
El comportamiento de la luz como una onda electromagnética explica la mayor parte de los fenómenos relacionados con ella. Sin embargo, existen algunos experimentos a los que la teoría ondulatoria no puede dar una explicación.

EFEECTO FOTOELÉCTRICO

El Espectro Electromagnético

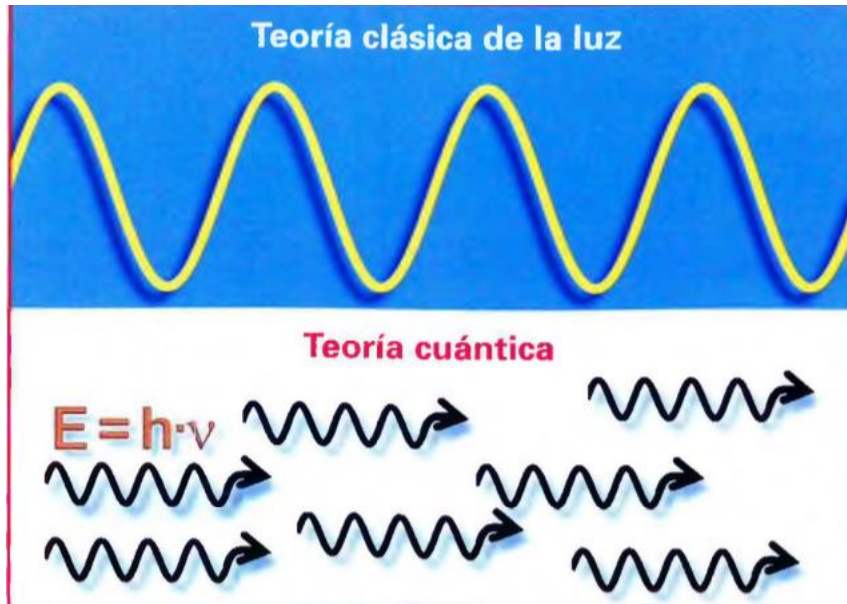
EFFECTO FOTOELÉCTRICO

- El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por parte de un material metálico al incidir radiación electromagnética sobre él.
- Si la luz tiene una frecuencia inferior a un **valor umbral**, no hay emisión sea cual sea la cantidad de radiación incidente.
- A partir del umbral, siempre se produce y la cantidad de electrones **solo** depende de la intensidad de la luz aplicada.



El Espectro Electromagnético

TEORÍA CUÁNTICA DE EINSTEIN DEL EF



1. La luz no es una onda continua, sino que está formada por "fragmentos" de onda, a los que Einstein llamó **fotones**.
2. Cada fotón está dotado de una energía fija, dependiente de la frecuencia de la onda, y de valor: $E = h \nu$

Donde h es la llamada constante de Planck y su valor es
 $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

La luz es una onda electromagnética que en determinadas circunstancias se comporta como si estuviese compuesta por unas partículas llamadas fotones.

El Espectro Electromagnético

Si la frecuencia de la luz es **suficientemente alta**, la energía de los fotones será suficiente para **arrancar electrones de los átomos** sobre los que incida, y por lo tanto, será **radiación ionizante**

1 KeV (1 kiloelectronvoltio) = 1.000 eV.

1 MeV (1 megaelectronvoltio) = 1.000.000 eV = 10^6 eV.

1 GeV (1 gigaelectronvoltio) = 10^9 eV.

Radiación corpuscular

Las radiaciones corpusculares son todas las formadas por **partículas**. Contrariamente a las ondas, en las que la propagación de la energía se realiza sin desplazamiento de masa, **la partículas transportan la energía principalmente en forma de energía cinética**.



Partícula α	Carga:	$+ 3.204 \times 10^{-19} \text{C}$
	Composición:	2 protones p^+ + 2 neutrones



Partícula β^-	Carga:	$- 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
	Composición	1 electrón e^-



Partícula β^+	Carga:	$+ 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
	Composición	1 positrón e^+



Neutrón	Carga:	Sin carga
	Composición	1 neutrón

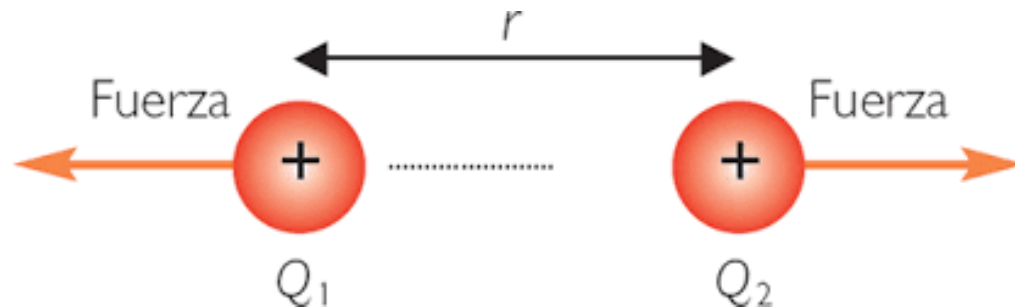
Radiación corpuscular

Las **partículas cargadas** se atraen o repelen mutuamente con una fuerza F siguiendo la Ley de Coulomb:

LEY DE COULOMB

$$F = k \frac{Q_1 * Q_2}{d^2}$$

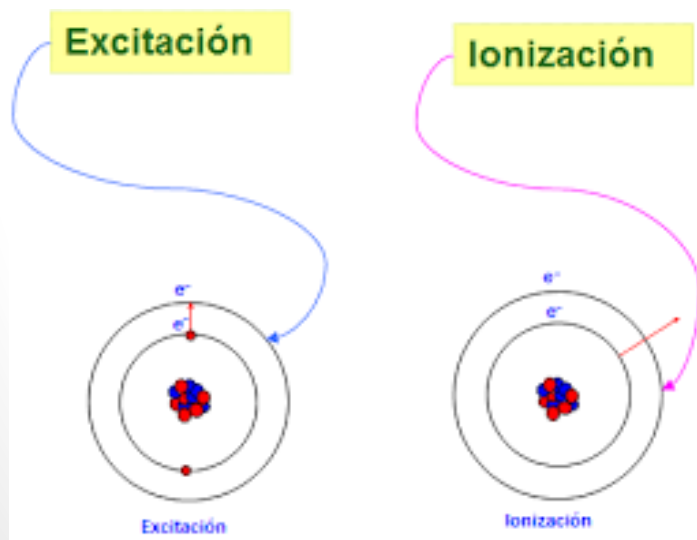
Donde:
 $k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$
(Constante de Coulomb)



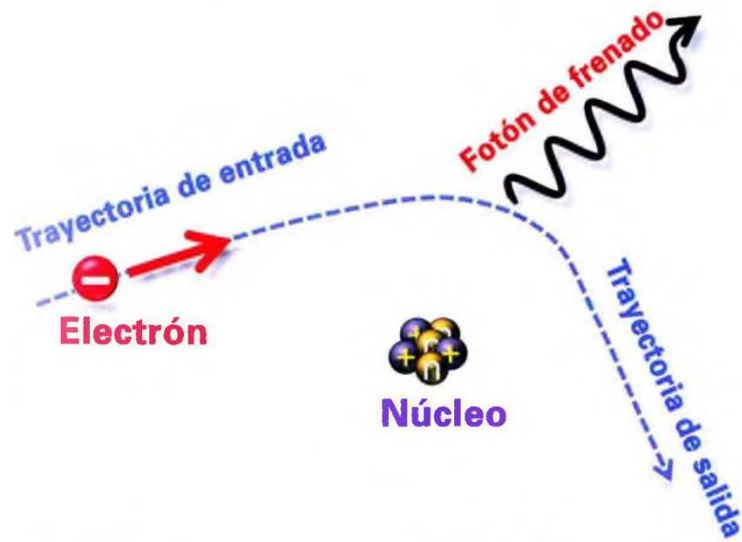
Radiación corpuscular

Al incidir radiación de partículas cargadas sobre un átomo, se producirán diferentes efectos cuya magnitud dependerá de diversos factores como la **masa de las partículas**, su **carga**, y si la **interacción se produce con el núcleo o con los electrones de la corteza**.

➤ Interacción con los electrones de la corteza:



➤ Interacción con el núcleo:

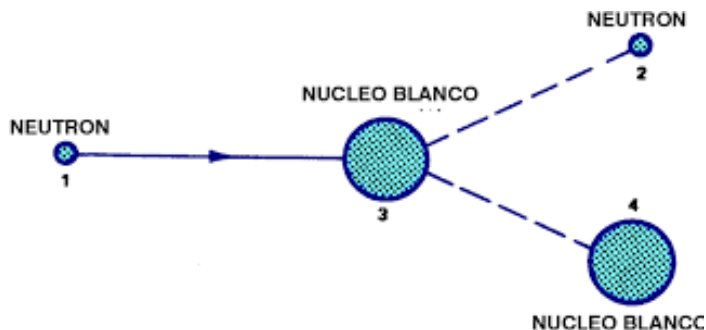


Radiación de frenado

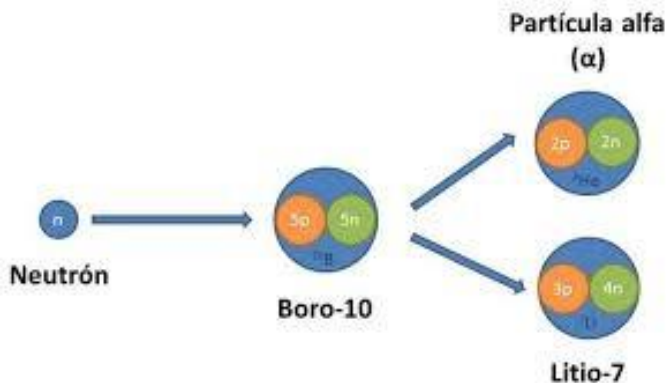
Radiación corpuscular

- Las partículas neutras no sufren interacción eléctrica
- No ejercen acción a distancia y la única forma de interactuar es el choque directo.
- Al no tener carga, no emiten radiación de frenado.

Dispersión



Absorción



Ondas materiales y ultrasonidos

- Solo pueden transmitirse a través de un **medio material**.
- Las ondas electromagnéticas **no son de este tipo** puesto que pueden propagarse tanto por medios materiales como por el vacío.
- Ejemplos de ondas materiales son las sonoras, las perturbaciones sobre la superficie de un líquido, las ondas de choque, las ondas sísmicas, etc.
- Pueden ser: **longitudinales (sonido)** o **transversales**.

El sonido

- Es una onda material de tipo **longitudinal**.
- La perturbación que transmite consiste en un **cambio de presión**, que puede ser periódica o no.
- Cualquier onda sonora puede ser descompuesta en componentes armónicos de diferentes frecuencias y amplitudes.
- Existe un rango de frecuencias en el que los cambios de presión de las ondas sonoras son capaces de producir la **oscilación del tímpano** y, por lo tanto, ser captadas por el oído humano → **RANGO AUDIBLE** (20 Hz hasta 20 kHz)

El sonido

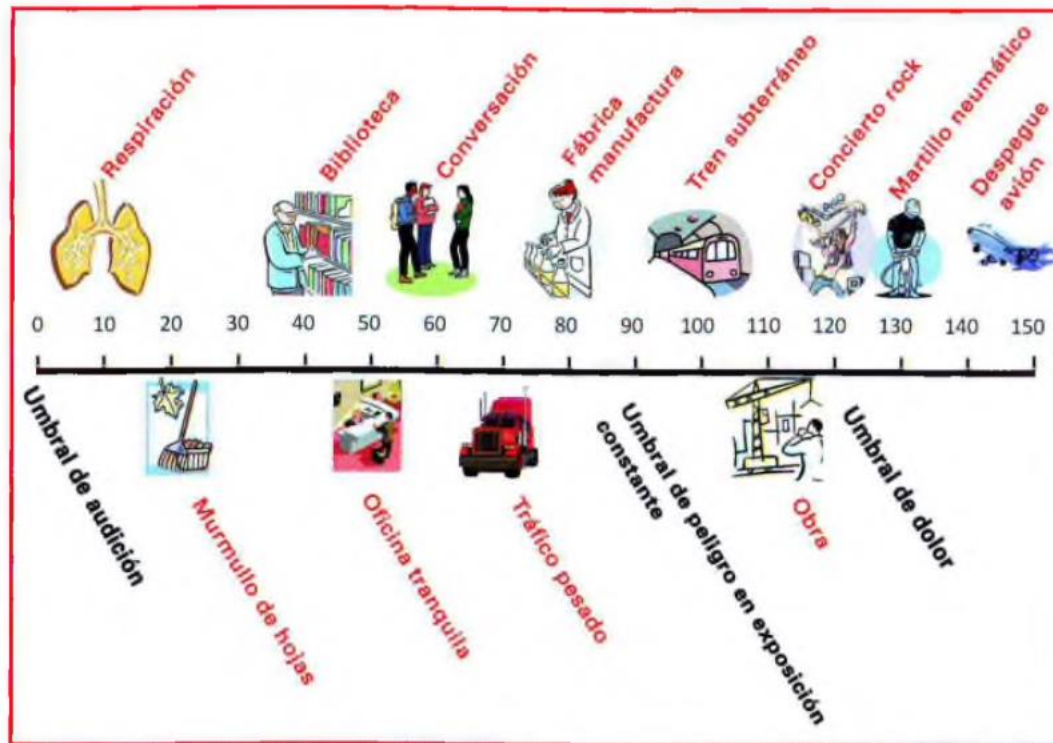
¿Cómo es la velocidad del sonido?

- Depende del material por el que se propaga.
- Es mayor en sólidos que en líquidos.
- Es mayor en líquidos que en gases (depende de P y T).
- Transmite energía a distancia como cualquier otra onda, y esta energía se puede medir a partir de un parámetro llamado **intensidad acústica**.
- La intensidad acústica está relacionada con la amplitud de la onda y sus unidades en el SI son W/m^2
- Para medir intensidades acústicas en el rango audible se utiliza una escala logarítmica relativa cuyas unidades son los **decibelios (dB)**.

El sonido

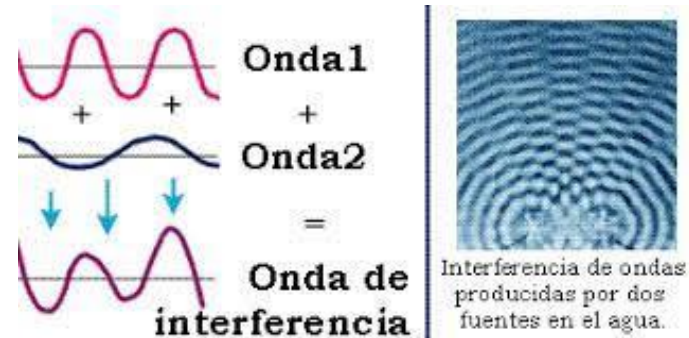
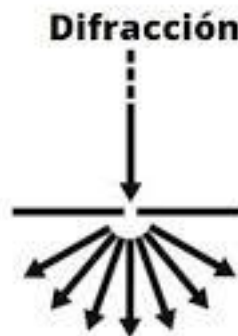
- Esta escala tiene su valor mínimo (0 dB) en el umbral audible por el oído humano, 10^{-12} W/m^2
- El valor en dB de un sonido cuya intensidad en W/m^2 tiene un valor I es:

$$B(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$



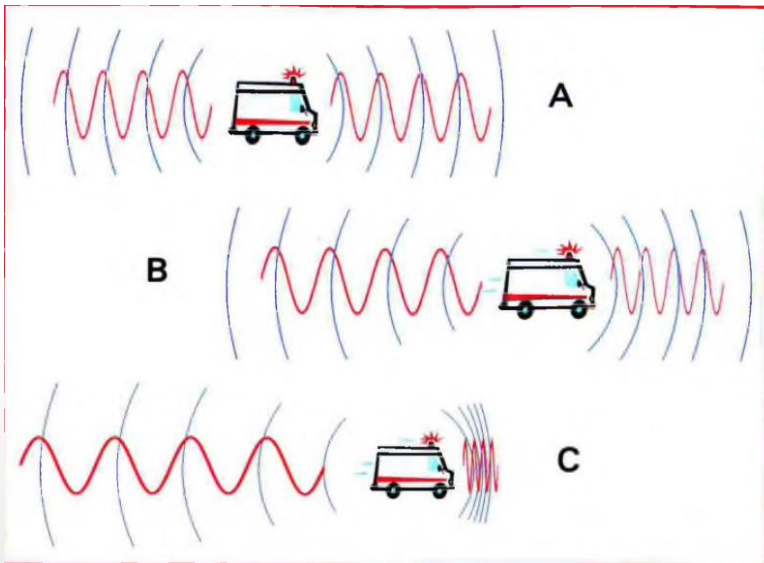
Efectos del sonido

- El sonido sufre diferentes efectos al pasar de unos medios a otros como la **reflexión** (eco) y la **refracción**, y como cualquier onda sufre también los fenómenos de **interferencia y difracción**.
- Un fenómeno particularmente interesante y con aplicaciones muy importantes en diagnóstico es el llamado **efecto Doppler**.



Efectos del sonido. Efecto Doppler

- El efecto Doppler consiste en una **variación de la frecuencia** del sonido que percibe un receptor cuando la fuente emisora se mueve respecto a él → MOVIMIENTO
- Si el emisor se **acerca** al receptor, la frecuencia del sonido recibido **aumenta**.
- Si el emisor se **aleja** al receptor, la frecuencia del sonido recibido **disminuye**.



Si la ambulancia está parada (A), la frecuencia del sonido delante y detrás de ella es la misma para un observador parado en la calle. Si se mueve a poca velocidad (B) la frecuencia delante del vehículo aumenta y la de detrás disminuye. Finalmente, al aumentar mucho la velocidad (C) el incremento de frecuencia en el sentido del movimiento es mucho mayor y en sentido contrario mucho menor.

Efectos del sonido. Efecto Doppler

- Este efecto es muy útil en **ultrasonografía** para calcular la velocidad y dirección del movimiento de los fluidos corporales como la sangre en el interior de los vasos sanguíneos o el corazón.

EFEECTO DOPPLER

I CASO

a) Fuente en reposo y observador se acerca:

$$f_0 = f \left(\frac{v + v_0}{v} \right)$$

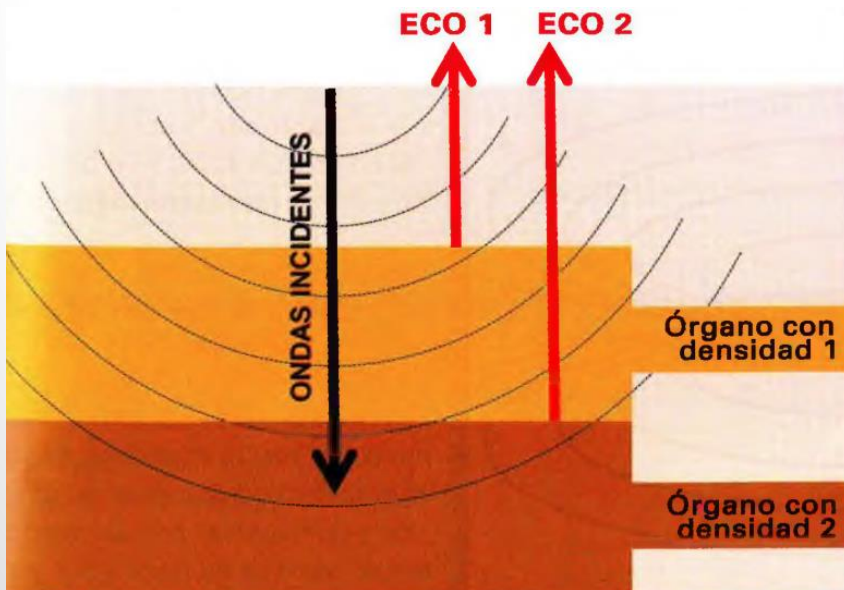
b) Fuente en reposo y observador se aleja

$$f_0 = f \left(\frac{v - v_0}{v} \right)$$



Ultrasonidos

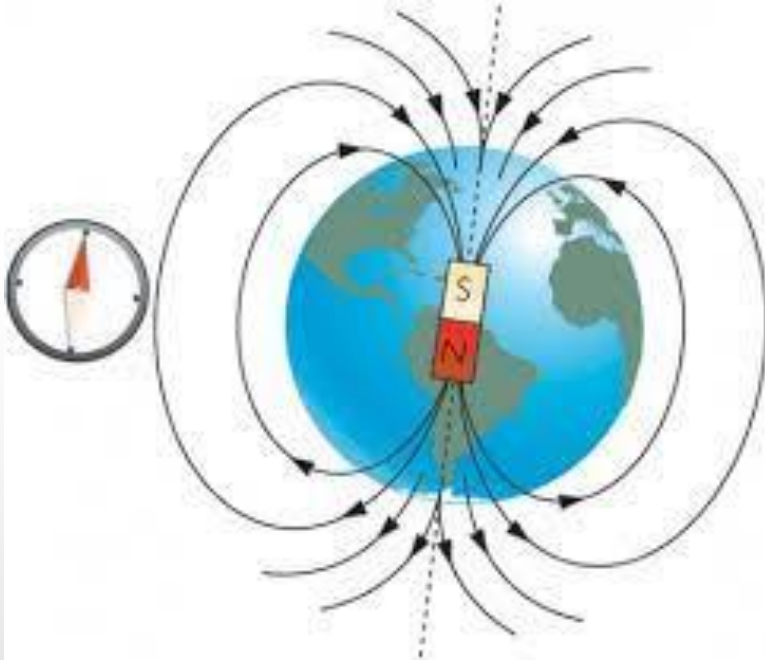
- Son sonidos con **frecuencias superiores al rango audible** que no pueden ser percibidos por el oído humano.
- Los utilizados en medicina pertenecen al rango entre **1 MHz y 14 MHz** y son generados mediante el llamado **efecto piezoeléctrico**.
- **Las ondas ultrasónicas penetran en el cuerpo humano.** La profundidad de penetración y la atenuación dependen de su frecuencia.



Cuando los ultrasonidos llegan a las superficies de separación entre diferentes materiales se producen reflexiones que pueden ser captadas por la sonda del equipo. Precisamente su principal utilidad en diagnóstico se debe a su alta sensibilidad a pequeñas diferencias de densidad entre materiales. **A partir de estas ondas reflejadas se obtienen las imágenes diagnósticas**

Magnetismo. Aplicaciones en la obtención de imágenes diagnósticas

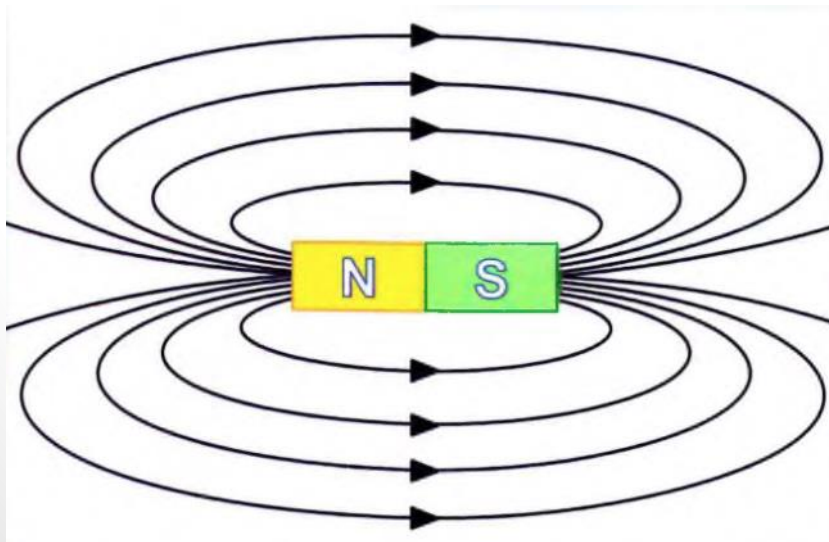
- Consiste en la capacidad que tienen ciertos materiales para atraer a otros.
- Los objetos que presentan magnetismo se llaman **imanes**. Existen **imanes permanentes** (magnetita), aquellos que no pierden el magnetismo con el tiempo, y **temporales** (electroimanes).



La Tierra se comporta como un gran imán, igual que otros planetas como el Sol

Magnetismo. Aplicaciones en la obtención de imágenes diagnósticas

- Ya en la antigüedad era conocido que los imanes se orientan en dirección norte-sur al permitírseles girar libremente.
- A la parte de un imán que señala al norte se le llama **polo norte**, y a la que señala al sur, **polo sur**.
- **Todos los imanes tienen un polo norte y un polo sur.**
- **No existe el monopolo magnético.**
- Al acercar dos imanes los polos iguales se repelen y los polos contrarios se atraen.



Líneas de campo magnético.
Salen del Norte y entran al Sur.
Donde las líneas
están más juntas la intensidad
de campo magnético es mayor.

Materiales magnéticos

En la naturaleza existen tres tipos de comportamientos magnéticos, que son los siguientes:

- **Paramagnetismo**: estos materiales sometidos a un campo magnético, el campo total que se produce en su interior es **superior al campo magnético externo**. Este fenómeno es debido a que sus átomos actúan individualmente como **pequeños imanes que se alinean al campo magnético externo**, potenciando su efecto. El material deja de estar imantado al cesar la estimulación externa.
- **Diamagnetismo**: al someter el material a un campo externo la **imantación interna disminuye**, y el campo global dentro del él es **menor que el aplicado**.
- **Ferromagnetismo**: se produce tan solo en los elementos **Fe, Co, Ni, Gd y Dy, y en gran número de aleaciones**. Al ser sometidos a un campo magnético, en su interior se produce una **multiplicación** de este, con factores que pueden llegar a **1.000 veces el valor del campo externo**. Al cesar el campo externo, algunos materiales ferromagnéticos pueden conservar parte de su magnetismo, siendo la base de **los imanes permanentes**.

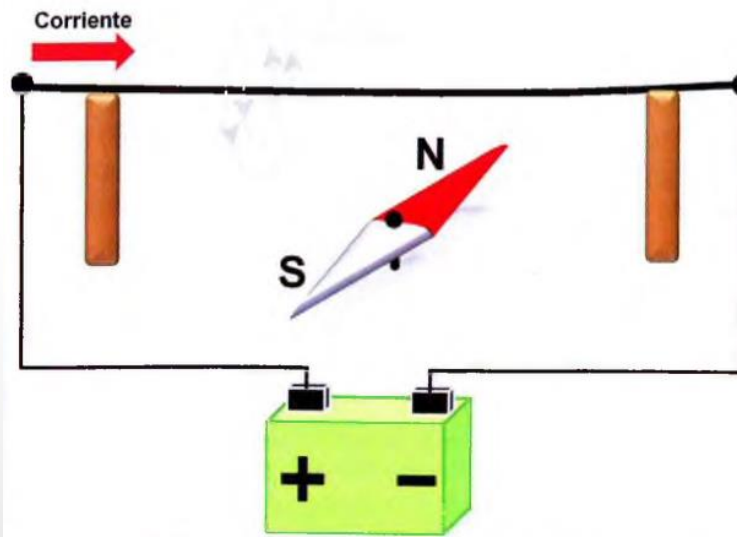
Materiales Magnéticos



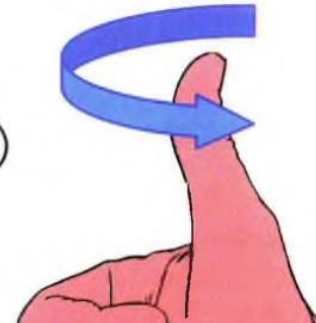
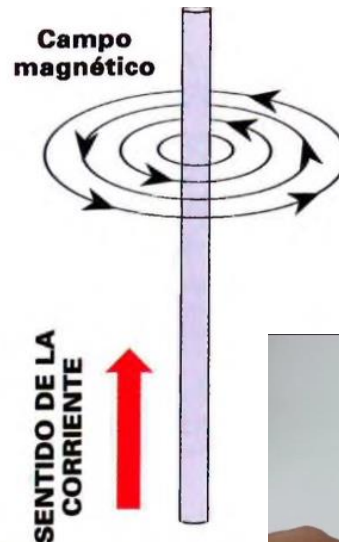
Campos magnéticos producidos por corrientes

- Los fenómenos del **magnetismo** y la **electricidad** forman parte de una misma interacción fundamental de la naturaleza, la **interacción electromagnética**.
- En 1820, Oersted descubrió que una corriente eléctrica circulando por un conductor es capaz de desviar una brújula: **las cargas eléctricas en movimiento producen campos magnéticos** y, por tanto, se comportan de la misma manera que un **imán**.

Experimento de Oersted

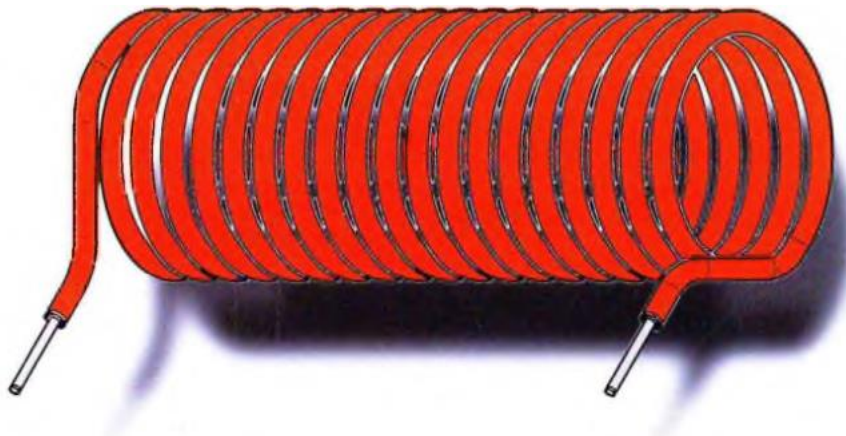


Regla de la mano derecha



Campos magnéticos producidos por corrientes

- La aplicación más interesante de este comportamiento se encuentra en los imanes temporales o **electroimanes**.
- Estos dispositivos consisten en un **solenoid** conectado a un **generador eléctrico**.
- En su interior se produce un **campo magnético casi uniforme**, que puede ser controlado mediante la variación de la corriente eléctrica circulante.
- Los electroimanes pueden disponer además de un **núcleo de material ferromagnético** para incrementar aún más su magnetismo.

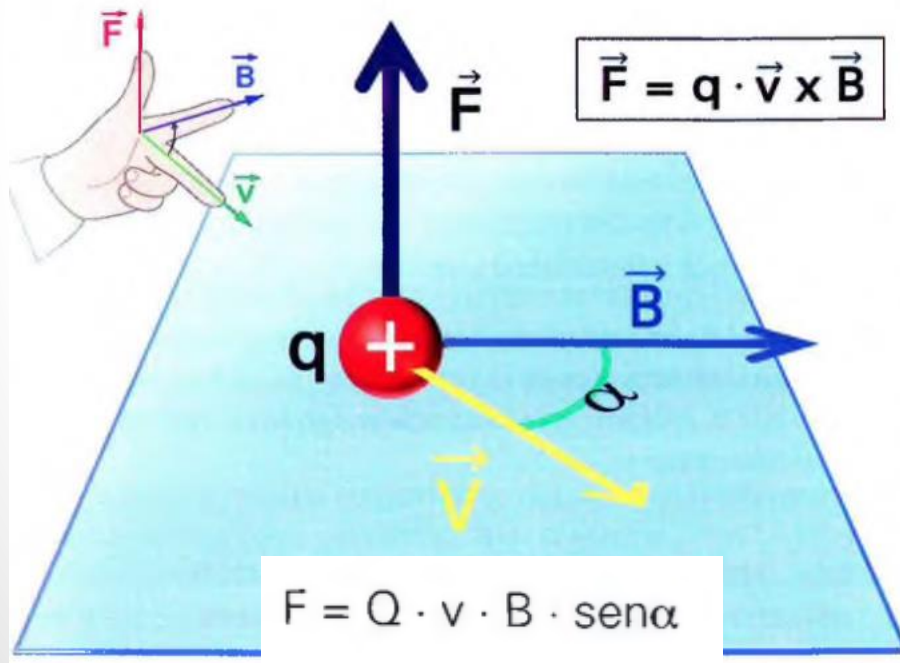


$$B = k \cdot \frac{n \cdot I}{r}$$

Campo magnético B inducido por una corriente eléctrica de intensidad I en el interior de un solenoide por el que circula.

Fuerza sobre una carga eléctrica en un campo magnético

- Un campo magnético constante en el tiempo no interacciona con una carga eléctrica que no se esté moviendo.
- Al atravesar un campo magnético una carga en movimiento, aparece una fuerza que desvía la carga de su trayectoria original. Esta fuerza, llamada **fuerza magnética**.



- La **dirección** que adopta la fuerza magnética es perpendicular a su velocidad y al campo magnético.
- Su **sentido** viene dado por la regla de la mano derecha.

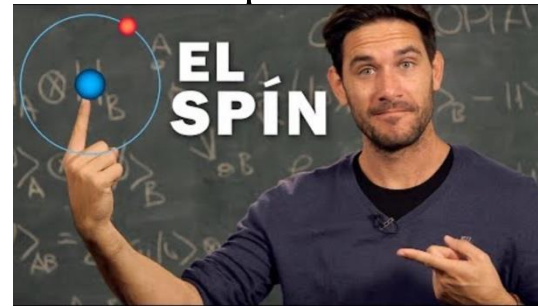
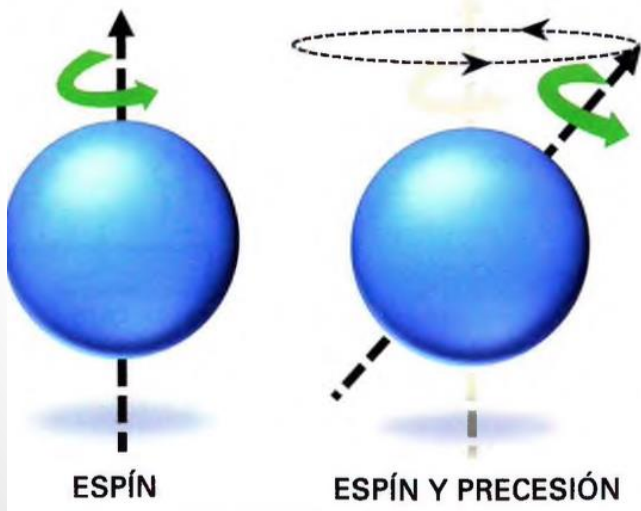
Magnetismo en el átomo

- El átomo está formado por partículas cargadas (**protones y electrones**) y **neutrones**. Estos últimos, por carecer de carga eléctrica, **no interaccionan** con los campos eléctricos ni magnéticos.
- Los fenómenos atribuibles al magnetismo en los átomos son distintos según afecten a electrones o a protones (RM).



Aplicación del magnetismo a la obtención de imágenes

- Su principal utilidad consiste en la resonancia magnética (RM), cuyas primeras imágenes se remontan al año 1973.
- La RM está basada en el hecho de que los protones de los núcleos atómicos **giran** sobre sí mismos generando un pequeño campo magnético que los hace comportarse como diminutos **imanes**. Este movimiento se denomina **SPIN**.
- Estos núcleos tienen un número impar de protones y neutrones, de manera que sus campos magnéticos no pueden compensarse.



El protón gira sobre sí mismo creando un momento magnético o espín. Al aplicar un campo electromagnético variable, el eje de giro cambia y el movimiento se parece al de una peonza (precesión)

Aplicación de las RRII en Radioterapia

- Al poco tiempo de ser descubiertos los rayos X ya se pusieron de manifiesto los **efectos biológicos** que producían las radiaciones en forma de **eritemas** y **ulceraciones**.
- De aquí surgió la idea de utilizarlos en el **tratamiento de lesiones cancerosas**. Solo unos meses separan el descubrimiento de los rayos X, su empleo en diagnóstico y los primeros tratamientos en radioterapia.



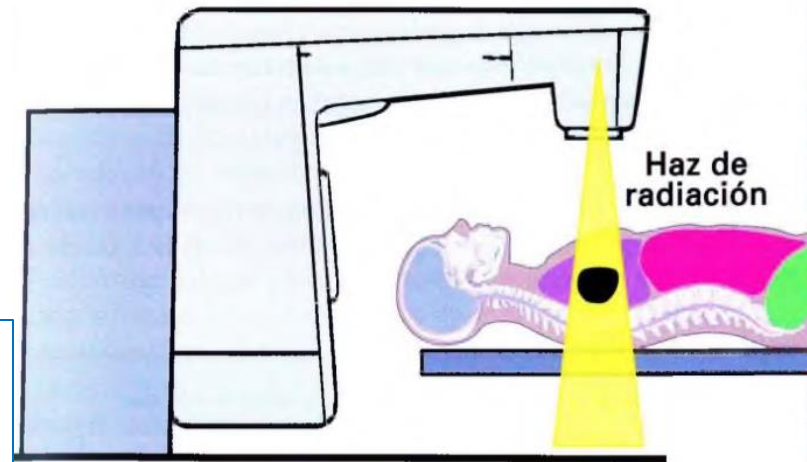
Radiative

Aplicación de las RRII en Radioterapia

- El **objetivo** de la radioterapia es **proporcionar la dosis de radiación necesaria en los tejidos que se van a tratar sin exceder la tolerancia de los órganos sanos circundantes**. Es decir, conseguir tratar la enfermedad sin provocar efectos secundarios que comprometan la vida o una calidad de vida deficiente del paciente.
- La clasificación más simple de los tratamientos de radioterapia atiende a la localización de las fuentes de radiación respecto al paciente. Así, distinguimos dos tipos de radioterapia: **TELETERAPIA** y **BRAQUITERAPIA**.

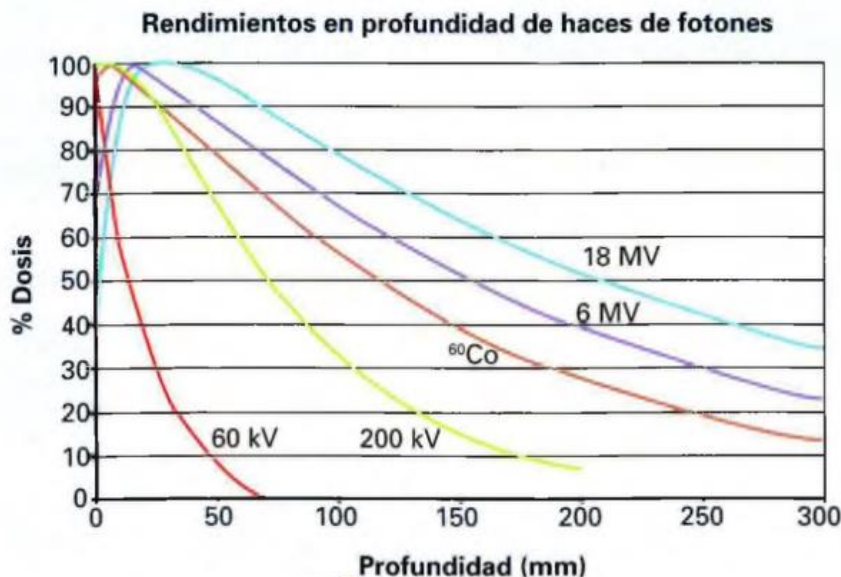
La **teleterapia** consiste en tratamiento del paciente con fuentes de radiación **externas** a él, por lo que también es llamada radioterapia de haces externos.

La **braquiterapia** utiliza fuentes encapsuladas colocadas sobre la superficie del paciente (braquiterapia de piel), entre los tejidos (braquiterapia intersticial) o en el interior de cavidades naturales (braquiterapia endocavitaria).



Radioterapia de haces externos

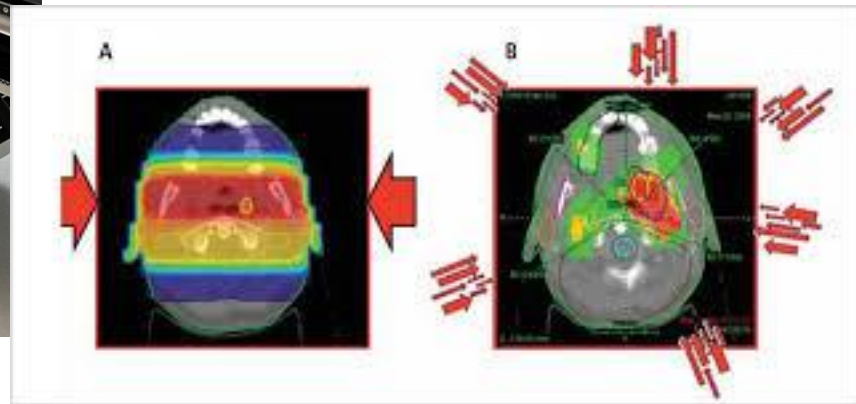
- Los tratamientos de EBRT se realizan con diferentes equipos generadores de radiación.
- En general se puede afirmar que para un tipo determinado de **radiación la profundidad de tratamiento aumenta al aumentar la energía de la radiación.**
- Esto significa que los fotones de rayos X de 10 MeV son más penetrantes que los de 10 keV, y que los electrones de 10 MeV lo son más que los de 1 MeV.
- Las radiaciones ionizantes utilizadas en EBRT son principalmente:
 - Fotones de rayos X procedentes de tubos de rayos X o aceleradores lineales
 - Fotones de rayos gamma procedentes de fuentes radiactivas
 - Electrones generados en aceleradores lineales
 - También existen los tratamientos de terapia con hadrones (protones)



Aceleradores lineales



- Son aparatos capaces de generar haces de **rayos X de energías muy altas**, del orden de MeV.
- A estas energías es posible tratar **lesiones muy profundas**.
- Además, permiten realizar **múltiples haces con ángulos de incidencia diferentes** y técnicas personalizadas que tienen como resultado una distribución de la radiación en el paciente muy circunscrita a los tumores.



Aceleradores lineales

¿Cómo funcionan?

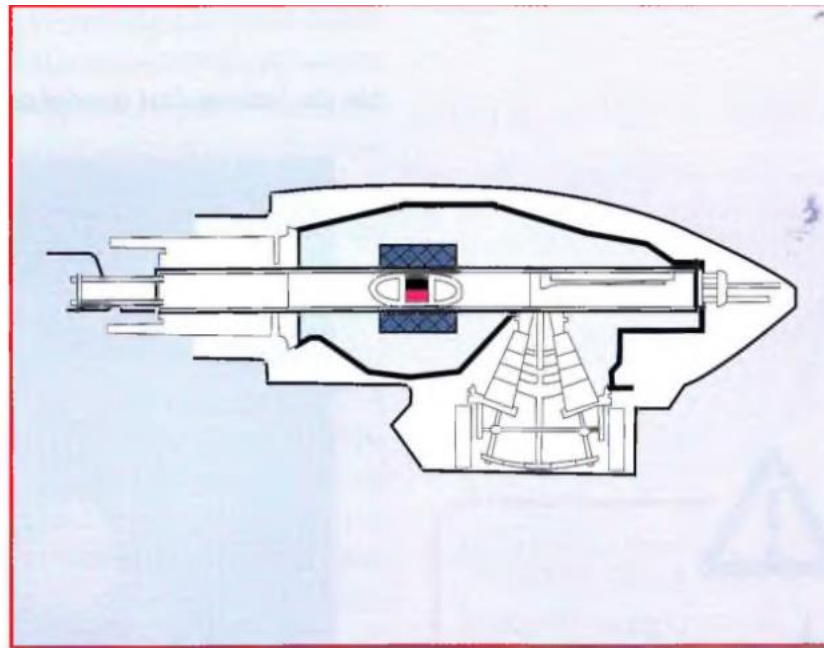
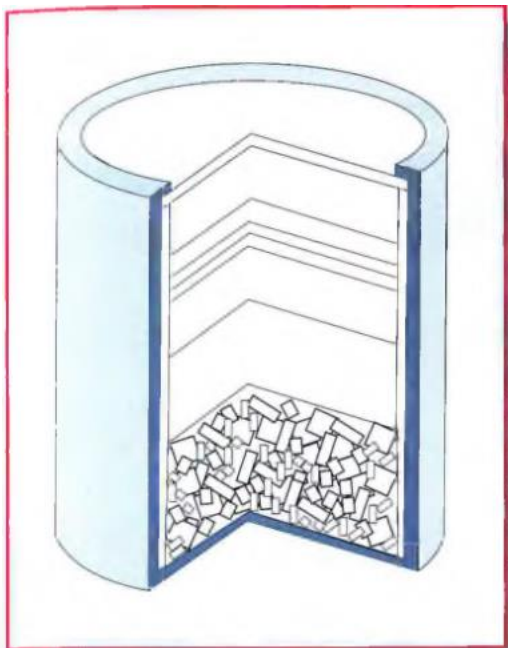
- Funcionan de un modo parecido a los tubos de rayos X: **aceleran electrones a altas energías para hacerlos chocar contra un blanco** donde generarán la radiación electromagnética de frenado.
- La principal diferencia con los tubos clásicos es que **los aceleradores no utilizan un kilovoltaje** para llevar los electrones a energías de megavoltios sino que los aceleran mediante **microondas** (f aprox. 3 GHz).
- Los aceleradores lineales permiten también generar radiación de **electrones de energías de algunos MeV**. Estos electrones son utilizados en radioterapia de haces externos para irradiar lesiones a poca profundidad.

Aceleradores lineales

¿Cómo funcionan?

Equipos de cobaltoterapia

- Esos aparatos consisten en una carcasa que contiene una fuente radiactiva de ^{60}Co con una actividad de varios miles de Ci.
- Esta fuente tiene forma de pastilla cilíndrica y emite radiación y de **energía media 1,25 MeV**.
- Para realizar el tratamiento, la pastilla se desplaza mediante un mecanismo neumático o eléctrico (según el modelo) hasta una abertura que apunta al paciente



Equipos de cobaltoterapia

- Los aceleradores lineales trabajan a distancias foco-isocentro de 100 cm.
- Los equipos de **cobaltoterapia a 80 cm**. Esta separación permite al cabezal emisor girar alrededor del paciente para optimizar los ángulos de incidencia de la radiación.
- Esta capacidad, unida a la posibilidad de añadir filtros en **cuña** o de dar forma a los haces de radiación mediante **colimadores multiláminas (MLC)** permite obtener **distribuciones de dosis de radiación muy circunscritas a los volúmenes tumorales** que se van a tratar, y con poca cantidad de radiación fuera de ellos.
- La radioterapia adaptada tridimensionalmente a las formas de las regiones que se van a tratar recibe el nombre de **radioterapia tridimensional conformada**, o **3DCRT** por sus siglas en inglés.

Planificación del tratamiento

¿Cómo obtenemos las distribuciones de dosis?

- Se crean **imágenes tridimensionales** de los pacientes y su anatomía.
- Esto se realiza mediante la llamada **simulación virtual**, que crea un modelo individual de cada paciente utilizando imágenes obtenidas mediante tomografía computarizada (TC).
- Una vez obtenido el modelo de un paciente particular, con los volúmenes por tratar y los órganos que proteger, los haces de tratamiento con sus formas y sus ángulos de incidencia serán calculados en unos potentes ordenadores llamados **planificadores**.
- Distintos tipos de técnicas: 3DRT, IMRT, VMAT...

Planificación del tratamiento

¿Cómo obtenemos las distribuciones de dosis?

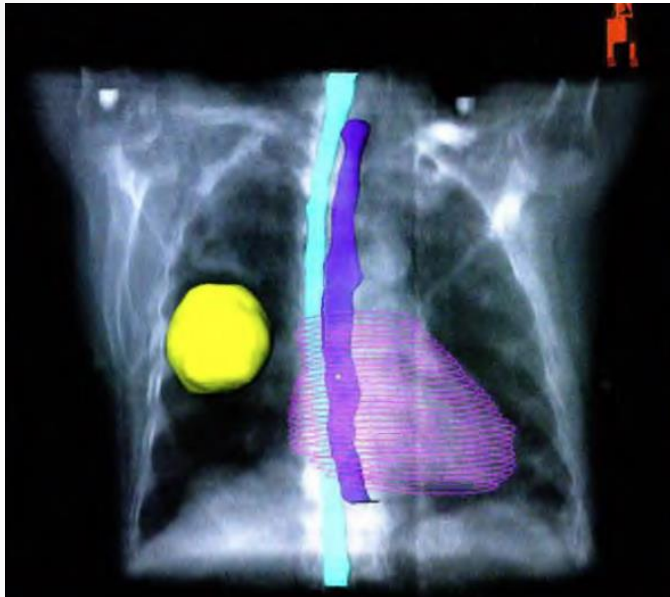


Imagen de una simulación virtual

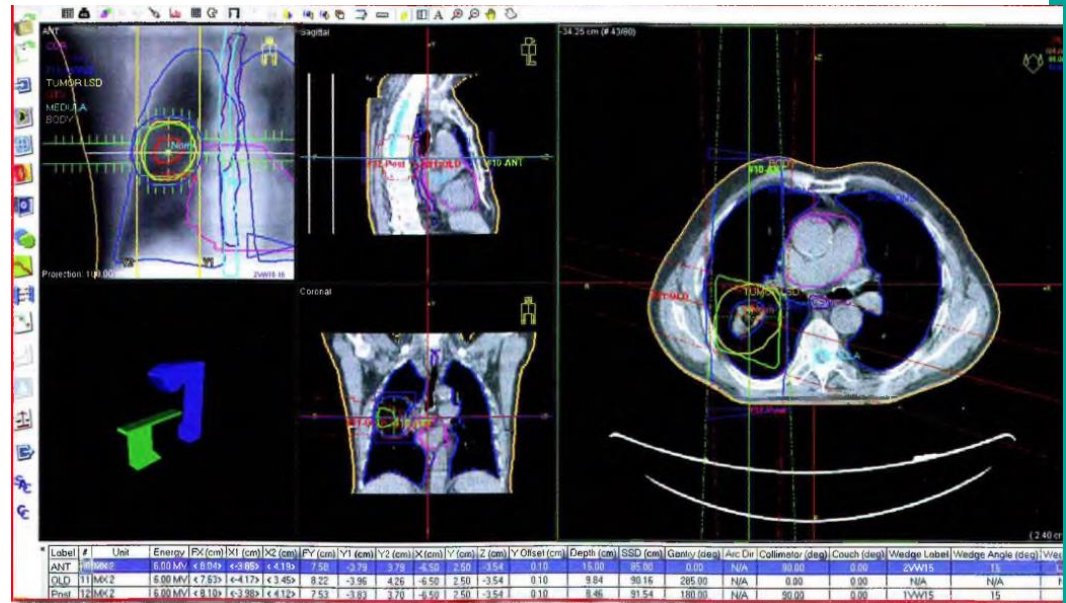
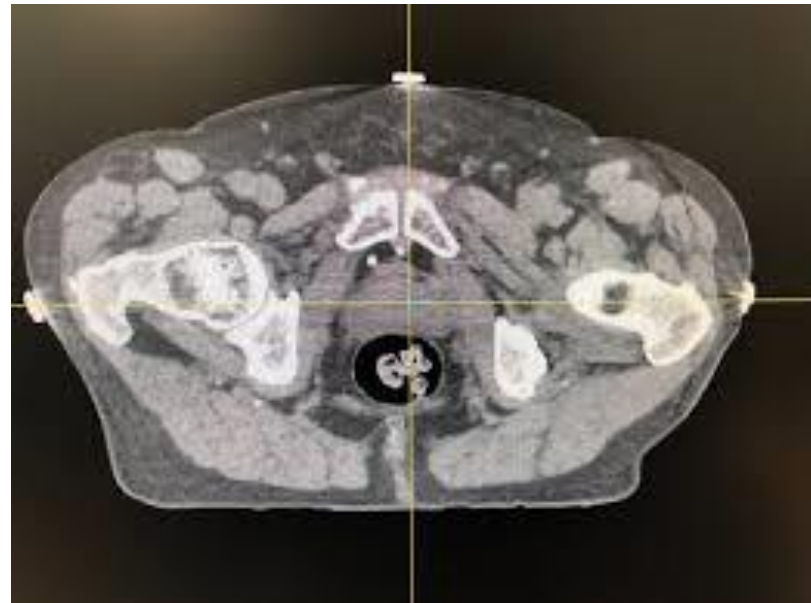


Imagen de sistema de planificación

Planificación del tratamiento

- Una vez obtenida la planificación del tratamiento, el siguiente paso es su **aplicación al paciente**.
- Para ello es absolutamente necesaria una exacta **localización de los puntos** en los que deben incidir los haces de radiación (PT).
- Esto es posible mediante unas **marcas** que se realizan sobre la piel del paciente en la sesión de simulación con TC.
- Sin embargo, las marcas en la piel presentan incertidumbres que la alta precisión de los tratamientos actuales considera inaceptables.
- Para evitarlas, la localización de los tratamientos de radioterapia utiliza la asistencia de equipos de imagen por rayos X, o de ultrasonidos, que permiten la observación de las estructuras más profundas de los pacientes.
- Los tratamientos de radioterapia que emplean estas técnicas reciben el nombre de **radioterapia guiada por la imagen**, o IGRT (Image Guided Radiotherapy) por sus siglas en inglés.

Planificación del tratamiento



Planificación del tratamiento

TÉCNICAS DE TRATAMIENTO

EBRT: radioterapia de haces externos.

IMRT: radioterapia de haces externos con intensidad modulada.

IORT: radioterapia intraoperatoria.

IGRT: radioterapia guiada por la imagen.

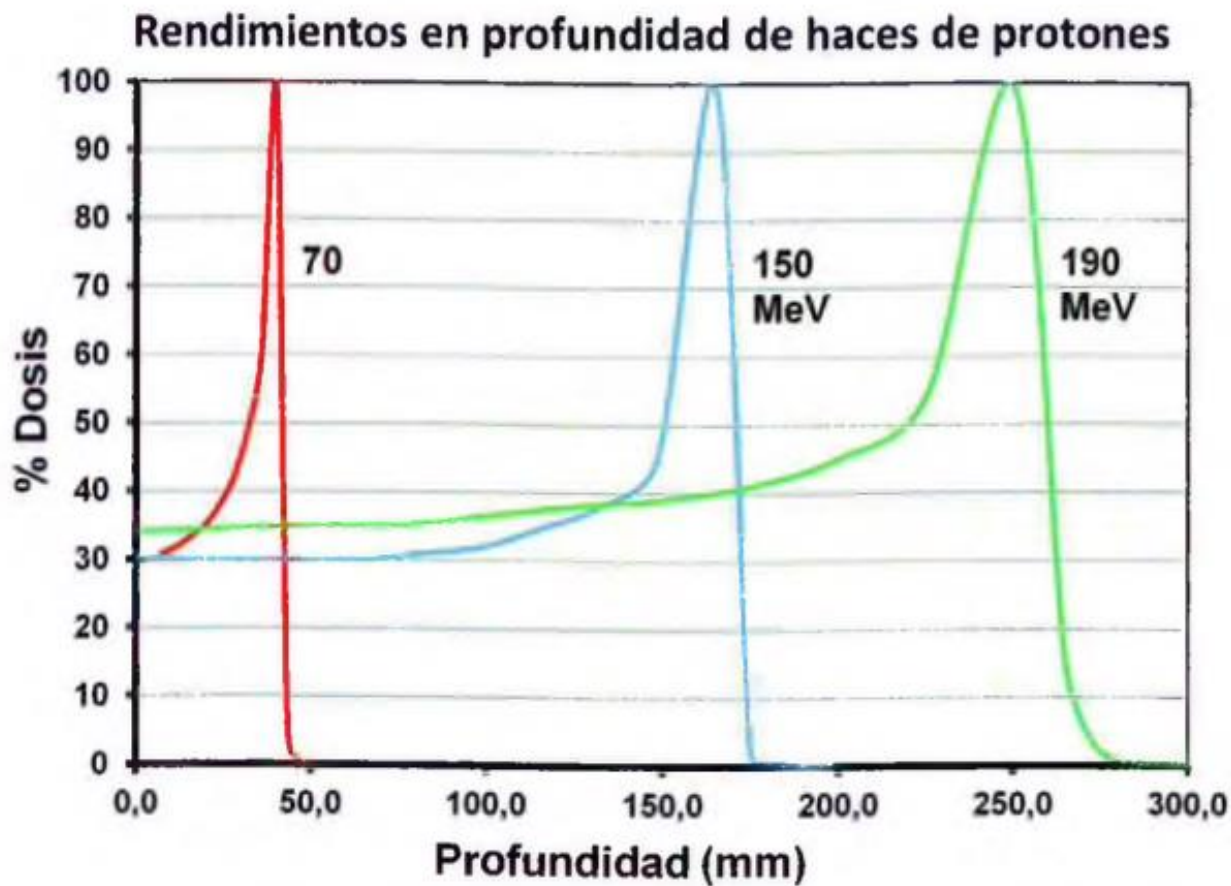
VMAT: irradiación volumétrica por arcos.

SBRT: radioterapia estereotáxica extracraneal.

Equipos de terapia con protones

- Una de las tendencias más actuales en radioterapia, aunque limitada a nivel mundial por el alto coste de sus instalaciones, la componen los aceleradores de partículas cargadas pesadas, protones e iones.
- Estas partículas adquieren sus altas energías mediante unos equipos llamados **ciclotrones o sincrotrones**, que las llevan a energías de 70 a 250 MeV.
- Las principales ventajas de los iones pesados y los protones son debidas a su **carga eléctrica**, que las hace muy ionizantes, y a su **gran masa** por dos motivos especialmente:
 - Son difíciles de desviar en las interacciones con los medios materiales.
 - Presentan la propiedad de penetrar hasta una profundidad bien determinada llamada **pico de Bragg**.

Equipos de terapia con protones



Braquiterapia

- La **braquiterapia** (BQT) utiliza fuentes radiactivas encapsuladas para irradiar los tejidos que están en **contacto** o **muy próximos** a ellas.
- Las fuentes deben ser colocadas **en contacto** con el tumor que se vaya a tratar ya sea por aplicación directa sobre él, mediante un aplicador, o en un acto quirúrgico.
- Así se distinguen tres tipos principales de braquiterapia:
 - **Braquiterapia superficial o de contacto:** Las fuentes se colocan en la superficie mediante aplicadores estándar o bien con moldes personalizados.
 - **Braquiterapia intra o endocavitaria:** Las fuentes se introducen mediante un aplicador en alguna cavidad natural del paciente.
 - **Braquiterapia intersticial:** Se colocan tubos aplicadores en el interior de la lesión a tratar mediante un acto quirúrgico.

Braquiterapia



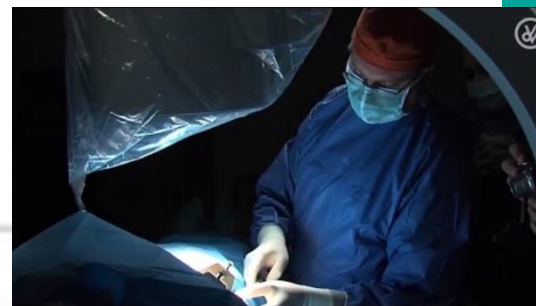
Aplicadores de BQT de piel



Aplicadores de BQT ginecológica



Aplicadores de BQT intersticial



Braquiterapia

- Tradicionalmente los tratamientos de BQT intersticial han sido realizados mediante la inserción de tubos con material radiactivo manipulados directamente por el personal sanitario. Estos tubos son llenados con fuentes de ^{192}Ir en una sala de almacenaje, la **gammateca**, y colocados en el paciente por el médico en el **radioquirófano**.



EQUIPOS DE CARGA DIFERIDA

- Las fuentes radiactivas **no necesitan ser manipuladas por el personal**.
- El médico coloca los aplicadores en el paciente y estos se conectan al equipo mediante tubos de transferencia.
- En el momento del tratamiento, **el personal sale de la sala** y la fuente radiactiva se coloca en el interior de los aplicadores automáticamente.

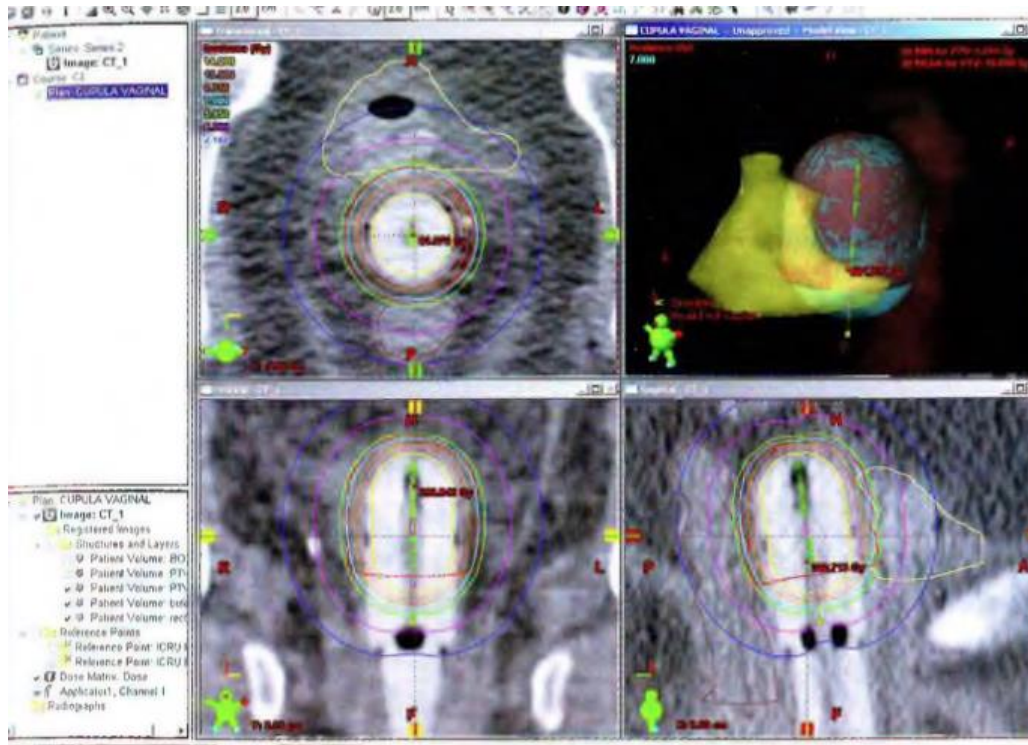
Braquiterapia

- Existe una característica que cabe tener en cuenta en los equipos de braquiterapia: **tasa de dosis de las fuentes utilizadas.**
- Existen tres tipos de braquiterapia clasificados según la tasa de dosis a la que trabajan:
 - **Equipos de Alta Tasa o HDR:** Utilizan una fuente única de ^{192}Ir , generalmente de **10 Ci de actividad** y con un periodo de semidesintegración de 74,2 días. También existen equipos que utilizan fuentes de ^{60}Co . Los tratamientos se realizan de manera ambulatoria en diversas fracciones de unos **pocos minutos de duración.**
 - **Equipos de Baja Tasa o LDR:** Generalmente usan fuentes de ^{137}Cs . Los tratamientos se realizan con el paciente ingresado porque la duración acostumbra a superar **las 24 h.**
 - **Equipos de Tasa Pulsada o PDR:** Usan fuentes de alta tasa, generalmente de ^{192}Ir , que alternan minutos de tratamiento con pausas para que el **efecto biológico sea parecido al de una baja tasa.**

Braquiterapia

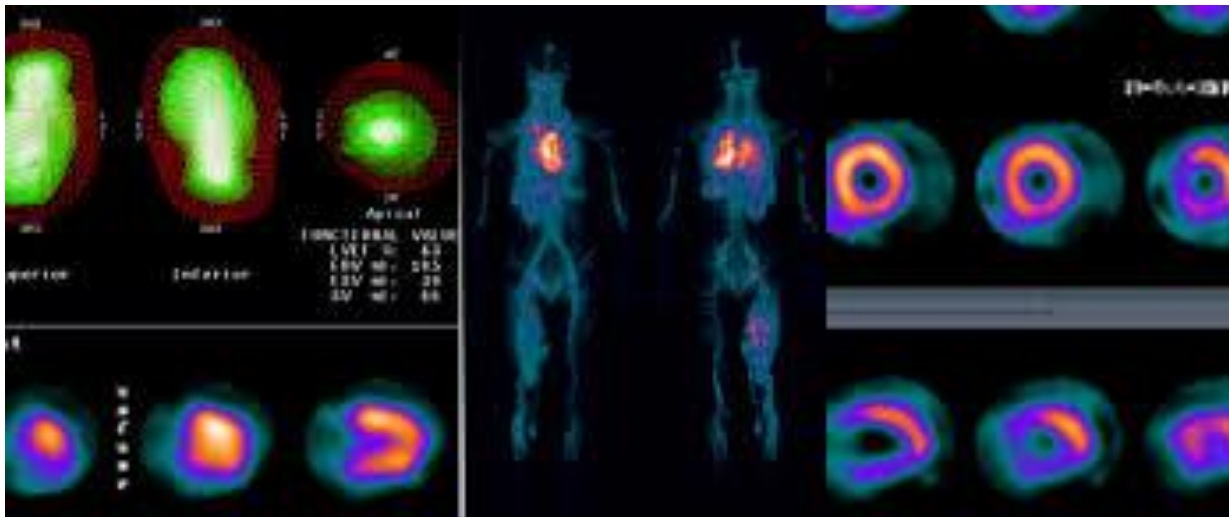
¿Cómo obtenemos las distribuciones de dosis?

- La planificación de los tratamientos de braquiterapia puede realizarse mediante **radiografías ortogonales**, la forma clásica, o mediante **imágenes tridimensionales** obtenidas por TC o RM. De esta forma se obtienen distribuciones de dosis en los órganos internos del paciente y se pueden prevenir mejor los efectos adversos del tratamiento.



Otras aplicaciones

- Las radiaciones ionizantes son utilizadas también en otras disciplinas sanitarias para terapia.
- **Medicina nuclear** se emplean fuentes no encapsuladas para tratar tumores. Ejemplos de estas aplicaciones son:
 - ^{131}I para el tratamiento de tumores de tiroides.
 - ^{89}Sr y ^{153}Sm para tratamiento de metástasis óseas.
 - ^{32}P para algunos tumores hematológicos.

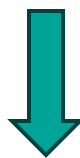


Aplicaciones de las radiaciones ionizantes en diagnóstico

- Desde su descubrimiento en 1895 los rayos X demostraron ya su capacidad de atravesar la materia y proporcionar **imágenes** de la anatomía interna de los seres humanos.
- Más adelante, a partir de los estudios de Hevesy en 1923, se descubrió que los isótopos radiactivos tenían la capacidad de ser **absorbidos selectivamente** por los diferentes tejidos y, así, proporcionar imágenes anatómicas o funcionales.
- Fue en 1956 cuando Hanger inventaría la **gammacámara** y revolucionaría el mundo de las imágenes diagnósticas en medicina nuclear.
- Es posible distinguir dos tipos principales de aplicaciones de las radiaciones ionizantes en diagnóstico por la imagen: la utilización de **haces externos de rayos X** y el empleo de isótopos radiactivos inoculados al paciente.

Haces externos en diagnóstico

Las radiaciones para uso en radiodiagnóstico deben tener una característica esencial: **ser capaces de atravesar el cuerpo humano para ser detectadas a la salida y permitir la obtención de una imagen.**



PROBLEMA

Las únicas REM que son capaces son los **rayos X y gamma**, cuyo principal inconveniente es ser **radiaciones ionizantes**

Las Imágenes obtenidas se componen de **distintos niveles de grises**, que se corresponden con las atenuaciones de los rayos X al atravesar el cuerpo.

Las imágenes obtenidas mediante rayos X pueden ser de dos tipos:

- **RADIOLOGÍA CONVENCIONAL**
- **TOMOGRAFÍA COMPUTERIZADA (TC)**

Radiología convencional

- Las imágenes obtenidas son **imágenes planas**, perdiendo la información sobre la profundidad y correspondientes a un **único haz** que **atraviesa al paciente** e incide en un detector (placa radiográfica, intensificador o escopia).
- Si queremos conocer la profundidad a estudiar se deben utilizar imágenes obtenidas desde **orientaciones diferentes** para completar las tres coordenadas del espacio, ya sea con aparatos que puedan cambiar su orientación o moviendo al paciente (ej.: mamógrafos).
- La limitación de los rayos X para contrastar unos tejidos blandos de otros puede ser superada utilizando **medios de contraste**

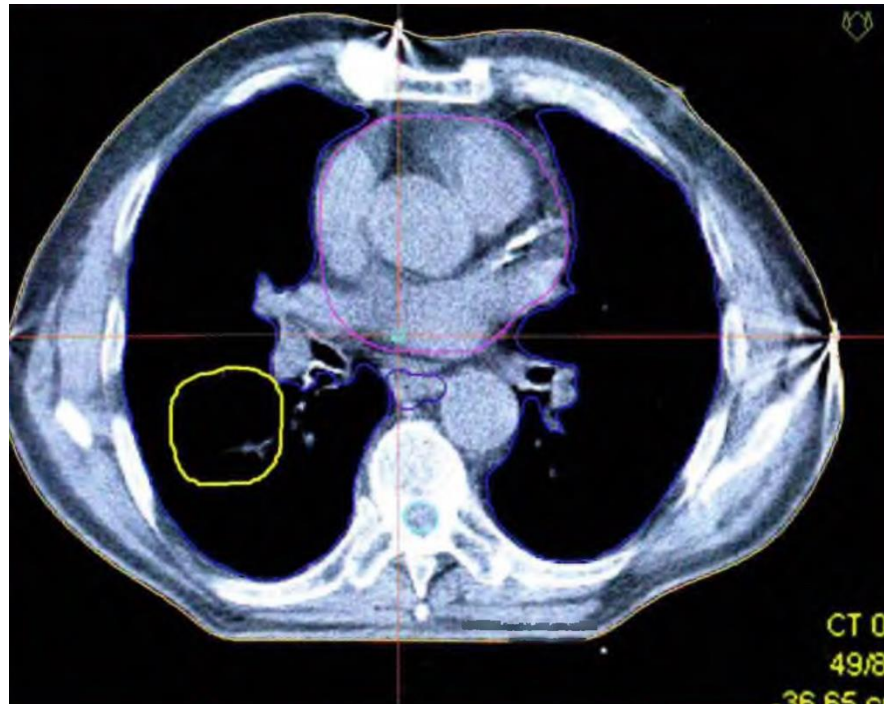


Sustancias de números atómicos altos que absorben los rayos X más que el tejido circundante

Tomografía computerizada (TC)

- Permite obtener **reconstrucciones tridimensionales** de la anatomía del paciente con lo que se puede conocer con exactitud la localización de cada punto anatómico en las **tres coordenadas del espacio**.
- La obtención de las imágenes se realiza mediante **un tubo de rayos X que rota alrededor del eje craneocaudal del paciente**, y una serie de detectores enfrentados a él.

Coordenadas en imágenes de TC. Abajo a la derecha aparece la distancia longitudinal hasta el corte considerado de referencia. Las marcas en piel (visibles como puntos blancos con artefacto) sirven para fijar también las coordenadas anteroposterior y lateral.



Tomografía computerizada (TC)

- Los detectores del equipo de TC proporcionan **valores digitales** de la transmisión de los rayos X en las distintas orientaciones del tubo.
- Estos valores son enviados a un ordenador que mediante complejos algoritmos de cálculo **construye las imágenes** en forma de cortes coronales bidimensionales.
- A cada punto del paciente el ordenador le otorga un valor de densidad en escala **Hounsfield**.
- A partir de la conversión de los números Hounsfield en escala de grises se obtiene la imagen de TC.
- La reconstrucción tridimensional se realiza a posteriori combinando estos cortes uno tras otro.
- La dosis de radiación suministrada al paciente es muy superior a la radiología convencional

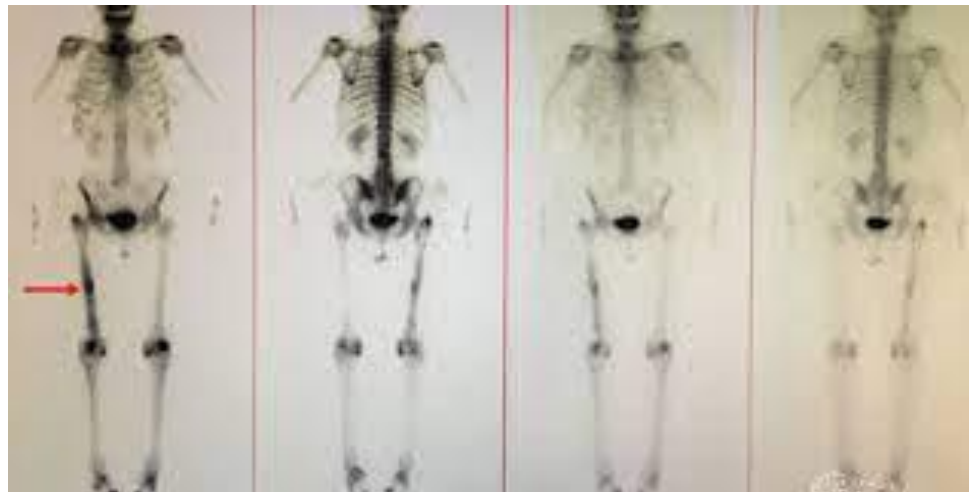
Isótopos radiactivos en diagnóstico

GAMMAGRAFÍA

- Se usan en MN para obtener **imágenes de diagnóstico** a partir de la absorción selectiva de los diferentes isótopos por los distintos órganos o por los tejidos patológicos.
- El paciente **incorpora el isótopo**, que es distribuido por su cuerpo por vía sanguínea, siendo absorbido principalmente en las zonas a diagnosticar.
- Una vez el isótopo ha sido absorbido, se introduce al paciente en el equipo captador de imágenes, llamado **gammacámara**.
- Las pruebas radiológicas realizadas por este procedimiento se llaman **gammagrafías**, y no solo se utilizan en el caso de patologías tumorales sino también en un gran número de exploraciones de enfermedades benignas, como hipertiroidismos, procesos inflamatorios, etc.
- Después de los exámenes, los pacientes eliminan el radioisótopo por dos vías principales: la **desintegración radiactiva** y la eliminación por los **fluidos corporales**.

Isótopos radiactivos en diagnóstico

GAMMAGRAFÍA



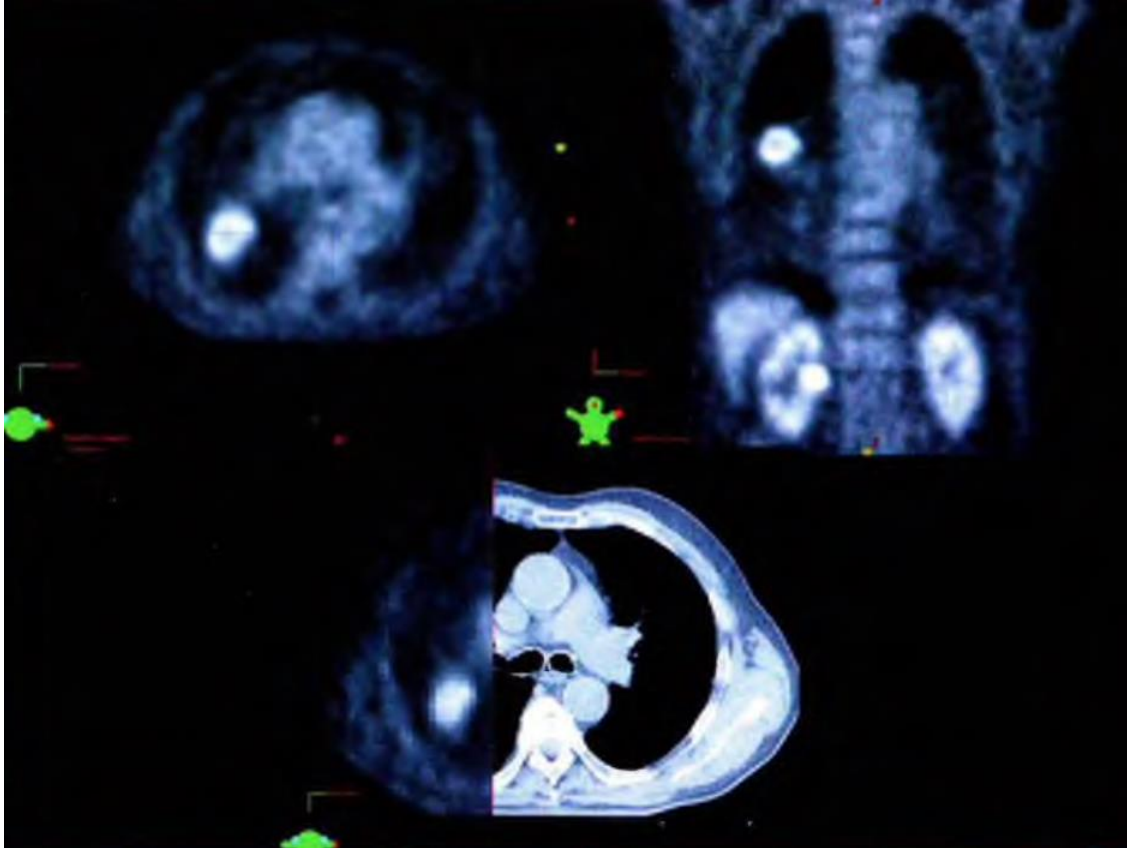
Isótopos radiactivos en diagnóstico

TOMOGRAFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES (PET)

- En ella el radioisótopo es un **emisor que emite positrones**.
- Cada positrón emitido se aniquila localmente con un electrón, formando un par de fotones y de 0,511 MeV, que son detectados por el equipo.
- Puesto que estos isótopos pueden asociarse a una **molécula de glucosa**, las imágenes obtenidas proporcionan una visión de los órganos con mayor actividad celular y consumo de glucosa.
- Por este motivo, la PET da **imágenes funcionales** y no anatómicas del paciente, siendo de gran utilidad en el diagnóstico para oncología.
- Los PET-TC, **asocian una PET a un TC**, de manera que obtienen imágenes funcionales con la PET e imágenes anatómicas con la TC. Al utilizar las mismas coordenadas espaciales, las imágenes permiten una superposición perfecta, por lo que son de gran utilidad en radioterapia

Isótopos radiactivos en diagnóstico

TOMOGRAFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES (PET)



Imágenes de PET: arriba a la izquierda imagen transversal. A la derecha imagen anterior. Abajo fusión PET-TC en el mismo paciente.

Aplicación de las RNI y las ondas materiales en RT e imagen para el diagnóstico

APLICACIONES EN RT

- Las RNI tienen dos aplicaciones principales en radioterapia:
 - La asistencia al **contorneo** de volúmenes blanco.
 - La **localización** en tiempo real de zonas a tratar en el momento del tratamiento (IGRT).
- Una **aplicación indirecta** en radioterapia de las **ondas electromagnéticas de frecuencias del orden de 3 GHz** consiste en su capacidad para acelerar los electrones en un acelerador lineal. Estas microondas no son utilizadas para tratar a los pacientes.

Aplicación de las RNI y las ondas materiales en RT e imagen para el diagnóstico

ASISTENCIA AL CONTORNEO DE VOLÚMENES BLANCO

- Las imágenes diagnósticas obtenidas con RNI (RM O US) , proporcionan **información morfológica** de los tejidos blandos que no están al alcance de la imagen tomográfica utilizada para la simulación virtual de los tratamientos en radioterapia.
- El aumento de la precisión de los tratamientos radioterápicos obliga al médico especialista a una mejor definición de los volúmenes.
- Las imágenes de **resonancia magnética** son utilizadas para la delineación de tumores en múltiples tejidos blandos. Los programas informáticos para simulación virtual permiten la **FUSIÓN** de las dos imágenes
- En el caso de las **imágenes ecográficas** **la fusión no es posible** por carecer de referencias inequívocas. El radioterapeuta debe comparar visualmente las estructuras anatómicas del TC para localizar cualitativamente las regiones anatómicas.

Aplicación de las RNI y las ondas materiales en RT e imagen para el diagnóstico

IMÁGENES DE TRATAMIENTO EN TIEMPO REAL

- Los **movimientos** y variaciones anatómicas de los pacientes pueden **limitar la precisión de los tratamientos y su reproducibilidad** a lo largo de los días.
- Para evitar este problema, los radioterapeutas **aumentaban los márgenes de seguridad en la delimitación de los volúmenes blanco**, pero la necesidad de poder llegar a dosis de radiación más altas y especialmente de evitar los órganos de riesgo han limitado esta solución en gran parte de las patologías por tratar.



Solución

Obtención de imágenes de la anatomía del paciente en tiempo real

Aplicación de las RNI y las ondas materiales en RT e imagen para el diagnóstico

IMÁGENES DE TRATAMIENTO EN TIEMPO REAL

- Los **movimientos** y variaciones anatómicas de los pacientes pueden **limitar la precisión de los tratamientos y su reproducibilidad** a lo largo de los días.
- Para evitar este problema, los radioterapeutas **aumentaban los márgenes de seguridad en la delimitación de los volúmenes blanco**, pero la necesidad de poder llegar a dosis de radiación más altas y especialmente de evitar los órganos de riesgo han limitado esta solución en gran parte de las patologías por tratar.



Solución

Obtención de imágenes de la anatomía del paciente en tiempo real



- ULTRASONIDO
- RM
- INFRARROJOS

Aplicación de las RNI y las ondas materiales en RT e imagen para el diagnóstico

APLICACIONES EN DIAGNÓSTICO POR LA IMAGEN

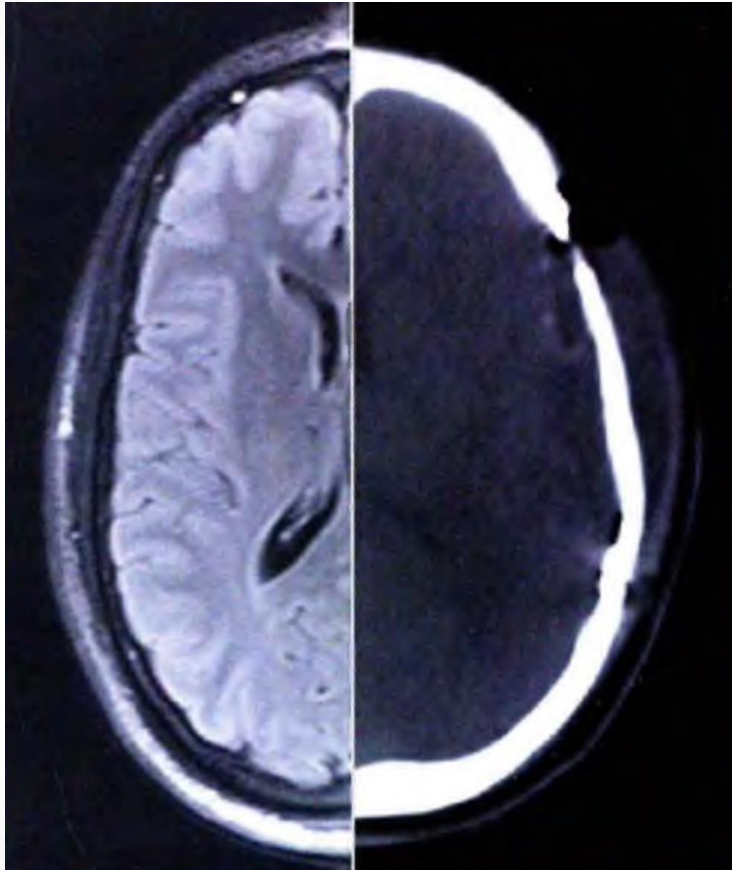
Las principales aplicaciones de las radiaciones no ionizantes en diagnóstico por la imagen son la **resonancia magnética (RM)** y los **ultrasonidos (US)**.

- **Resonancia magnética (RM)**: utiliza campos magnéticos uniformes y estimulación de los núcleos atómicos mediante ondas electromagnéticas.
- **Ultrasonidos (US)**: emplean ondas sonoras de alta frecuencia.

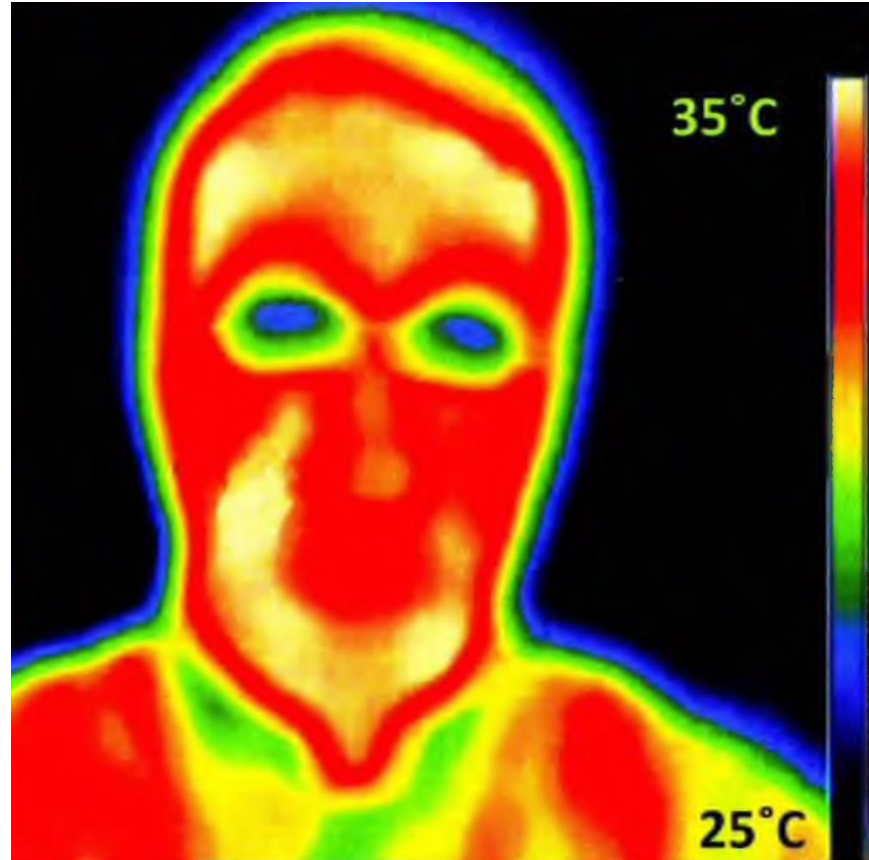


Imágenes de **características muy diferentes** que con frecuencia proporcionan información complementaria para el diagnóstico.

Aplicación de las RNI y las ondas materiales en RT e imagen para el diagnóstico



Fusión de RM con TC. A la izquierda aparece la imagen de RM, con mucha mayor definición de los tejidos blandos.



Termografía

GENERALIDADES SOBRE MAGNITUDES (I)

•MAGNITUD.

- Cualquier característica o propiedad de un cuerpo que se puede medir.

•MEDIDA.

- La evaluación concreta de la magnitud.

•UNIDAD.

- Patrón de medida. Referencia para establecer el valor de la magnitud.

•

•SISTEMA DE UNIDADES.

- Conjunto reducido de unidades patrón de magnitudes fundamentales sujetas a ciertos criterios generales, de las cuales derivan las demás magnitudes.

SISTEMA INTERNACIONAL O MKS

Basado en 7 magnitudes fundamentales

- ✓ Longitud (metro)
- ✓ Masa (Kilogramo)
- ✓ Tiempo (segundo)
- ✓ I. Corriente (amperio)
- ✓ Temperatura (kelvin)
- ✓ I. Luminosa (candela)
- ✓ Cantidad de sustancia (mol)

La legislación europea prescribe el 1 de enero de 1986 que en las mediciones radiológicas se usen obligatoriamente las unidades del Sistema Internacional de medidas.

GENERALIDADES SOBRE MAGNITUDES (II)

CLASIFICACIÓN DE LAS MAGNITUDES RADIOLÓGICAS

- **RADIOMETRÍA.**
 - Magnitudes asociadas a un campo de radiación. (fluencia y flujo de energía y de partículas, energía radiante,...).
- **COEFICIENTES DE INTERACCIÓN.**
 - Magnitudes asociadas a la interacción de la radiación con la materia. (coeficiente de atenuación másico, lineal, sección eficaz, ...).
- **DOSIMETRÍA.**
 - Magnitudes relacionadas con la medida de la energía absorbida y de su distribución. Derivan de las dos anteriores. (Dosis absorbida, Kerma, LET,..)
- **RADIOACTIVIDAD.**
 - Magnitudes asociadas con el campo de radiación producido por determinadas sustancias.
- **RADIOPROTECCIÓN.**
 - Magnitudes relacionadas con los efectos biológicos producidos por las radiaciones en determinados órganos o tejidos.

MAGNITUDES RADIOMÉTRICAS (I)

FLUJO

Flujo de partículas:

$$\dot{N} = \frac{dN}{dt}$$

dN es el incremento en el número de partículas en el intervalo de tiempo **dt**

Unidad del S.I. : s^{-1}

Se define de manera análoga un flujo de energía con o el cociente entre dR y dt , donde dR representa el incremento de energía radiante en el intervalo de tiempo dt .

FLUENCIA

Fluencia de partículas:

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

dN es el número de partículas incidentes sobre una esfera de sección recta **da**

Unidad del S.I. : m^{-2}

Se define de manera análoga una fluencia de energía como:

$$\Psi = \frac{dR}{da}$$

Unidad del S.I. : Jm^{-2}

MAGNITUDES RADIOMÉTRICAS (II)

TASA DE FLUENCIA

$$\phi = \frac{d\Phi}{dt}$$

Donde $d\phi$ es el incremento de la fluencia de partículas en el intervalo de tiempo dt

Unidad del S.I. : $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Esta magnitud recibe el nombre de densidad de flujo de partículas.

También se define una tasa de fluencia de energía, como el cociente $d\Psi$ entre dt

MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS (I)

EXPOSICIÓN



Exposición es el cociente:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

dQ es la carga total de los iones de un solo signo producidos en aire, cuando todos los e^- liberados por los fotones absorbidos en la masa **dm** hayan sido detenidos completamente en el seno del aire

Unidad especial : Roentgen (R).

Unidad del S.I. : Culombio/Kilogramo (C/Kg)

Es la exposición producida por un haz de radiación X ó γ que absorbido en 1 Kg. de masa de aire seco en condiciones normales de presión y temperatura, libera 1 culombio de carga de cada signo.

Relación entre unidades antiguas y del S.I.

- 1 C / Kg. = 3876 R

- 1 R = 2.58×10^{-4} C / Kg.

MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS (II)

EXPOSICIÓN (Observaciones)

- ☐ Se definió antes la unidad (**Roentgen**) que la propia magnitud.
- ☐ Hace referencia únicamente **al poder de ionización de la radiación X ó γ en un medio específico (aire).**
- ☐ El efecto medido (ionización en aire) es de escaso interés para el estudio de los efectos producidos por las radiaciones en los tejidos.
- ☐ Existen problemas de medición de la exposición para energías de fotones de unos pocos keV y por encima de varios MeV (difícil mantener en estas situaciones condiciones de equilibrio).
- ☐ Es una magnitud de paso hacia la **Magnitud Dosis Absorbida** .
- ☐ Dificultad de utilizar la unidad del SI (C/Kg) por su gran dimensión y difícil relación con el Roentgen (R).



MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS (III)

TASA DE EXPOSICIÓN

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}$$

Representa la variación de la exposición dX en un intervalo de tiempo dt

Niveles medios de tasa de exposición a la radiación gamma natural en España

Unidad especial : R/s (Roentgen /segundo)

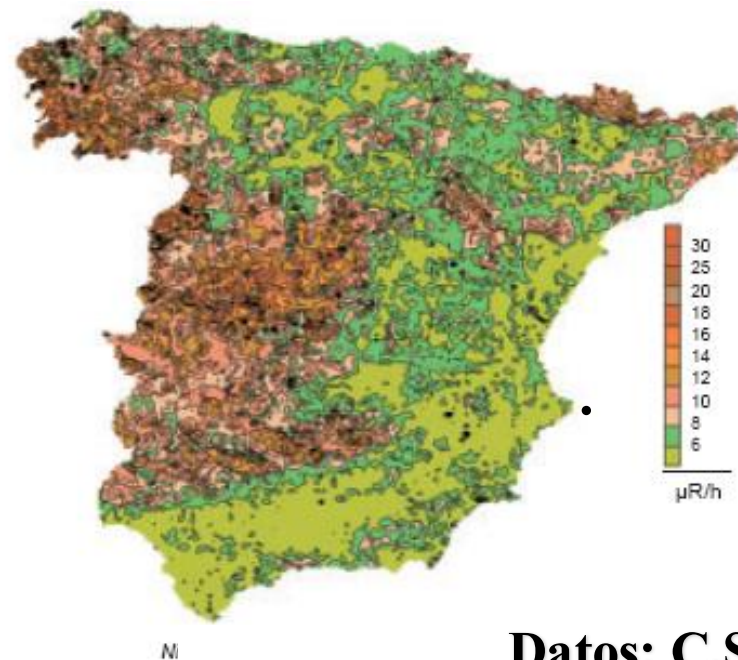
Se utilizan submúltiplos :

R/h, mR/h , μ R/h

Unidad S.I.: C/Kg•s (Culombio / Kilogramo•s)

Apenas se utiliza en la práctica por su desmesurada dimensión.

Ejemplo: Niveles medios de tasa de exposición a la radiación gamma natural en nuestro país . (Proyecto MARNA - CSN)



Datos: C.S.N.

MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS (IV)

KERMA

Kerma es el cociente:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

entre la suma de todas las energías cinéticas iniciales de todas las partículas ionizantes cargadas, dE_{tr} liberadas por partículas ionizantes no cargadas, en un material de masa dm .

Unidad antigua : rad

Unidad del S.I. : Gray (Gy)=Julio/Kilogramo (J/Kg)

Ventajas de Kerma frente a Exposición:

- Es válido tanto para neutrones como para fotones
- Sus valores numéricos expresados en Gy se parecen mucho a los de dosis absorbida en aire, agua o tejido biológico blando, en condiciones de equilibrio de partículas cargadas.

Tasa de Kerma , es la variación de Kerma en el intervalo de tiempo .

Unidad del S.I. : Gray/s (Gy/s)

MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS (V)

DOSIS ABSORBIDA

Dosis absorbida es el cociente:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

Donde **dε** es la energía media impartida por la radiación ionizante y absorbida en una cantidad de masa **dm** de un material específico.

Unidad especial: Rad.

Unidad del S.I. : Gray (Gy). (J/Kg)

$$1\text{mGy} = 10^{-3} \text{ Gy}; 1 \mu\text{Gy} = 10^{-6} \text{ Gy}.$$

Relación entre unidad especial y unidad del S.I.

- 1 Gray = 100 rad
- 1 rad = 10^{-2} Gy = 1cGy

TASA DE DOSIS ABSORBIDA

Variación de la dosis absorbida **dD** en un pto. de un material en un intervalo de tiempo **dt**.

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Unidad especial: rad / s

- Se utilizan submúltiplos
rad/h; mrad/h.

Unidad del S.I. : Gy / s

- Se utilizan submúltiplos :
mGy/h; μGy/h.

MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS (VI)

DOSIS ABSORBIDA (Observaciones)

- ☐ Es la **magnitud dosimétrica** de mayor interés.
- ☐ Hace referencia a la E. impartida por la R.I. de cualquier tipo y absorbida en un punto de un material específico.
- ☐ El efecto medido es de gran interés para estudios de radiobiología y protección contra las radiaciones.
- ☐ Fácil relación entre las unidades antiguas y las del S.I.
- ☐ Es una magnitud que se relaciona de forma sencilla con otras magnitudes (Exposición , Dosis Equivalente, etc.) .
- ☐ Es el pilar básico para el cálculo de las magnitudes limitadoras y operacionales .

MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS (VII)

TRANSFERENCIA LINEAL DE ENERGÍA (LET , L_{Δ})

$$L_{\Delta} = \frac{dE}{dl}$$

Es la **energía** disipada por una partícula cargada al atravesar una longitud **dl** en todas aquellas colisiones con e- en las que la pérdida de energía es $< \Delta$).

Unidad del S.I. : J/m

- Otras unidades: keV/ μ m , eV/m, MeV/m

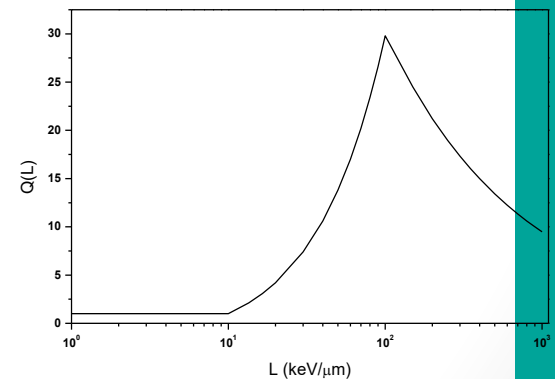
Consideraciones generales:

El **LET** tiene gran importancia en la Radiobiología y Radioprotección, pues sirve de base para el cálculo de los factores que ponderan la calidad de radiación en la evaluación del daño biológico.

En nuestro reglamento se considera la **Transferencia Lineal de Energía** no restringida (L_{∞}). Si se consideran todas las colisiones en la pérdida de energía, $L_{\Delta} = L_{\infty}$ y el medio específico es Agua)

ES LA MAGNITUD DE PASO A LA DOSIS EQUIVALENTE

Factor de Calidad Q en función del LET



RELACIÓN ENTRE MAGNITUDES (I)

RELACIÓN ENTRE EXPOSICIÓN Y D.ABSORBIDA

$$D = f \cdot X$$

D: Dosis absorbida en un pto. de un material

X: Exposición .

f: factor de relación entre X y D.

f está tabulado para distintos materiales y energías. (Tabla 3)

f es aproximadamente 1 para todas las energías cuando el material irradiado es tejido blando y se utilizan las unidades antiguas.(rad, R).

TABLA 3

Factor f que relaciona DOSIS ABSORBIDA con EXPOSICIÓN para FOTONES de energías desde 10 keV a 2 MeV en condiciones de equilibrio

Energía de fotones (keV)	Dosis absorbida/exposición					
	Agua		Hueso		Músculo	
	Gy	kg/C	rad/R	Gy	kg/C	rad/R
10	35,4	0,914	135	3,48	35,8	0,925
15	35,0	0,903	150	3,86	35,8	0,924
20	34,7	0,895	158	4,09	35,8	0,922
30	34,4	0,888	165	4,26	35,7	0,922
40	34,5	0,891	157	4,04	35,9	0,925
50	35,0	0,903	137	3,53	36,1	0,932
60	35,6	0,920	113	2,91	36,5	0,941
80	36,7	0,946	75,4	1,94	36,9	0,953
100	37,2	0,960	56,2	1,45	37,2	0,960
150	37,6	0,971	41,3	1,065	37,4	0,964
200	37,7	0,973	38,1	0,982	37,4	0,965
300	37,8	0,974	36,6	0,944	37,4	0,966
400	37,8	0,974	36,3	0,936	37,4	0,966
500	37,8	0,975	36,2	0,933	37,4	0,966
600	37,8	0,975	36,1	0,932	37,4	0,966
800	37,8	0,975	36,1	0,931	37,4	0,966
1000	37,8	0,975	36,1	0,931	37,4	0,966
1500	37,8	0,975	36,0	0,930	37,4	0,966
2000	37,8	0,974	36,1	0,931	37,4	0,965

RADIATIVIDAD (I)

ACTIVIDAD



Actividad de una cantidad de un radionucleido en un determinado estado energético es el cociente:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

dN : valor esperado del nº de transiciones nucleares espontáneas (desintegraciones) que se producen.

Dt : intervalo de tiempo

Unidad especial : Curio (Ci). Es un patrón de masa (actividad de 1 gramo de Ra-226 en condiciones normales de laboratorio).

Unidad del S.I. : Becquerelio (s^{-1}) (Bq).

- 1 Bq = 1 transformación por segundo. 1 d.p.s. (s^{-1}). Se utilizan múltiplos:

$$\text{MegaBecquerelio (MBq)} = 10^6 \text{ Bq}$$

$$\text{KiloBecquerelio (KBq)} = 10^3 \text{ Bq}$$

- 1 Ci = 3.7×10^{10} Bq. Se utilizan submúltiplos de la unidad:

$$\text{NanoCurio (nCi)} = 10^{-9} \text{ Ci} = 37 \text{ Bq};$$

$$\text{MicroCurio (}\mu\text{Ci)} = 10^{-6} \text{ Ci} = 37.000 \text{ Bq} = 37 \text{ KBq}$$

MAGNITUDES EN PROTECCIÓN RADIOLÓGICA (I)

EQUIVALENTE DE DOSIS EN UN PUNTO

$$H = D \cdot Q$$

D= Dosis absorbida en un pto. de un material

Q = factor de calidad de la radiación.

Factor de calidad Q .- Q es una constante adimensional que pondera la efectividad biológica de la calidad de radiación .
(Se calcula observando la distribución de la energía a nivel microscópico : LET).

Unidad especial: Rem (*).

Unidad SI : J/Kg. Sievert (Sv). (*)

Relación entre ambas unidades:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

(*) Al ser Q una constante sin dimensión, la unidad de dosis equivalente del SI es también J/kg .

Para distinguir las unidades de **Equivalente de Dosis, H, de las de Dosis Absorbida** , se utilizan nombres propios diferentes (Sievert y Gray respectivamente).

MAGNITUDES EN RADIOPROTECCIÓN (II)

TASA DE EQUIVALENTE DE DOSIS

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt}$$

Variación del equivalente de dosis **dH** en el intervalo de tiempo **dt**

Tasas de dosis equivalente debida a la radiación cósmica a diferentes altitudes

Unidad especial: rad/s.

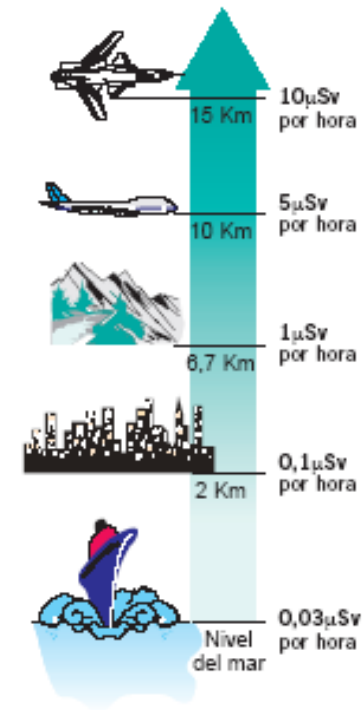
(Se utilizan submúltiplos: rem/h, mrem/h)

Unidad SI : Sievert / s . (Sv/s)

(Se utilizan submúltiplos: mSv/h ; μSv/h)

Ejemplo: Radiación cósmica a diferentes altitudes.

(Fuente de datos: Guía del Profesor. CSN)



MAGNITUDES LIMITADORAS (I)

DOSIS EQUIVALENTE EN ORGANO: H_T

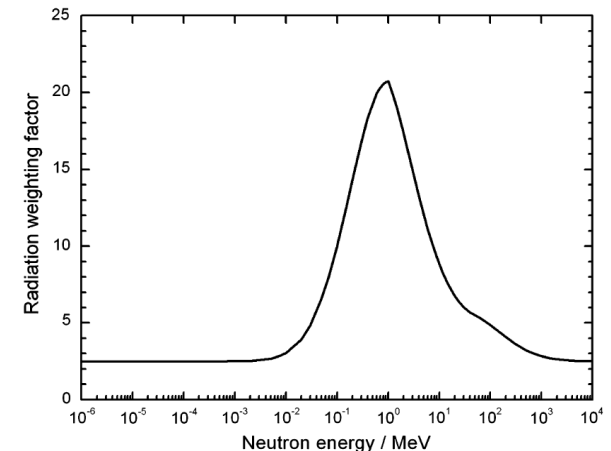
$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

Unidad SI: Sievert (Sv).

- $D_{T,R}$.- Es la **dosis absorbida promediada** sobre el tejido u órgano T procedente de la radiación R .

- w_R .- **Factor ponderal de la radiación R** . Constante adimensional que pondera la radiación incidente en el órgano ó tejido. Calculado a partir de la observación del LET.

Tipo de radiación	w_R ICRP 60	w_R ICRP 103
Fotones	1	1
Electrones y muones	1	1
Protones y piones cargados	5	2
•Partículas alfa, fragmentos de fisión, núcleos pesados	20	20
•Neutrones	Valor mínimo 5	Una curva continua en función de la E_n



Factor de ponderación para neutrones (ICRP 103, 2007)

MAGNITUDES LIMITADORAS (II)

DOSIS EFECTIVA (E)

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

Unidad SI: Sievert (Sv).

La **Dosis Efectiva “E”** es la suma de las dosis ponderadas en todos los tejidos y órganos del cuerpo especificados en la normativa (RPSRI Anexo II) a causa de irradiaciones internas y externas.

- H_T es la dosis equivalente en un tejido u órgano T
- w_T es el factor de ponderación del tejido.

FACTORES DE PONDERACION DEL TEJIDO

Tejido / órgano	w_T ICRP 60	w_T ICRP 103
Gónadas	0,20	0,08
Médula ósea, colon, pulmón, estómago, mama y resto del organismo	0,12	0,12
Vejiga, esófago, hígado y tiroides	0,05	0,04
Superficie ósea, cerebro, glándulas salivales, piel	0,01	0,01
Cerebro, glándulas salivares	-	0,01