

Radiaciones: Aplicaciones y riesgos para la salud

Francisco Roig Petit

**Conferencia APRJUV
6 de junio de 2013**

Indice

Física de las radiaciones

- 1. Radiación**
 - 1.1 ¿Qué son las radiaciones?**
 - 1.2 Dualidad onda-partícula de las radiaciones**
 - 1.3 Tipos de radiaciones**
 - Radiaciones electromagnéticas (fotones)**
 - Radiaciones corpusculares**

- 2. Materia**
 - 2.1 Constitución de la materia**
 - 2.2 Estructura y propiedades de los átomos**
 - 2.3 Fuerzas o interacciones de la naturaleza**

- 3. Interacción radiación-materia**
 - 3.1 Interacción de los fotones con la materia**
 - 3.2 Interacción de los electrones con la materia**
 - 3.3 Interacción de los neutrones con la materia**

Producción de radiaciones

- 1. Aparatos de RX**
- 2. Aceleradores de partículas**
- 3. Sustancias radiactivas**
- 4. Reactores nucleares**

Aplicaciones de las radiaciones

- 1. Instalaciones radiactivas**
- 2. Aplicaciones médicas**
 - 2.1 Radiodiagnóstico**

Radiografía y radioscopia

TAC

2.2 Radioterapia

2.3 Radiocirugía

2.4 Medicina nuclear

3. Aplicaciones industriales, agroalimentarias y en investigación

3.1 Aplicaciones en la industria

3.2 Aplicaciones agroalimentarias

3.3 Aplicaciones en investigación

Protección radiológica

- 1. Introducción**
- 2. Dosis de radiación**
- 3. Efectos biológicos de las radiaciones**
- 4. Procedencia de las radiaciones**
- 5. Organismos competentes y legislación sobre Protección Radiológica**
- 6. Criterios básicos de Protección Radiológica**
- 7. Cómo protegernos: distancia, tiempo y blindaje**

Radiaciones no ionizantes (RNI)

- 1. ¿ Qué son las RNI ?**
- 2. Normas de Protección contra las RNI**
- 3. Aplicaciones y riesgos de las RNI**

Física de las radiaciones

1. Radiación

1.1 ¿ Qué son las radiaciones?

Las radiaciones son flujos o corrientes de partículas microscópicas. Su naturaleza y energía pueden ser muy variadas.

Nosotros vivimos inmersos, siempre y en todo lugar, en campos de radiaciones, aunque no somos conscientes de su presencia ya que, salvo la luz visible, nuestros sentidos son incapaces de detectarlas. Pensemos que si vemos la TV, oímos la radio y nos comunicamos por teléfono o internet es gracias a la presencia de las radiaciones electromagnéticas emitidas por las antenas que llegan hasta los receptores de nuestras casas; incluso dentro de nuestras casas tenemos fuentes de ondas electromagnéticas (bombillas, wifi, microondas, etc.) y hasta dentro de nuestros bolsillos (móviles).

1.2 Dualidad onda-partícula de las radiaciones

La naturaleza microscópica de las partículas que componen las radiaciones hacen necesario que para describir su comportamiento hayamos de utilizar la Física Cuántica. Una característica muy curiosa de dichas partículas es que se comportan simultáneamente como partículas y ondas y hemos de renunciar a “imaginarlas” tal como imaginamos objetos de nuestra vida cotidiana y según qué aspectos estudiemos podemos imaginarlas bien como un corpúsculo o como una onda

propagándose por el espacio. Las partículas tienen a la vez propiedades de corpúsculos como son la masa, y la velocidad y propiedades de ondas, como la longitud de onda y la frecuencia, ya que son capaces de dar lugar a fenómenos ondulatorios como son la interferencia y la difracción. Las relaciones entre magnitudes corpusculares y ondulatorias son las relaciones de De Broglie

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad v = \frac{E}{h}$$

dónde h es la constante de Planck, cuyo valor es muy pequeño ($6,6 \times 10^{-34}$ J s), p es el momento de la partícula y E su energía.

La razón por la que las partículas microscópicas se comportan de esa forma tan rara es que no siguen trayectorias a lo largo de curvas bien definidas ya que para ello deberían tener simultáneamente su posición y velocidad bien definidos y por tanto deberíamos de ser capaces de medir a la vez estas dos magnitudes pero esto es IMPOSIBLE ya que el hecho de medir perturba el comportamiento del objeto medido. Por ejemplo si queremos saber la posición de un electrón le hemos de lanzar un fotón para verlo y al chocar con el electrón cambiará su velocidad, cuanto mayor sea la precisión de la medida de la posición más energía ha de tener el fotón y mayor será el cambio de la velocidad del electrón y mayor será su incertidumbre.

1.3 Tipos de radiaciones

Distinguiremos dos tipos básicos de radiaciones: las radiaciones electromagnéticas asociadas a los fotones que son partículas sin masa ni carga eléctrica y las radiaciones corpusculares debidas a corrientes de partículas bien cargadas (electrones, protones, partículas alfa (núcleos de He)) o neutras (neutrones)

Radiaciones electromagnéticas (fotones)

Las radiaciones electromagnéticas se interpretan como ondas dentro del marco de la Física Clásica y su base teórica quedó perfectamente establecida por las Ecuaciones de Maxwell.

Al estudiar las interacciones de la luz con la materia se puso de manifiesto el carácter corpuscular de la luz. Esto sucedió a principios del siglo XX y fue el origen del nacimiento de la nueva Física Cuántica. El primero en postular la naturaleza corpuscular de la luz fue Max Planck ya que era necesaria para explicar el espectro (que longitudes de onda se emiten y en qué proporción) de la radiación electromagnética emitido por el agujero de un horno a una cierta temperatura. La hipótesis de Planck fue usada poco después por Einstein para explicar las leyes del efecto fotoeléctrico que es la emisión de electrones por láminas metálicas al iluminarlas con luz. Las energías posibles de los fotones no eran cualesquiera sino que debían ser múltiplos de la frecuencia de la onda asociada multiplicada por el valor de una constante (constante de Planck h).

$$E = n h \nu$$

Dentro de la denominación de radiaciones electromagnéticas se incluyen múltiples tipos de radiaciones según cual sea su frecuencia o energía o alternatively su longitud de onda. Los fotones muy energéticos se asocian con ondas de altas frecuencias y longitudes de onda cortas mientras que los fotones de baja energía están asociados a bajas frecuencias y longitudes de onda largas.

En la siguiente figura se muestran los distintos nombres de la radiación electromagnética según cual sea su energía

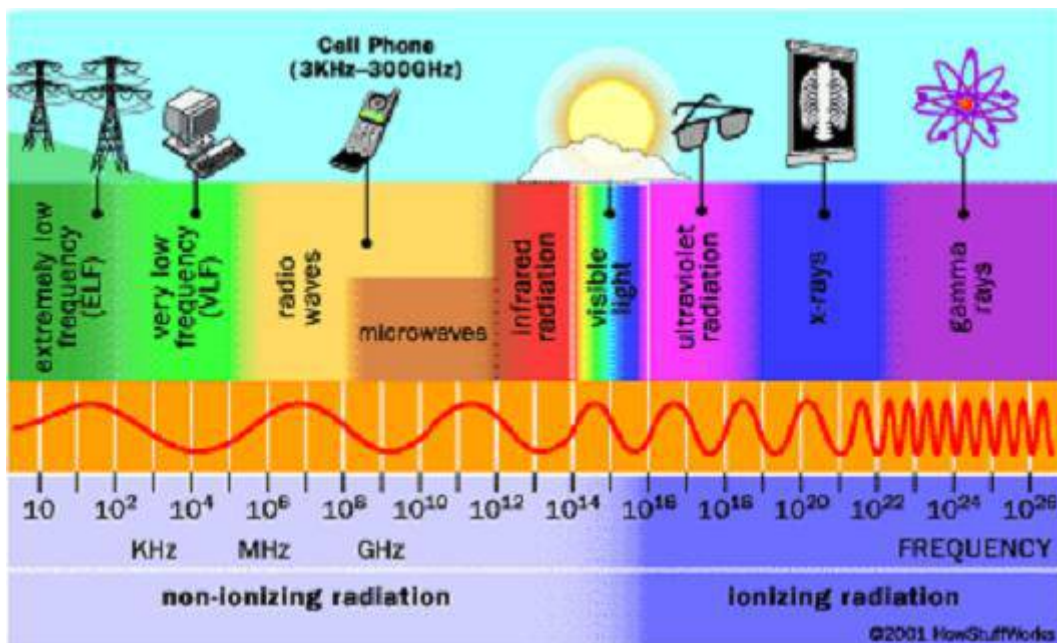


Figura 1. Espectro electromagnético

Radiaciones corpusculares

Radiación cósmica: Son haces de protones y alfas procedentes de estrellas y galaxias cercanas. Son desviados por el campo magnético terrestre y atenuados por la atmósfera. Se convierten en chorros de partículas variadas al interactuar con el aire. Dosis media 380 μ Sv/año.

Radiactividad (radiaciones alfa, beta y gamma): La radiactividad consiste en que los núcleos de algunas sustancias son inestables y se desintegran convirtiéndose en otros núcleos más estables, en el proceso de desintegración se emiten radiaciones de partículas o fotones. Las sustancias radiactivas pueden ser naturales ya que en la naturaleza existen pequeñas cantidades de algunas sustancias que emiten radiaciones, hablamos entonces de radiactividad natural; por ejemplo el carbono-14, el uranio, etc. Por otra parte los hombres producen sustancias radiactivas artificiales, por ejemplo productos de fisión de centrales nucleares, radiosótopos para aplicaciones médicas o industriales, etc.

Las radiaciones emitidas por las sustancias radiactivas tanto naturales como artificiales se clasifican como *radiaciones alfa, beta y gamma*. Las radiaciones gamma son radiaciones electromagnéticas que hemos descrito en el apartado anterior. Las radiaciones alfa y beta, emitidas por los núcleos atómicos de algunas sustancias, son de tipo corpuscular: las radiaciones beta son electrones o positrones mientras que las partículas alfa son núcleos de helio formados por dos protones y dos neutrones.

2. Materia

2.1 Constitución de la materia

Toda la materia que existe está formada por agregados de átomos en forma de redes cristalinas, moléculas de complejidad y estructura muy variadas, A pesar de la enorme variedad y complejidad de las cosas que existen, estrellas, piedras, seres humanos, etc., todos están formados por un centenar y pico de átomos distintos. Por otra parte todos estos átomos están formados por sólo tres tipos de partículas distintas: electrones, protones y neutrones.

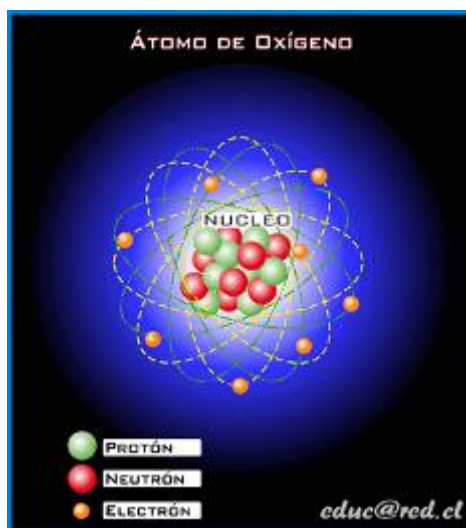


Figura 2. Estructura de un átomo

2.2 Estructura y propiedades de los átomos

Un átomo está formado por un núcleo constituido por un número aproximadamente igual de protones y neutrones (que llamamos nucleones indistintamente) alrededor del cual giran los electrones, de forma similar a como los planetas giran alrededor del sol. El número de protones se llama *número atómico* Z y el número de nucleones se llama *número másico* A (igual aproximadamente a $2Z$)

Los átomos tienen masas muy pequeñas, basta pensar que unos 6×10^{23} átomos de una sustancia de número másico A pesan tan solo unos A gramos. Los protones y neutrones tienen aproximadamente la misma masa que es muchísimo mayor (unas 2000 veces) que la masa de los electrones. Por tanto la masa del átomo está prácticamente toda (99,9 %) concentrada en el núcleo, mientras que los electrones forman nubes muy tenues girando alrededor del núcleo.

Los núcleos atómicos tienen una forma esferoidal y su radio es de $1 - 6 \text{ fm}$ ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$). El tamaño de los átomos viene determinado por los radios de las órbitas electrónicas más alejadas de los núcleos y es del orden de $0,5 - 5 \text{ A}$ ($1 \text{ A} = 10^{-10} \text{ m}$). Por tanto el tamaño de los átomos es del orden de 10,000 a 100,000 veces mayor que el de los núcleos y la materia está en realidad prácticamente vacía. Lo que nosotros percibimos como materia es en realidad las fuerzas entre las partículas que componen la materia.

2.3 Fuerzas o interacciones de la naturaleza

Los átomos solo pueden existir si existen fuerzas o interacciones entre sus componentes que los enlacen. Así pues deben existir por una parte interacciones entre los electrones de la corteza y el núcleo y por otra parte deben existir interacciones entre los nucleones que los mantengan ligados.

Llegados a este punto demos una breve descripción de las fuerzas o interacciones presentes en la naturaleza y luego las aplicaremos a explicar la estructura atómica. En la naturaleza existen cuatro interacciones básicas. Estas interacciones entre partículas fundamentales no son interacciones a distancia sino que se deben al intercambio de partículas portadoras o mensajeras, también llamadas bosones gauge. Las cuatro interacciones de la naturaleza y sus bosones gauge son:

Interacción nuclear fuerte. Gluones. (Fuerzas entre nucleones)
Interacción débil. Bosones W y Z. (Desintegraciones de los nucleones)
Interacción electromagnética. Fotones
Interacción gravitacional: Gravitones

Una característica muy importante de estas interacciones es su alcance. Las dos primeras tienen un alcance muy corto ya que solo se manifiestan en el interior de los núcleos por lo que no tenemos una experiencia directa de las mismas a escala macroscópica aunque sí que tenemos evidencias indirectas ya que de lo contrario no existirían ni los núcleos, ni los átomos, ni la materia tal como la conocemos. En cambio las dos últimas interacciones tienen un alcance mucho mayor, aunque son mucho más débiles, y sus consecuencias son palpables en nuestra vida cotidiana.

El reto más importante de la Física desde la década de los 70 hasta nuestros días es y continúa siendo la unificación de estas cuatro interacciones en una interacción única dentro de una teoría global de la naturaleza que se ha llamado Teoría del Todo.

La búsqueda de esta Teoría no se debe solamente a imperativos de simplicidad y coherencia entre teorías físicas sino a que existen evidencias de que las diferencias entre las interacciones se hacen cada vez menores a medida que crece la energía intercambiada entre las partículas. El primer paso en la unificación fue dado a principios de los 70 con la Teoría Electro débil que unió las interacciones electromagnéticas y débiles. Durante un tiempo esta teoría coexistió con la llamada Cromodinámica Cuántica que daba una explicación adecuada de la interacción Fuerte. Posteriormente estas dos teorías han sido unificadas en lo que se ha llamado el Modelo Standard cuya validez ha quedado corroborada por el reciente descubrimiento del bosón de Higgs. El último paso será la unificación del Modelo Standard con la Gravitación para conseguir la Teoría del Todo. No obstante hemos de señalar que cada teoría parcial es perfectamente válida dentro de su ámbito de aplicación (energía implicada) del mismo modo que la Física Clásica es un caso límite (a bajas energías) de la Física Cuántica pero sus leyes siguen siendo válidas y coherentes con los hechos experimentales en un muy alto grado de precisión.

Volviendo al caso que nos ocupa que es la estabilidad de los átomos, la causa de que los átomos existan es la interacción electromagnética entre el núcleo, cuyos protones tienen carga eléctrica positiva y los electrones de la corteza cargados negativamente ya que como todos sabemos cargas de signo distinto se atraen. Sin embargo esta estabilidad atómica conduciría a la inestabilidad de los núcleos ya que los protones se repelen eléctricamente y los núcleos estallarían a no ser que exista otra fuerza entre ellos, de mayor intensidad que la fuerza eléctrica, que los mantenga unidos, esta fuerza es la interacción Fuerte.

3. Interacción radiación-materia

Vamos a centrarnos en las interacciones relacionadas con los aspectos prácticos de las aplicaciones de las radiaciones

3.1 Interacción de los fotones con la materia

Estructura energética de los electrones atómicos

De acuerdo con la Física Cuántica, los electrones de los átomos no tienen energías cualesquiera. Podemos imaginarlos situados en capas o niveles con energías de enlace bien definidas que son tanto mayores cuanto más próximos estén al núcleo. La energía de enlace de un electrón atómico es la energía que debemos proporcionarle para sacarlo del átomo y quede libre y en reposo. Si asignamos energía cero a un electrón en reposo no ligado entonces las energías de enlace son convencionalmente negativas ya que al sumarle la energía positiva suministrada se queda con energía cero.

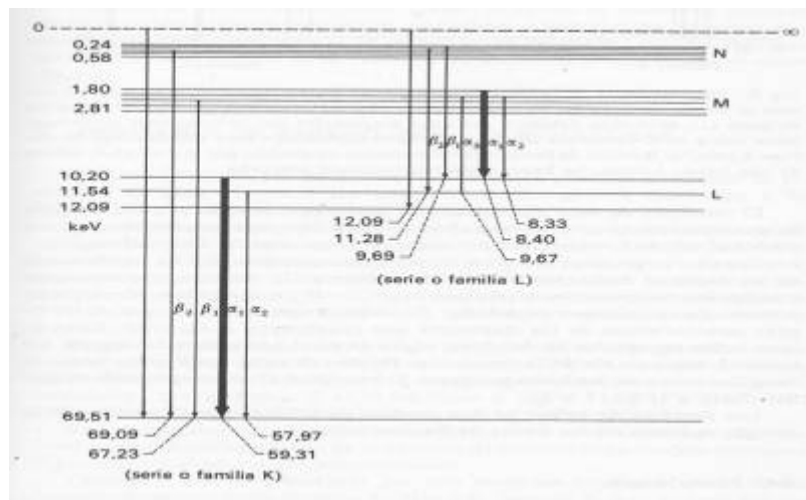


Figura 3. Niveles de energía de un átomo de wolframio

Los átomos, al igual que muchos sistemas físicos, tienden a estar en el estado de energía más baja posible por lo que sus niveles energéticos más bajos (más ligados) posibles están llenos de electrones y los niveles superiores más altos están vacíos. Si por cualquier causa esto no es así y hay huecos en niveles bajos, estos huecos son ocupados espontáneamente por electrones situados en niveles superiores.

Un electrón de un átomo situado en un nivel con energía E_{in} puede absorber energía de un fotón y pasar a un estado con energía superior E_{fin} , quedando el átomo en un estado *excitado*. El fotón absorbido debe tener exactamente una energía igual a $E_{fin} - E_{in}$. Como las energías de los niveles energéticos tienen valores bien definidos, sucederá lo mismo con las energías de los fotones absorbidos. Del mismo modo si un átomo emite fotones por haber huecos en su corteza electrónica y producirse saltos de electrones de niveles superiores a inferiores, las energías posibles de los fotones emitidos serán las mismas que las de los fotones absorbidos. Como cada átomo tiene un conjunto de niveles energéticos propio y distinto de los demás átomos, la luz emitida o absorbida por un átomo también será característica de ese átomo y nos servirá para identificarlo como si fuera su huella digital. Este hecho tiene múltiples aplicaciones, por ejemplo sirve para averiguar cuáles son los elementos químicos presentes en la estrellas haciendo un análisis espectral (averiguando cuáles son las longitudes de onda o energías de los fotones presentes) de la luz emitida por las mismas.

Tipos de interacciones fotón - electrón atómico

Cuando un haz de fotones incide sobre una lámina de material, los fotones interactúan electromagnéticamente con los electrones de los átomos del material mediante varios mecanismos. Si las energías no son muy altas (hasta 1 MeV), funcionan sólo dos mecanismos

Efecto fotoeléctrico

Efecto Compton

y a energías superiores entran en juego nuevos mecanismos como la producción de pares electrón-positrón y las reacciones fotonucleares que no estudiaremos.

Efecto fotoeléctrico. En el efecto fotoeléctrico el fotón incidente es absorbido por un electrón. El fotón desaparece y su energía es transferida íntegramente al electrón (fotoelectrón). Según cual sea la energía del fotón incidente el fotoelectrón puede pasar a un nivel energético más alto y el átomo queda *excitado* o bien el fotoelectrón puede ser arrancado del átomo y quedar libre, en este caso se produce el átomo queda *ionizado*. Como se producen huecos en la estructura electrónica del átomo, estos huecos son rellenados por electrones de capas más altas y se emiten fotones de fluorescencia. La probabilidad de que se produzca el efecto fotoeléctrico depende. Si la energía de los fotones incidentes es muy baja solo pueden transferir energía a los electrones menos ligados (los más externos) y los fotones de fluorescencia son fotones de luz visible (color de las sustancias).

Fotones : Disminuye MUY rápidamente con la energía ($1/E^3$)

Material: Aumenta con la densidad (d) y aumenta MUY rápidamente (Z^3) con el número atómico

Efecto Compton. Llamamos efecto Compton a la colisión de un fotón con un electrón. A diferencia del efecto fotoeléctrico, el fotón no desaparece sino que se emite un fotón secundario de menor energía. La energía del fotón primario incidente se reparte entre el electrón Compton y el fotón secundario, el reparto no es equitativo y depende de la energía del fotón primario, si la energía del fotón primario es baja casi toda la energía se la lleva el fotón secundario (choque elástico fotón – átomo) y apenas se transfiere energía al átomo, a medida que aumenta la energía del fotón se va transfiriendo cada vez más energía a los electrones. Al igual que en el efecto fotoeléctrico, los átomos pueden quedar excitados o ionizados según cual sea la energía adquirida por el electrón Compton.

La probabilidad de que se produzca una colisión Compton depende de

Fotones: Disminuye con la energía de los fotones ($1/E$)

Material: Aumenta con la densidad (d) y NO depende del número atómico

Atenuación de un haz de fotones

Cuando un haz de fotones (que llamaremos fotones *primarios*) penetra en un medio material se producen las interacciones antes descritas. Como consecuencia de las mismas van desapareciendo fotones primarios, a esta disminución la llamamos *atenuación* del haz. Parte de la energía de los fotones primarios se transfiere a los electrones del medio provocando ionizaciones y excitaciones de los átomos, estos electrones dan lugar a nuevas ionizaciones y al final la energía de los electrones queda depositada en el medio, decimos que la energía es *absorbida* por el medio. Otra parte de la energía se transfiere a los fotones secundarios cuya energía es menor que la de los fotones primarios y que se emiten en todas direcciones, hablamos entonces de energía *dispersada*.. En resumen cuando un haz de fotones incidentes de energía y dirección bien definidos penetra en un medio parte de su energía queda depositada en el medio (absorción) y parte se reemite como un haz de fotones con energías y direcciones diferentes del haz incidente (*dispersión*) que se superponen al mismo y lo difuminan (*ensucian*).

Si medimos el número de fotones transmitidos a través de una lámina de material en función del espesor de la lámina y tenemos la precaución de colimar mucho el haz para detectar solo los fotones primarios y no los secundarios se obtiene una ley de atenuación de tipo exponencial

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

donde I es la intensidad (fotones/superficie x tiempo) del haz emergente e I_0 la del haz incidente, x es el espesor de la lámina y μ es el coeficiente de atenuación que nos da la probabilidad de interacción del fotón con el material debida a los mecanismos antes descritos, es decir

$$\mu = \sigma(\text{Compton}) + \tau(\text{Fotoeléctrico}) + \pi(\text{Pares}) + \dots$$

En la primera figura se muestra como varía μ/ρ con la energía de los fotones primarios y con el número atómico del medio y en la segunda figura se muestra como disminuye el número de fotones primarios al aumentar el espesor del material.

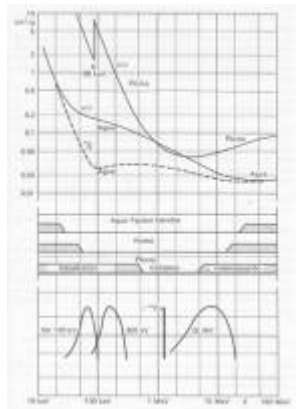


Figura 4. Variación de μ/ρ con la energía de los fotones

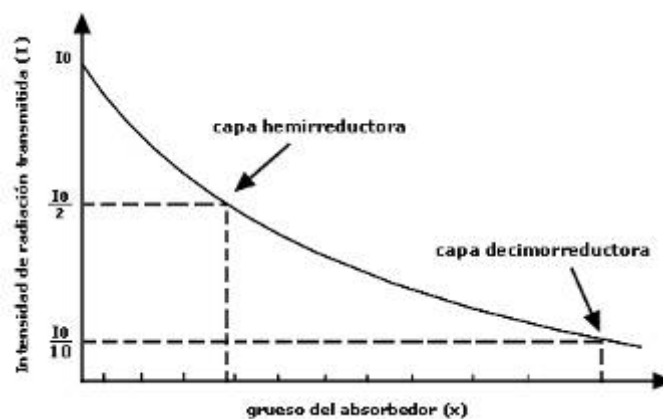


Figura 5. Ley de atenuación exponencial de una haz de fotones

A la vista de estas figuras se deducen algunas consecuencias prácticas sobre cómo protegerse de un haz de fotones. De la primera figura vemos que es conveniente elegir como material de blindaje un material de número atómico alto y de densidad alta. El elemento ideal es el plomo que tiene las ventajas adicionales de ser barato y de fácil manipulación. De la segunda figura

se deduce que el haz de fotones nunca es atenuado por completo aunque desde luego su intensidad puede ser atenuada lo bastante para que no sea peligroso para nuestra salud.

3.2 Interacción de los electrones con la materia

Los electrones interactúan electromagnéticamente con los átomos de la materia mediante dos mecanismos básicos:

- Colisiones con los electrones
- Frenado por los núcleos

Colisión. Los electrones colisionan con los electrones de los átomos y provocan su ionización o excitación, rompiendo enlaces atómicos. Como consecuencia son producidos nuevos electrones que siguen ionizando el medio.

Frenado. Otro mecanismo de pérdida de energía es la interacción coulombiana de los electrones con los núcleos atómicos con carga positiva. Como consecuencia de esta interacción los electrones son desviados de sus trayectorias y pierden energía mediante la emisión de un fotón cuya energía puede tomar cualquier valor entre cero y la energía del electrón incidente. Estos fotones se llaman *radiación de frenado*

La pérdida de energía por los electrones se cuantifica mediante el parámetro S que se llama *pérdida lineal de energía* definido por

$$S = \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

donde ΔT es la energía que pierde el electrón al atravesar un espesor Δx de material.

La pérdida lineal de energía se desdobra en una parte debida a la colisión S_c y otra debida al frenado S_f

$$S = S_c + S_f$$

En la figura se observa como depende las pérdidas de energía por colisión y frenado con la energía de los electrones incidentes

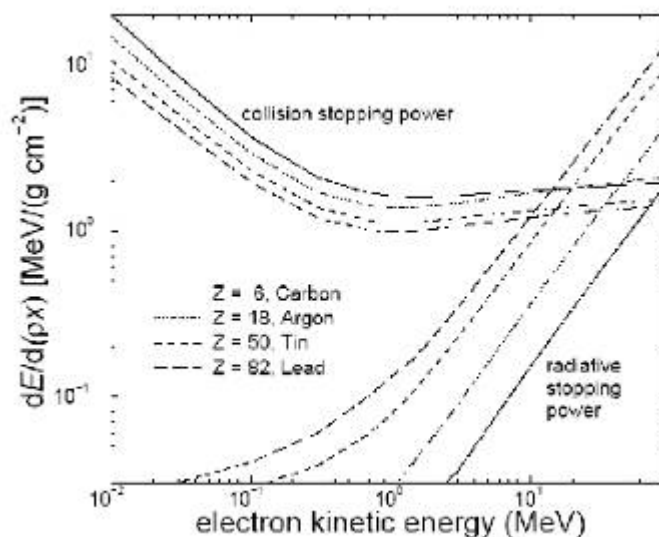


Figura 6. Variación de S con energía T

Como podemos observar para energías bajas solo son importantes las pérdidas por colisión, las pérdidas por frenado solo aparecen a partir de energías de unos 100 MeV, su principal interés es que es uno de las fuentes de producción de rayos X en sustancias de Z alto.

Un electrón de energía inicial T_0 va perdiendo progresivamente su energía en el medio y su trayectoria termina cuando su energía es prácticamente nula (energía de agitación térmica 0,025 eV).

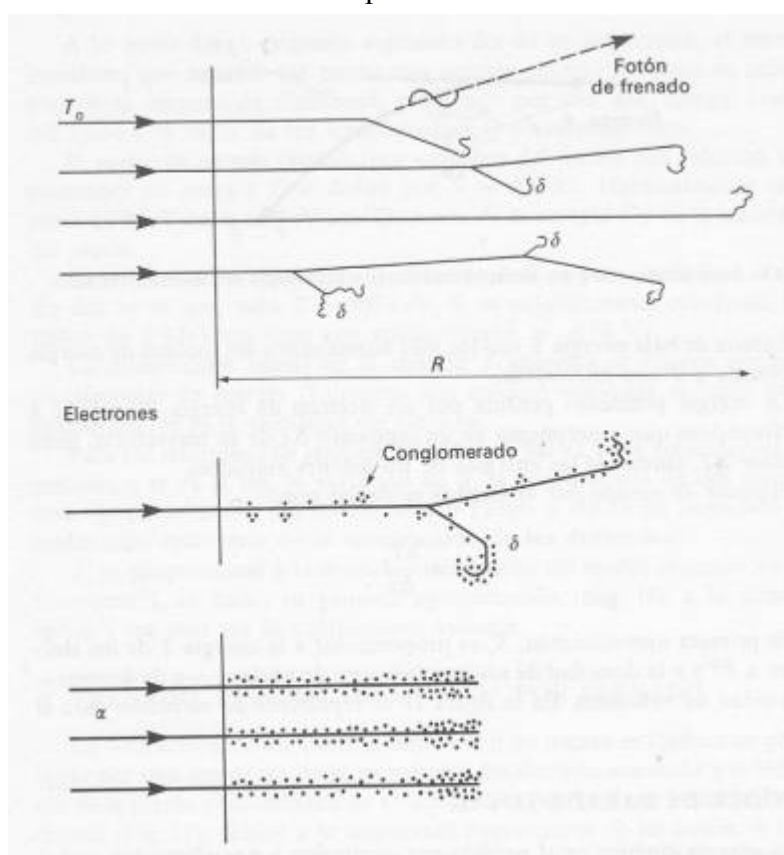
Al principio los electrones efectúan pequeñas transferencias de energía y su trayectoria es bastante rectilínea, al final de su recorrido se producen más interacciones y la trayectoria adquiere el aspecto de un ovillo irregular.

A diferencia de los fotones, los electrones tienen un alcance bien definido. Así por ejemplo el alcance de los electrones en el agua $R(cm)$ viene dado por

$$R(cm) = \frac{T_0(MeV)}{2}$$

En un medio de densidad ρ la longitud de la trayectoria es aproximadamente $R(agua)/\rho$.

En la figura se muestran las diferencias entre las trayectorias de un haz de fotones y electrones y la distribución de las ionizaciones producidas. También se muestra el caso de partículas cargadas pesadas.



Cuanto mayor es la carga y la masa de las partículas mayor es la transferencia lineal de energía (más ionizaciones y roturas de átomos) produce y por tanto más corto es su alcance.

Figura 7. Trayectorias e ionizaciones de fotones, electrones y partículas cargadas

Mientras que para frenar fotones es conveniente utilizar blindajes de plomo, el frenado de los electrones y otras partículas cargadas es mucho más sencillo ya que su alcance es mucho menor. Pero no por ello debemos ignorar su peligro ya que si por alguna circunstancia ingerimos sustancias emisoras beta (electrones) o alfa, el daño que producen puede ser muy grande por su alto poder de ionización.

3.3 Interacción de los neutrones con la materia

Los neutrones, como no tienen carga eléctrica, no interactúan con los electrones de la corteza atómica sino con los núcleos atómicos por lo que su poder de penetración es mayor que el de las partículas cargadas: electrones, protones, etc.

Los neutrones ceden su energía a los núcleos, la cesión de energía es máxima cuando la masa de los núcleos es igual a la masa de los neutrones, es decir cuando chocan con núcleos de hidrógeno formados por un único protón. Por esta razón los materiales que mejor frenan los neutrones son los materiales ricos en hidrógeno, como el agua, el agua pesada, el grafito, etc.

El núcleo del átomo de hidrógeno con el que choca el neutrón es emitido y aparece un protón en movimiento que pierde su energía ionizando el medio, es decir que los neutrones aunque no ionizan directamente la materia sí que lo hacen de forma indirecta y pueden causar graves daños a la materia viva. Este hecho a veces se usa para destruir tumores.

Cuando después de varias colisiones sucesivas, los neutrones han quedado prácticamente detenidos en el medio son fácilmente capturados por los núcleos atómicos que pueden pasar a ser núcleos inestables o radiactivos, este fenómeno se llama *activación*. En algunos casos de núcleos de peso atómico alto (uranio, polonio,...) el núcleo inestable puede romperse en varios trozos (*fisión*) y más neutrones libres que inducen nuevas fisiones originándose una *reacción en cadena* que es la causa por la que funcionan los reactores nucleares y explotan las bombas atómicas.

Producción de radiaciones

1. Aparatos de RX

Como ya hemos dicho los RX son radiaciones electromagnéticas de alta energía formadas por fotones con energías del orden de unas decenas hasta un par de centenas de keV (recordemos que 1 eV es la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado por una tensión eléctrica de 1 V).

Los RX, descubiertos a finales del siglo XIX, se producen en unos dispositivos llamados tubos de RX, cuyo esquema básico se muestra en la figura siguiente.

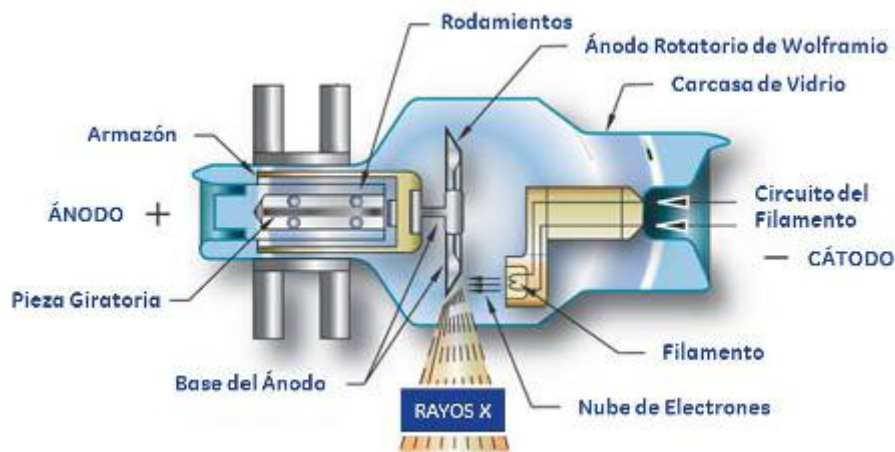


Figura 8. Tubo de RX

Básicamente consiste en un recipiente de vidrio en el que se ha hecho el vacío. En su interior hay dos electrodos: Un electrodo negativo, llamado *cátodo*, y un electrodo positivo, llamado *ánodo*, entre los que se establece una *alta tensión eléctrica* (de unas decenas de kV a dos centenas de kV). El cátodo está formado por un filamento similar al de una bombilla por el que se hace circular una corriente eléctrica que lo pone incandescente lo que provoca que emita electrones, cuánto mayor es la *corriente de cátodo* más electrones se emiten. Los electrones son acelerados por la alta tensión y chocan contra el ánodo cuyo componente esencial es una lámina de metal de gran peso atómico y con una temperatura de fusión muy alta, normalmente se utiliza wolframio. Los electrones interaccionan con los átomos de W y pierden su energía por colisiones y frenado, tal como ya hemos explicado. La mayor parte (más del 90%) de la energía depositada se transforma en calor y una pequeña parte se reemite en forma de RX que están formados por una parte por fotones debidos a transiciones de los electrones entre los niveles atómicos ya que se producen huecos en los mismos debidos a las ionizaciones, estos fotones tienen energías bien definidas y se llaman *radiación característica* y por otra por los fotones de la radiación de frenado que pueden tener cualquier energía desde cero hasta la energía de los electrones incidentes. El haz de fotones emitido por el ánodo atraviesa la envoltura de vidrio y sale fuera del tubo. Cuando los RX atraviesan el tubo los fotones de baja energía son absorbidos casi todos por el vidrio, por lo que el espectro de los rayos X emergentes tendrá la forma que se muestra en la figura, que corresponde al espectro experimental de los RX emitidos por un tubo de W a 220 kV.

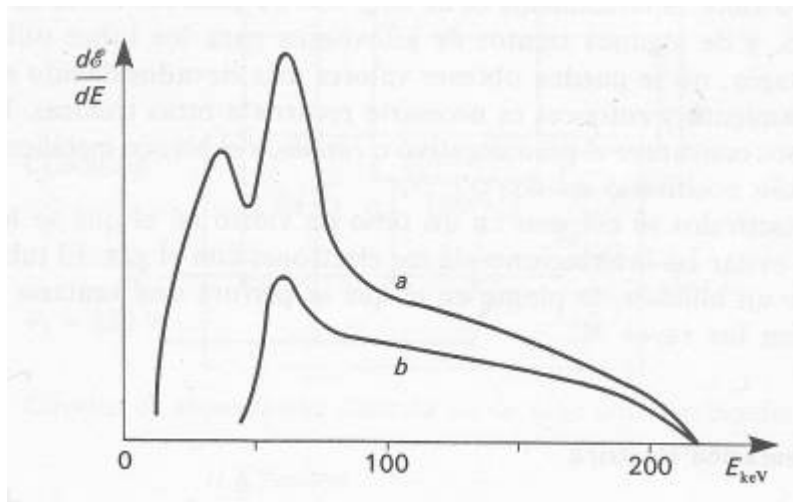


Figura 9. Espectro de RX. a) sin filtrado, b) con filtrado

2. Aceleradores de partículas

Un acelerador de partículas consiste básicamente en un tubo en el que se ha hecho el vacío por el que se hace circular un haz de partículas cargadas (electrones, protones, iones, etc.). En el interior de los tubos se crean campos electromagnéticos de muy alta intensidad que aceleran el haz de partículas hasta que alcanzan velocidades muy altas, próximas a la velocidad de la luz.



Figura 10. Acelerador de partículas

Los aceleradores se utilizan principalmente para investigación en Física de Partículas Elementales. La idea básica consiste en hacer chocar el haz de partículas aceleradas con los átomos de un blanco o alternativamente hacer chocar frontalmente dos haces que se mueven en direcciones opuestas. La colisión hace que las partículas se rompan en sus constituyentes, cuanto mayor es la energía del choque menores serán las distancias exploradas. Cuánto mayor energía se desea alcanzar mayor ha de ser el tamaño del acelerador. El mayor acelerador que se ha construido es el LHC (Gran Colisionador de Hadrones) que es un tubo circular de 27 km de diámetro en el que se pueden acelerar protones con una energía de 7 TeV (siete billones de eV, se necesitaría una tensión eléctrica de 7000 millones de kV para acelerarlos).

Los aceleradores también se usan en Radioterapia para producir haces de electrones y fotones de alta energía.

3. Sustancias radiactivas

La mayor parte de núcleos atómicos que existen en la naturaleza son estables y siempre permanecen igual, sin embargo existen algunos núcleos que se desintegran espontáneamente y se transforman en un núcleo distinto. El motivo de esta desintegración suele ser la interacción nuclear débil que hemos mencionado.

La desintegración de un núcleo radiactivo va acompañada de la emisión de partículas que pueden ser electrones (radiación beta), fotones (radiación gama), núcleos de He (radiación alfa), neutrones, positrones, etc. Los haces de partículas generados por las sustancias radiactivas se utilizan en investigación física, química, biológica, médica, ... y también en Radiodiagnóstico (Medicina Nuclear) y Radioterapia. Además de sustancias radiactivas naturales, pueden ser usadas sustancias radiactivas producidas artificialmente. Un método para obtenerlas consiste en irradiar sustancias no radiactivas con haces de partículas cargadas procedentes de un acelerador o con haces de neutrones generados en los reactores nucleares.

4.Reactores nucleares

Un reactor nuclear es un dispositivo donde se producen reacciones nucleares en cadena de forma controlada.

Los reactores nucleares tienen diversos usos como la investigación, producción de elementos radiactivos, propulsión de barcos y submarinos, pero su uso principal es la generación de energía eléctrica en las instalaciones llamadas centrales nucleares.

La producción de energía eléctrica se realiza de la siguiente forma: Debido a las reacciones de fisión se produce un fuerte calentamiento en el reactor nuclear. Este calor es extraído mediante corrientes de agua que se generan vapor a alta presión que se utiliza para mover las turbinas cuya energía mecánica se convierte en energía eléctrica como en una central convencional. El circuito de agua que extrae el calor del reactor se llama *circuito primario* y su agua es radiactiva. La temperatura del agua del circuito primario es controlada por el agua de un *circuito secundario* de agua no radiactiva que extrae calor y lo transfiere al agua de un río o del mar. En la figura siguiente se muestra el esquema de funcionamiento de una central nuclear

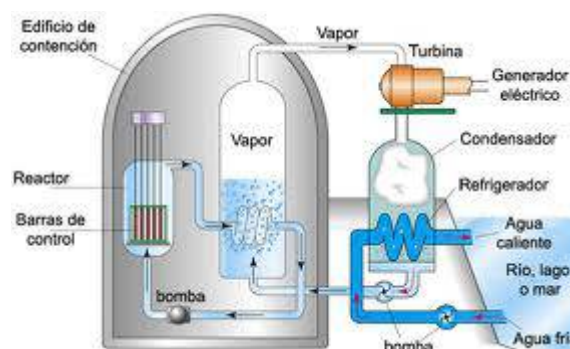


Figura 11. Funcionamiento de una central nuclear

La principal ventaja de las centrales nucleares es que apenas contaminan en comparación con una central térmica (efecto invernadero, lluvia ácida). Sus principales inconvenientes son la posibilidad de escape accidental de materiales radiactivos que puede tener consecuencias desastrosas a corto y largo plazo (Chernobyl) y el almacenamiento de los residuos radiactivos resultantes de las reacciones de fisión, algunos de vida media muy larga.

Aplicaciones de las radiaciones

1. Instalaciones radiactivas

Las instalaciones en las que se utilizan aparatos productores de radiaciones ionizantes se llaman *instalaciones radiactivas*. Su creación y funcionamiento están reguladas por leyes y reglamentos. En España el organismo encargado de la vigilancia y correcto funcionamiento de las centrales nucleares y de las instalaciones radiactivas es el Consejo de Seguridad Nuclear. Según el censo publicado por el CSN en España hay alrededor de unas 30.000 instalaciones radiactivas, su inmensa mayoría son instalaciones de radiodiagnóstico (unas 29.000) y el resto se dedican a la industria y a la investigación.

2. Aplicaciones médicas

2.1 Radiodiagnóstico

El radiodiagnóstico consiste en la exploración y estudio de las estructuras anatómicas internas de un paciente con la ayuda de la imagen proporcionada por un haz de RX que lo atraviesa. Esta imagen se forma debido a las diferentes propiedades de atenuación de dicha radiación por los distintos órganos y estructuras anatómicas. En la siguiente figura puede observarse el proceso de formación de la imagen radiológica.



Figura 12. Formación de la imagen radiológica

Así por ejemplo el hueso, por tener abundancia de Ca con peso atómico alto, atenúa más el haz que el músculo debido al efecto fotoeléctrico y en cambio los pulmones atenúan muy poco debido a que están llenos de aire con densidad mucho menor que la del músculo interviniendo aquí tanto el efecto fotoeléctrico como el efecto Compton.

Para que los fotones contribuyan a la formación de la imagen deben tener energía suficiente para atravesar al paciente por lo que es necesario quitar del haz los fotones de baja energía ya que estos fotones lo único que hacen es dañar al paciente. Esto se hace colocando delante del tubo de RX *filtros de Al o Cu*. Por otra parte solo se debe irradiar aquella parte del paciente que se desea examinar; esto se consigue limitando el tamaño del haz mediante *colimadores* de plomo de apertura variable de forma que sólo se radiografíen las estructuras anatómicas de interés.

Una vez que el haz de RX ha atravesado el paciente hemos de hacer incidir el haz emergente en algún dispositivo que transforme la *imagen radiante* invisible en una *imagen luminosa* visible. Esta imagen puede ser una imagen fija llamada *radiografía* o un vídeo que llamamos *radioscopia*.

Hasta no hace mucho tiempo se utilizaban placas fotográficas sensibles a los RX para obtener las imágenes radiográficas fijas y hace mucho más tiempo se usaban las pantallas radioscópicas para las imágenes en movimiento. En la actualidad estos dispositivos han sido sustituidos por la *radiología digital*. Estos dispositivos, al igual que las cámaras fotográficas, generan *imágenes digitales* que no son más que archivos de datos con toda la información necesaria para generar la imagen. Cada punto de la imagen está caracterizado básicamente por tres números: sus dos coordenadas y la intensidad de la luminosidad del punto; si la imagen es en color habrán más datos adicionales para indicar el color del punto. Para obtener imágenes fijas se utilizan bien películas de fósforo fotoestimulable (CR) o placas de semiconductores de pequeño tamaño (DR). En las primeras los RX producen una imagen latente que se convierte en imagen digital con una segunda irradiación con rayos láser, en las segundas se produce directamente la imagen digital. Las placas DR pueden usarse también para obtener imágenes en movimiento es decir vídeos acoplándolas a unos dispositivos llamados *intensificadores de imagen*. Las principales ventajas de la radiología digital son que las imágenes obtenidas pueden guardarse en la memoria de un ordenador y pueden transmitirse a distancia, además las placas digitales son reutilizables. Las imágenes digitales tienen la ventaja adicional que pueden tratarse mediante programas informáticos y cambiar por ejemplo su tamaño, brillo, contraste, resaltar una parte de la imagen, etc.

Según cual sea uso hay equipos de RX que sólo hacen radiografías, por ejemplo los que utilizados para ver los pulmones o las roturas de huesos como el que se muestra en la figura 13.



Figura 13. Equipo de RX osteopulmonar

Por otra parte hay equipos que incorporan las dos opciones, radiografía y radioscopia, como los usados en radiología digestiva o en quirófanos, estos últimos están diseñados preferentemente para la radioscopia. En la figura 14 mostramos un telemando usado por ejemplo para exploraciones del sistema digestivo y en la figura 15 se muestra un arco de quirófano.



Figura 14. Telemando



Figura 15. Arco de quirófano

Tomografía axial computerizada (TAC)

Los aparatos de TAC o escáners permiten obtener imágenes de cortes transversales del paciente. Algunos equipos de TAC permiten combinar las imágenes de varios cortes sucesivos para obtener *imágenes tridimensionales*. En la figura 16 se muestra un TAC de cráneo



Figura 16. TAC de cráneo

y en la figura 17 podemos ver una imagen tridimensional



Figura 17. Imagen 3D obtenida mediante TAC

En la figura 18 se muestra una imagen de un TAC. Consiste básicamente en un anillo llamado *gantry* por cuyo interior se desliza una camilla en la que está acostado el paciente. Dentro del gantry hay un tubo de RX que efectúa un movimiento de rotación y emite un haz de unos pocos mm en la dirección longitudinal del paciente que es el *espesor del corte*. Los RX que atraviesan al paciente son recogidos por un conjunto de detectores fijos colocados a lo largo de todo el anillo. De esta forma para cada posición del tubo se obtiene una imagen radiológica. Los datos de todas estas imágenes pueden ser combinadas mediante algoritmos de reconstrucción en un ordenador y obtener una imagen radiológica del corte transversal del paciente. Una vez obtenida esta imagen se mueve la camilla un poco y se repite el proceso. El resultado final del estudio es una serie de imágenes de varios cortes transversales del paciente.



Figura 18. TAC

2.2 Radioterapia

La radioterapia consiste en el uso de haces de radiaciones ionizantes para la destrucción de tumores malignos. Es junto con la cirugía y la quimioterapia uno de los tres métodos básicos para combatir el cáncer, estos métodos se usan muchas veces de forma combinada reforzándose mutuamente.

Hay dos formas de radioterapia: la radioterapia de contacto y la radioterapia a distancia o teleterapia.

Radioterapia de contacto

La radioterapia de contacto consiste en introducir en el paciente sustancias radiactivas que actúan selectivamente en los tejidos cancerosos. Por ejemplo pueden introducirse bolas de material radiactivo en cavidades naturales del cuerpo como el tratamiento del cáncer de útero o implantar quirúrgicamente material radiactivo en el tejido tumoral como en el cáncer de próstata (*braquiterapia*) o bien en suministrar líquidos con elementos radiactivos que se desintegren en unas pocas horas (*radioterapia metabólica*) como en el tratamiento del cáncer de tiroides con yodo radiactivo con una vida media de unas ocho horas.

Teleterapia

Es la forma más habitual de radioterapia. En este caso la radiación es suministrada por fuentes o equipos situados a cierta distancia del paciente. Como fuentes de radiación se utilizan equipos de RX de baja o media energía, equipos de rayos gamma con fuentes radiactivas de cobalto-60 y aceleradores de electrones, encontrándose en fase de desarrollo el uso de fuentes de neutrones y partículas de alta energía. En la actualidad la fuente más utilizada son los aceleradores que tienen entre otras ventajas las de suministrar haces de electrones y fotones cuya energía puede elegirse en función de la localización y tipo de tumor a tratar. El haz de fotones se obtiene haciendo chocar el haz de electrones que sale del acelerador con un blanco. En la figura 19 se muestra una unidad de teleterapia



Figura 19. Unidad de teleterapia

Las radiaciones destruyen no sólo los tumores sino también los tejidos sanos alrededor del tumor, por tanto hay que evitar que estos tejidos sanos se irradien con exceso sobre todo los órganos

vitales más sensibles a las radiaciones como la médula espinal. El objetivo de una buena planificación es conseguir que la dosis de radiación sea máxima en el tejido tumoral y lo más baja posible en su entorno. Hay dos factores básicos a tener en cuenta: la energía de las partículas incidentes y la geometría de la irradiación.

Energía de la radiación

Examinemos el factor energía en primer lugar: es obvio que para tratar un tumor superficial hay que usar radiaciones de energía más baja que para tratar un tumor profundo, así por ejemplo los RX son lo más indicado en el tratamiento de tumores de piel. Por otra parte mediante aceleradores se consiguen haces de fotones de hasta unos 20 MeV que depositan el máximo de energía a unos 5 cm de profundidad.

Geometría

Para que la dosis sea máxima en un volumen tumoral situado a cierta profundidad es mejor irradiarlo con varios haces de radiación que incidan sobre el mismo desde distintos ángulos o haciendo girar la fuente en un círculo centrado en el tumor. La elección de los parámetros más idóneos para el tratamiento de un tumor es la tarea específica del radiofísico. El primer paso en la planificación consiste en la obtención de una imagen 3D del tumor mediante TAC, PET o RMN, a continuación se proponen varias formas de irradiación y se utilizan programas informáticos para obtener una imagen en la que se visualizan y cuantifican las dosis absorbidas por el tumor y los tejidos circundantes, eligiéndose el método más adecuado. Antes de iniciar cada irradiación y una vez el paciente situado e inmovilizado se obtiene una imagen de verificación que tiene que coincidir con la imagen obtenida en la planificación. En la actualidad hay aceleradores que van obteniendo imágenes de verificación durante el mismo proceso de irradiación y van haciendo ajustes para optimizar el tratamiento, este procedimiento se llama *radioterapia guiada por la imagen*.

La experiencia clínica ha demostrado que es mejor suministrar la dosis total de radiación necesaria para destruir un tumor en varias sesiones a lo largo de unas semanas. Con este fraccionamiento se minimizan efectos secundarios nocivos para el paciente y se obtienen algunas otras ventajas.

Radiocirugía

En la radiocirugía a diferencia de la teleterapia se destruye el tumor a lo largo de una única intervención como se hace en cirugía convencional al extirparlo, la diferencia es que en la radiocirugía no se usa un bisturí sino haces muy finos de radiación (RX, gamma o protones) que se hacen incidir sobre el tumor. La fuente emisora de radiación puede moverse alrededor del paciente de forma que se obtiene una concentración máxima de energía en la posición del tumor minimizando la energía depositada en su entorno para evitar la destrucción de células sanas. Se utiliza para tratar tumores de pequeño tamaño. En la figura se muestra la utilización de una unidad de cobalto (bisturí gamma) para el tratamiento de un tumor cerebral, el paciente se mantiene inmovilizado mediante una estructura mecánica que además ayuda a localizar el tumor con un alto grado de precisión.



Figura 20. Uso del bisturí gamma para tratar un tumor cerebral

2.3 Medicina nuclear

La Medicina Nuclear es una especialidad de la medicina en la que se suministra a los pacientes sustancias radiactivas (*radiotrazadores*) para la obtención de imágenes diagnósticas. Se usan varios radiotrazadores eligiéndose aquel que tenga mayor afinidad con el órgano o tejido que se vaya a estudiar, además los radioisótopos utilizados son de baja energía y de corta vida media para minimizar efectos nocivos secundarios. En la actualidad se usan dos métodos básicos para la obtención de imágenes:

Tomografía por emisión de fotones (SPECT): Se usan radiotrazadores emisores de fotones. Por ejemplo I-131 para estudios de tiroides, Tc-99 para estudios de hígado, cerebro, pulmón, etc. Una vez inyectado el radiotrazador éste se distribuye por el organismo y los fotones emitidos por el radioisótopo son detectados en un instrumento llamado gammacámara que se muestra en la figura.



Figura 21. Gammacámara

Este instrumento dispone de un conjunto de detectores que permiten localizar el punto de procedencia de los fotones y de esta forma generar imágenes de las estructuras anatómicas llamadas *gammagrafías*. Al igual que en los TAC, se van obteniendo gammagrafías de cortes transversales a medida que la camilla en la que está acostado el paciente va desplazándose en el interior de la zona en la que están montados los detectores. A partir de ellas, usando procedimientos informáticos, pueden generarse, igual que en los TAC, imágenes tridimensionales. Estas imágenes tienen la ventaja de ser imágenes funcionales que muestran cómo va cambiando la distribución del radiofármaco con el paso del tiempo y permite tener información sobre el funcionamiento de los órganos que se están estudiando.

Tomografía por emisión de positrones (PET): En este caso se suministran al paciente sustancias radiactivas emisoras de positrones, que son electrones con carga positiva. Estas sustancias de vida media corta se producen en aceleradores cercanos, así por ejemplo el emisor F-18 se utiliza para realizar estudios oncológicos sobre la distribución corporal y evolución de distintos tipos de cáncer.

A diferencia de los electrones, los positrones son inestables y al chocar con un electrón se aniquilan mutuamente emitiéndose dos fotones que se emiten en direcciones opuestas. Estos fotones son detectados en un aparato llamado PET que a partir de la diferencia de los tiempos de detección de los dos fotones permite obtener el punto de procedencia de la emisión. De esta forma pueden generarse imágenes de las estructuras anatómicas en las que está depositado el radioisótopo. En la figura 22 se muestra un tomógrafo por emisión de positrones.



Figura 22.

Tómógrafo por emisión de positrones

Al igual que en el SPECT se generan imágenes tridimensionales funcionales a partir de un conjunto de imágenes transversales.

3. Aplicaciones industriales, agroalimentarias y en investigación

3.1 Aplicaciones en la industria

Medida de espesores y niveles

Se basa en la atenuación de la radiación al atravesar un material. Cuanto más grueso o denso sea el material menor será la cantidad de radiación que lo atraviesa. Así pueden medirse el espesor de láminas, la densidad de materiales o bien para controlar el nivel de llenado de depósitos o botellas en plantas embotelladoras. Pueden usarse fuentes de radiación gamma en la industria del metal o de radiación beta en la industria del plástico del papel.

Medidas de humedad

Se basan en que los neutrones interactúan preferentemente con los protones y por tanto cuanto mayor sea el contenido en agua de una sustancia mayor atenuación se producirá en la radiación procedente de una fuente de neutrones.

Gammagrafía o radiografía industrial

En la industria metalúrgica se usan equipos especiales de RX o con fuentes de radiación gamma para obtener imágenes de soldaduras y comprobar que están bien hechas, sin poros ni imperfecciones.. El que una soldadura esté bien realizada es a veces muy importante, por ejemplo en las tuberías que transportan agua radiactiva en una central nuclear.



Figura 23. Radiografía y gammagrafía industrial

Control de seguridad y vigilancia

Se usan equipos de RX diseñados expresamente para vigilar el contenido de paquetes en aeropuertos, servicios de correos, etc.

Detectores de humos

Estos dispositivos contienen una pequeña fuente de radiación alfa con muy poco poder de penetración. Basta con que se interponga una pequeña cantidad de humo entre la fuente y el detector para hacer saltar una alarma.



Figura 24. Detector de humos

Detección de fugas en conducciones de agua

Se introducen sustancias radiactivas de vida corta en el fluido que circula por una canalización y se usa un detector de radiaciones para localizar posibles puntos de rotura de una tubería.

Producción de energía eléctrica

Basada en la energía liberada por un material radiactivo cuando se fisiona, es decir los núcleos de los átomos del material se rompen en trozos al incidir sobre ellos una radiación de neutrones. En este hecho está basada la producción de energía eléctrica en las centrales nucleares. También se usan reactores nucleares en transportes militares como submarinos o portaaviones.

3.2 Aplicaciones agroalimentarias

Eficacia en la absorción de abonos

Se usan abonos marcados con radioisótopos de nitrógeno y fósforo para averiguar su grado de fijación por las plantas y así optimizar el uso de los abonos

Optimizar los recursos hídricos

Para controlar la humedad del suelo pueden usarse sondas de neutrones, como antes hemos indicado. De esta forma puede conseguirse un uso más eficiente del agua que es un recurso escaso en muchas ocasiones.

Inducción de mutaciones en plantas

Mediante irradiaciones se pueden inducir mutaciones que dan lugar a nuevas variedades de plantas con propiedades ventajosas: mayor resistencia a las enfermedades, mayor producción, cambios en los tiempos de maduración, etc.

Lucha contra plagas de insectos

Consiste en irradiar insectos machos en el laboratorio para esterilizarlos, luego se liberan y se aparean con las hembras sin producir descendencia y así disminuye la población de la plaga.

Prolongación del período de conservación de alimentos

El proceso consiste en exponer los alimentos a irradiación generalmente de rayos gamma. De esta forma se inhibe la germinación (por ejemplo de las patatas), se retrasa la maduración y la desinsectación. Si se usan dosis altas puede reducirse la eliminación de microorganismos como bacterias e incluso virus a dosis muy altas.

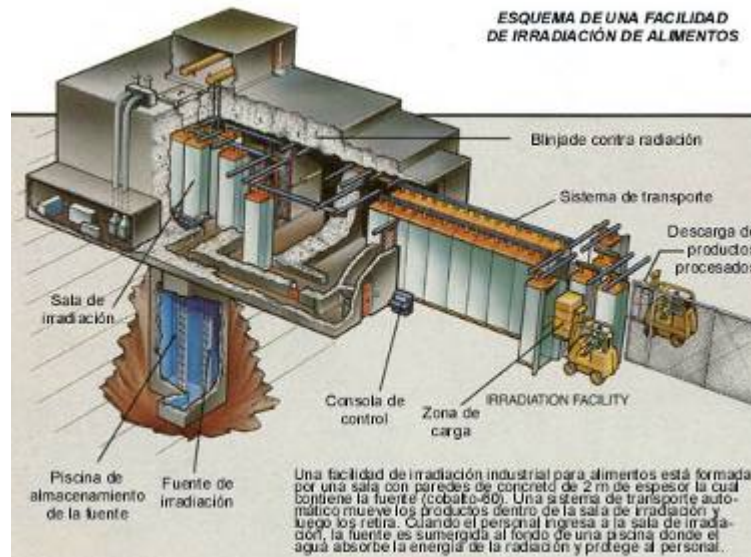


Figura 25. Instalación de irradiación de alimentos

3.3 Aplicaciones en investigación

La principal ventaja de los análisis bioquímicos basados en el uso de marcadores radiactivos es su gran sensibilidad mucho mayor que la las pruebas químicas convencionales

Un marcador radiactivo es un tipo de molécula en el que algunos de sus átomos han sido sustituidos por sus radioisótopos que tienen las mismas propiedades químicas pero emiten radiaciones que pueden ser detectadas y así estudiar su distribución y evolución por distintas rutas metabólicas.

Resulta difícil enumerar todas las aplicaciones de las radiaciones en el desarrollo de la investigación científica, tanto básica como aplicada. Se utilizan en estudios de Biología Celular y Molecular del cáncer, evolución genética, terapia génica, diseño de nuevos fármacos, etc.

3.4 Otras aplicaciones

Conservación del patrimonio artístico

Se basa en el uso de RX para estudiar obras pictóricas, instrumentos musicales antiguos, esculturas, libros, etc.

Detección y eliminación de minas terrestres

Basado en el uso de sondas neutrónicas

Riesgos de las radiaciones

1. Introducción

Antes hemos expuesto numerosas aplicaciones beneficiosas de las radiaciones, sin embargo hemos de ser conscientes de que las radiaciones tienen efectos perjudiciales para la salud, como analizamos a continuación y por lo tanto su uso debe de estar regulado y limitado. Se debe procurar que los riesgos para la salud sean equilibrados por sus beneficios, así por ejemplo debemos admitir que nos hagan una exploración radiológica para averiguar si tenemos una enfermedad grave por ejemplo un tumor pero obviamente debemos evitar exploraciones radiológicas innecesarias.

2. Dosis de radiación

Los efectos que producen las radiaciones en un medio vivo o inanimado dependen obviamente de la cantidad de radiación absorbida por el medio. Para cuantificar las radiaciones se usan varias magnitudes físicas con sus correspondientes unidades

Dosis absorbida

Se define como la cantidad de energía absorbida por unidad de masa.

$$D = \frac{\text{Energía}}{\text{Masa}}$$

Su unidad se llama Gray (Gy) que se define como

$$1 \text{ Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

En el campo de la protección radiológica como esta unidad es muy grande se suele usar el submúltiplo $m\text{Gy}$.

Dosis equivalente y dosis efectiva

La dosis absorbida es una medida puramente física de la cantidad de radiación pero no tiene en cuenta sus efectos biológicos ya que estos efectos dependen por una parte del tipo de radiación y por otra de cuál sea el órgano o tejido que absorba la radiación.

Para tener en cuenta el tipo de radiación se multiplica la Dosis absorbida por un factor de ponderación W_R que tiene en cuenta el daño biológico de la radiación considerada. A la magnitud resultante se le llama *Dosis equivalente* definida como

$$H = W_R D$$

Como unidad se usa *1 Sievert (Sv)* que aunque físicamente es lo mismo que 1 Gy se le da un nombre distinto para subrayar su diferencia conceptual y se suele usar el $m\text{Sv}$. Se toma como referencia la radiación de fotones y electrones para los que $W_R = 1$, mientras que para los neutrones y partículas cargadas más pesadas como alfas o fragmentos de fisión se toma $W_R = 20$ ya que se estima que sus daños biológicos son 20 veces mayores.

No todos los órganos y tejidos biológicos tienen la misma sensibilidad a las radiaciones así por ejemplo una misma cantidad de radiación absorbida por el estómago o los pulmones es más dañina que la misma cantidad de radiación absorbida por el esófago o la piel. Para tener en cuenta esta distinta radiosensibilidad se usa la magnitud *Dosis efectiva* mediante la expresión

$$E = \sum_T W_T H_T$$

dónde la suma se extiende a todos los tejidos T, siendo H_T la dosis equivalente en cada tejido y los factores de ponderación W_T de los distintos tejidos se relacionan en la siguiente tabla

Factores de ponderación W_T

| Órgano o tejido | Factor W_T |
|--|--------------|
| Gónadas | 0,20 |
| Médula ósea, pulmón, estómago y colon | 0,12 |
| Tiroides, esófago, hígado, vejiga y mama | 0,05 |
| Piel | 0,01 |
| Resto de órganos | 0,05 |

La unidad de dosis efectiva es también el Sv y se usa habitualmente el mSv. Cuando se limita la dosis absorbida por órganos específicos se usa la magnitud *dosis equivalente* H , mientras que para limitar la dosis recibida por la totalidad de una persona se usa la *dosis efectiva* E .

3. Efectos biológicos de las radiaciones

Los efectos biológicos de las radiaciones se deben a las ionizaciones que se producen en los átomos o moléculas que componen la materia viva. Estos efectos pueden ser *directos* cuando la ionización se produce en una molécula biológica siendo la más importante la molécula de ADN y da lugar a la ruptura de la cadena o los efectos pueden ser *indirectos*: primero se produce la ionización del agua y se producen radicales libres $OH\cdot$ con gran reactividad química que a su vez ionizan el ADN u otras moléculas celulares.

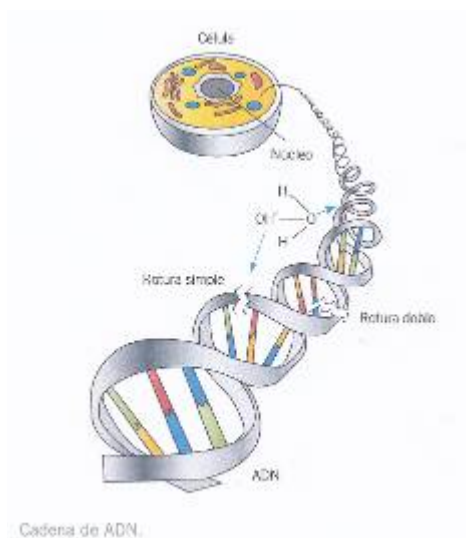


Figura 26. Rotura del ADN

Estas roturas pueden producirse también por causas endógenas ligadas al metabolismo celular y lo que hacen las radiaciones es aumentar la frecuencia de estas roturas pero no el hecho de que existan por lo que decimos que los efectos de la radiación son *inespecíficos*. Las células disponen de mecanismos enzimáticos de autoreparación y en ocasiones las cadenas de ADN se recomponen tal como eran originalmente, otras veces se producen cambios en la cadena que darán lugar a mutaciones si el ADN modificado sigue siendo capaz de duplicarse.

Una segunda característica de los efectos biológicos es que pueden manifestarse en el individuo que recibe la radiación y lo calificamos de *efecto somático* pero también puede afectar a sus descendientes tratándose de un *efecto genético*.

Los efectos biológicos asociados con la exposición a las radiaciones ionizantes se pueden clasificar en dos categorías:

Efectos deterministas

Estos efectos están asociados con dosis de radiación lo suficientemente altas para provocar un mal funcionamiento de un órgano o tejido. Los efectos se llaman deterministas porque se producen de forma cierta e inevitable una vez superado un cierto valor de la dosis que denominamos *dosis umbral* que depende del órgano considerado, así por ejemplo una dosis de 0,15 Gy provoca esterilidad temporal en el varón y entre 3,5-6 Gy la esterilidad es permanente, una dosis de 5 Gy provoca cataratas, etc. Por otra parte los efectos deterministas son proporcionales a las dosis, es decir cuanto mayor sea la dosis mayor es la gravedad del efecto.

Efectos probabilistas

Estos efectos están asociados a dosis bajas de radiación y a diferencia de los efectos deterministas no existe una dosis umbral pudiendo aparecer cualquiera que sea la dosis recibida. Ahora bien lógicamente cuanto mayor es la dosis mayor es la probabilidad de que aparezca un efecto. Entre los efectos probabilistas están los cánceres radioinducidos, el acortamiento de la vida, etc. Dado que los efectos de las radiaciones son inespecíficos los estudios deben hacerse comparando poblaciones irradiadas y no irradiadas para descartar los casos producidos por otros agentes cancerígenos como medio ambientales, hábitos alimenticios, tabaco, etc.

4. Procedencia de las radiaciones

Las radiaciones que recibimos pueden proceder de fuentes naturales o artificiales, aproximadamente $2/3$ partes proceden de fuentes naturales y $1/3$ parte de fuentes artificiales como se muestra en el gráfico siguiente

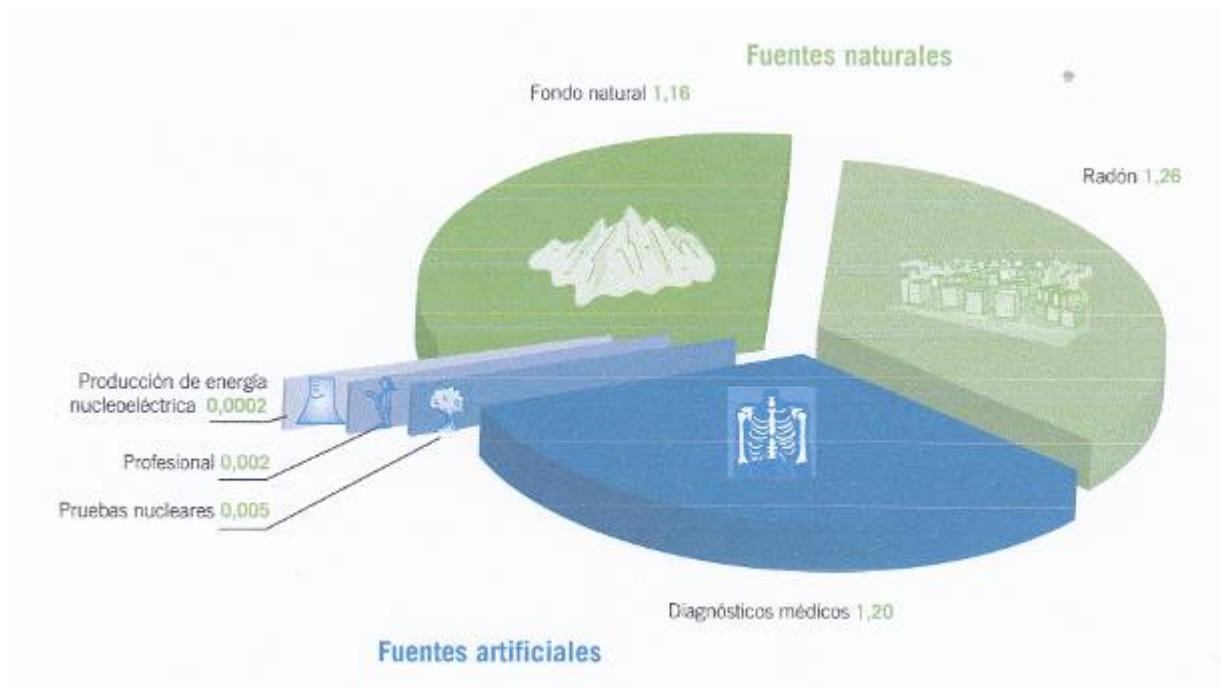


Figura 27. Procedencia de las radiaciones

Expliquemos rápidamente ambos tipos de radiaciones:

Radiación natural

La radiación natural puede proceder de los elementos radioactivos que se encuentran en el suelo a la que denominamos *radiación terrestre* y a la radiación procedente del espacio exterior que se llama *radiación cósmica*. Los valores que se muestran en el gráfico anterior son valores promedios pero estos valores pueden cambiar bastante según el lugar en que nos encontremos. La mayor parte de la radiación terrestre se debe a la inhalación del gas radiactivo radón que es emitido por algunos tipos particulares de rocas como el granito y por esta causa por ejemplo la radiación de fondo es mayor en Orense (0,3 $\mu\text{Sv/h}$) que en Valencia (0,05 $\mu\text{Sv/h}$). Por otra parte la radiación cósmica es frenada por la atmósfera y por ello su valor va aumentando con la altura, así mientras a niveles bajos no llega a 0,1 $\mu\text{Sv/h}$, en un avión puede alcanzar 5 $\mu\text{Sv/h}$. Otra causa por la que son desviados los rayos cósmicos es el campo magnético terrestre y por este motivo la radiación cósmica es mínima en el ecuador y máxima en los polos.

Radiación artificial

La radiación artificial es la que procede del uso de las radiaciones en aplicaciones médicas, industriales, etc. que antes hemos analizado. Como puede observarse en el gráfico casi la totalidad de la radiación artificial se debe a las aplicaciones médicas sobre todo al radiodiagnóstico.

La radiación que recibimos de fuentes naturales la hemos estado recibiendo siempre y en todas partes y obviamente no está sometida a ninguna regulación ni limitación. El uso de la radiación artificial presenta ventajas y riesgos y por ello debe hacerse un análisis coste-beneficio antes de utilizarla. Este es el principal objetivo de la Protección Radiológica.

5. Organismos competentes y legislación sobre Protección Radiológica

Debido a los riesgos de las radiaciones ionizantes su uso debe de estar regulado y limitado. Denominamos sistema de Protección Radiológica (PR) al conjunto de regulaciones, normas y recomendaciones que permiten un uso correcto de las radiaciones. Aunque cada país es soberano y tiene sus propias normas legales, estas normas están basadas en recomendaciones de organismos supranacionales. En el gráfico se muestran los organismos internacionales relacionados con la protección radiológica



Figura 28. Organismos y legislación sobre PR

La UNSCEAR es el Comité Científico de Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de la Radiación Atómica. Este organismo de Naciones Unidas promueve la realización de estudios para evaluar los efectos de las radiaciones, esto estudios pueden ser de tipo epidemiológico como los realizados en los supervivientes de las explosiones atómicas de Hiroshima y Nagasaki o bien estudios realizados en laboratorio con células, insectos, cobayas, etc. Dichas evaluaciones sirven como base científica para establecer criterios y normas de seguridad.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) es una organización no gubernamental encargada de establecer recomendaciones de PR que se publican periódicamente en forma de Guías. Estas Guías de la ICRP son la documentación más importante de la PR ya que en ellas están basadas principalmente las normas legales de los países.

Otro organismo de Naciones Unidas implicado en la PR es el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) cuya misión es fomentar el uso pacífico de la energía nuclear y su seguridad, en particular verifica el cumplimiento de los tratados de no proliferación de armas nucleares.

A nivel europeo las normas de PR se establecen en Directivas de obligado cumplimiento para los estados miembros que deben transponerlas a sus legislaciones nacionales. En el caso de España estas normas se recogen en el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes.

En España se ha creado el Consejo de Seguridad Nuclear como el único organismo competente en materia de seguridad nuclear y protección radiológica. El CSN dispone de un cuerpo de inspectores que realizan labores de control de las instalaciones radiactivas, supervisa los cursos de formación para otorgar licencias, elabora guías de radioprotección, homologa los servicios de dosimetría y las unidades técnicas de protección radiológica, etc. Con periodicidad anual emite informes destinados al Congreso y al Senado. En las labores del CSN colaboran los Ministerios de

Sanidad y de Industria en los ámbitos de sus competencias, así como las Consejerías correspondientes de las distintas Comunidades Autónomas.

6. Criterios básicos de Protección Radiológica

El sistema de PR tiene como objetivo evitar la aparición de efectos biológicos deterministas y disminuir los efectos probabilistas a niveles aceptables. Para ello se fundamenta en tres principios básicos:

Justificación

No debe permitirse ninguna práctica con radiaciones que no conlleve un beneficio neto para el individuo o la especie humana en su conjunto.

Optimización

Se debe procurar que las dosis sean lo más bajas razonablemente posible, teniendo en cuenta consideraciones sociales y económicas (*criterio ALARA* As Low As Reasonably Achievable).

Limitación de dosis

Las dosis recibidas por una persona, sin contar las dosis recibidas como pacientes, no deben superar los límites establecidos en la legislación. En la siguiente tabla se muestran los límites más relevantes

Límites de dosis

| Dosis | Público | Profesional |
|---------------------|----------------|---------------------------------|
| Cuerpo entero | 1 mSv/año | 100 mSv/5 años (máx 50 mSv/año) |
| Cristalino (ojos) | 15 mSv/año | 150 mSv/año |
| Piel y extremidades | 50 mSv/año | 500 mSv/año |

Estos límites han de ser tenidos en cuenta en el diseño y construcción de las instalaciones radiactivas.

7. Cómo protegernos: distancia, tiempo y blindaje

Cuando estemos en una instalación radioactiva, por ejemplo en un servicio de radiología o radioterapia hemos de seguir escrupulosamente las indicaciones del personal en materia de seguridad y hacer caso a los carteles y señales con las indicaciones de riesgo de radiación que son tréboles cuyo color varía según el riesgo (gris, verde, amarillo, naranja y rojo).



Figura 29 : Señal de riesgo de radiación

Las puntas radiales indican riesgo de irradiación externa, un fondo punteado de la señal indica que hay riesgo de contaminación.

Por otra parte hay tres parámetros básicos a tener en cuenta común para reducir la radiación que podemos recibir de una fuente:

Distancia

La cantidad de radiación que recibimos de una fuente disminuye con el cuadrado de la distancia a la misma. Así si a 1 m recibimos una dosis D , a 2 m recibiremos $D/4$, a 3 m $D/9$, etc.

Tiempo

La cantidad de radiación que recibimos de una fuente es directamente proporcional al tiempo que estemos expuestos a ella. A este efecto hay que hacer notar que los equipos de RX solo emiten radiación durante el disparo y el resto del tiempo son inocuos.

Blindaje

La cantidad de radiación que recibimos de una fuente disminuye de forma exponencial con el espesor del blindaje interpuesto. También depende del material usado, el material más habitual es el plomo. En el siguiente gráfico se muestran los distintos materiales utilizados según los distintos tipos de radiaciones:

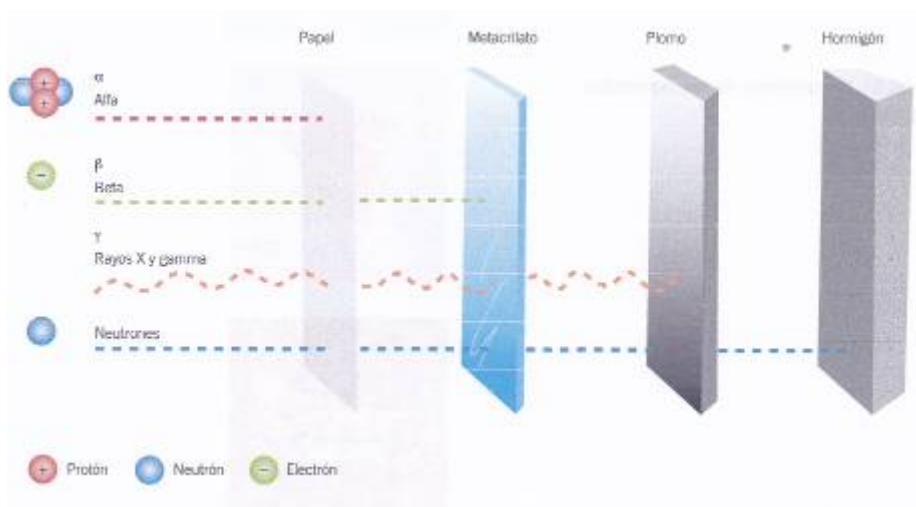


Figura 30. Blindajes contra las radiaciones

Radiaciones no ionizantes (RNI)

1. ¿ Qué son las RNI ?

Las RNI son radiaciones formadas por partículas cuya energía no es lo suficientemente alta para producir ionizaciones de los átomos y moléculas de la materia sobre la que inciden, produciendo como mucho excitaciones electrónicas. Las RNI que suelen utilizarse son radiaciones electromagnéticas formadas por fotones de frecuencia media y baja, el límite entre las RI y las RNI son las radiaciones ultravioleta como se muestra en el siguiente gráfico

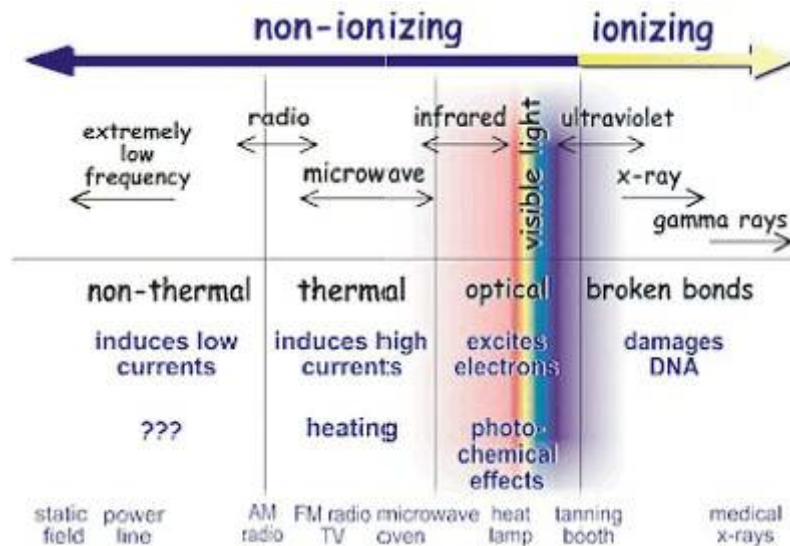


Figura 31. Radiaciones no ionizantes

2. Normas de Protección contra las RNI

El estudio de los efectos perjudiciales de las RNI y su protección frente a los mismos son los objetivos principales de la Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP). Este organismo, al igual que el ICRP, es independiente de los gobiernos y está constituido por profesionales expertos. Publica de forma periódica guías e informes en los que se mantienen actualizadas las normas de protección frente a las RNI teniendo en cuenta las investigaciones sobre los efectos biológicos de este tipo de radiaciones. Sus recomendaciones son tenidas en cuenta por los gobiernos y organismos internacionales (OMS, OIT, etc.). La principal directiva de la CE sobre protección contra RNI es la Directiva 2004/40, que fue modificada en 2008 que se refiere a la protección frente a RNI entre 0 y 300 GHz. Las directivas de la CE son de obligado cumplimiento por los estados miembros que deben incorporarlas a sus legislaciones nacionales. En España se han recogido en el Real Decreto 1066/2001 de 28 de septiembre de 2001.

3. Aplicaciones y riesgos de las RNI

Las RNI tienen aplicaciones muy variadas y podemos decir sin exagerar que vivimos rodeados en todo lugar y momento por un mar de RNI procedentes sobre todo de las antenas emisoras de ondas de TV, radio y de telefonía móvil.

En lo que sigue daremos un breve repaso a los distintos tipos de RNI comentando sus aplicaciones y sus posibles riesgos para la salud empezando por las radiaciones UV y terminando por las radiaciones de baja frecuencia.

Radiaciones ultravioleta (UV)

Las radiaciones UV están presentes en la radiación solar, se suelen dividir en tres categorías de menor a mayor energía UVA, UVB y UVC. Los rayos UVB y UVC son frenados casi por completo por la capa de ozono de la atmósfera, que además frena parte de las RI procedentes del espacio exterior, y los rayos UVA llegan a la superficie terrestre.

Los rayos UV son producidos artificialmente en lámparas de gas especiales (por ejemplo de mercurio) y sus aplicaciones son variadas. Aparte del uso de los rayos UVA para el bronceado, los rayos UV son usados para esterilización dados sus efectos germicidas y en otros usos médicos (dermatología) en industriales.



Figura 32. Cabina de rayos UVA

Sus efectos biológicos se manifiestan en la piel en forma de eritemas o quemaduras solares y en exposiciones prolongadas y periódicas en cáncer de piel. También afectan al ojo y pueden producir quemadura de la retina por una exposición intensa o aumentar la probabilidad de formación de cataratas por exposiciones crónicas. Hay publicados límites de exposición para prevenir sus efectos dañinos.

Luz visible

La luz visible es una de las componentes de la radiación solar. Por otra parte existen una multitud de fuentes artificiales de luz visible: lámparas de todo tipo, pantallas de TV, móviles, etc.

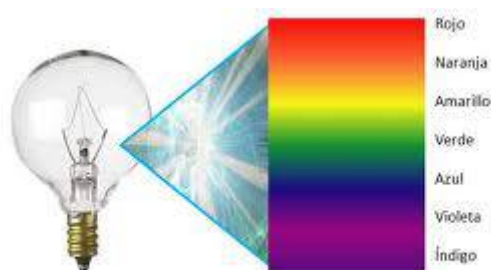


Figura 33. Luz visible

La exposición prolongada a los rayos del sol puede provocar quemaduras en la piel. El otro órgano a proteger es el ojo ya que la visión directa de un foco intenso de luz puede provocar lesiones, en particular en la retina. Afortunadamente el ojo se autoprotege frente a las fuentes de luz

brillante por el mecanismo de *aversión natural* a la luz que nos hace cerrar o desviar los ojos automáticamente en una fracción de segundo.

Láseres

Un láser es un aparato que produce luz coherente monocromática en un haz fino. La luz emitida por un láser puede ser visible, ultravioleta o infrarroja.



Figura 34. Punteros láser

Desde su descubrimiento en 1960 se han desarrollado muchos tipos de láseres y sus aplicaciones son numerosas y variadas: se usan en medicina (cirugía, dermatología, estética, etc.), en ofimática (impresoras, lectores de CDs, lectores de códigos de barras, etc.), en la industria del metal (cortar, soldar, marcar, etc.), etc.

La peligrosidad de un láser depende de su potencia y se clasifican en cuatro clases que van del 1 al 4 en escala de peligrosidad creciente. Dentro de la clase 1 se incluyen los que están confinados en un dispositivo o los de potencia muy baja como lectores de código de barras, punteros.... Este tipo de láseres no necesitan normas de seguridad. En los demás tipos se ha de vigilar su uso: una norma evidente es no dirigir el láser hacia los ojos. Cuando aumenta la potencia el láser puede producir quemaduras intensas en la piel, pensemos en que hay láseres que pueden cortar láminas de metal.

Radiación infrarroja (IR)

La radiación IR está presente en la radiación solar y es emitida por cualquier cuerpo caliente.

La radiación IR tiene aplicaciones en medicina (artritis, dermatología, etc.) y en la industria: mandos a distancia, aparatos de visión nocturna, cámaras de infrarrojos, secado y moldeado de plásticos, vidrios, etc.



Figura 35. Foto con cámara de infrarrojos

Los órganos sensibles a la radiación IR son la piel y los ojos (cataratas), pero también aparece el stress térmico para los trabajadores en entornos de calor intenso: fundiciones, industria del vidrio, etc.

Microondas (MO) y radiofrecuencia(RF)

La radiación de microondas es de importancia básica en la sociedad contemporánea ya que es la radiación utilizada para radiocomunicaciones tanto de TV como de telefonía móvil (del orden de 1 a 2 GHz). Otras aplicaciones muy conocidas de las microondas son el radar (control de tráfico aéreo, predicción meteorológica) y el horno microondas (2,5 GHz) que genera ondas EM que hacen vibrar preferentemente las moléculas de agua presentes en los alimentos lo que provoca su calentamiento.



Figura 36. Antena de microondas

Las ondas EM de frecuencia más baja usadas sobre todo en comunicaciones de radio se denominan ondas de radiofrecuencia: la FM (frecuencia modulada) es de mayor energía (100 MHz) que la AM (amplitud modulada) (1 MHz).

El principal efecto biológico de las microondas y en menor medida de la radiofrecuencia es a corto plazo la producción de calor. También existen estudios epidemiológicos y estudios en animales sobre la inducción de cáncer procedente de exposiciones a largo plazo aunque los resultados no son concluyentes.

Para evitar la aparición de efectos nocivos la ICNIRP ha fijado unos límites de exposición tanto para los trabajadores como para el público en general. Estos límites solo tienen en cuenta los efectos a corto plazo ya que la información disponible de los efectos cancerígenos es insuficiente para definir límites de forma fiable. Por otra parte estos límites no tienen en cuenta los posibles efectos dañinos de los campos EM sobre los implantes como marcapasos, desfibriladores, prótesis varias que han de ser tenidos en cuenta de forma separada. Para frecuencias comprendidas entre 100 kHz y 10 GHz se usa la magnitud SAR (absorción específica de energía) que se define como

$$SAR = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Tiempo} \times \text{Masa}}$$

que se mide en W/kg. Los límites para el público que no deben ser sobrepasados son los siguientes

Límites para el público para CEM con frecuencias entre 100 kHz y 10 GHz

| SAR promediado sobre | W/kg |
|-----------------------------|-------------|
| Todo el cuerpo | 0,08 |
| Cabeza y tronco | 2 |
| Extremidades | 4 |

Para frecuencias entre 10 GHz y 300 GHz es más operativo fijar límites a la densidad de potencia S del CE directamente, definida por

$$S = \frac{\text{Energía emitida}}{\text{Tiempo} \times \text{Superficie}}$$

que se mide en W/m^2 . Para los miembros del público se exige que

$$S \leq 10 W/m^2$$

Campos EM de baja frecuencia

Los campos de baja frecuencia abarcan el intervalo de 0 a 30 kHz, siendo la frecuencia más común con mucho la de 50/60 Hz utilizada para la generación, distribución y uso de la energía eléctrica. Además de este uso los CEM en este rango tienen otras aplicaciones como los hornos de inducción, la radionavegación, las pantallas de visualización de datos, etc.



Figura 37. Línea eléctrica de alta tensión

Los campos EM de baja frecuencia inducen cargas eléctricas superficiales y corrientes eléctricas inducidas en el interior de los cuerpos expuestos y si nos acercamos mucho a objetos metálicos expuestos a campos intensos pueden producirse descargas (chispas).

Los principales efectos biológicos se manifiestan en el sistema cardiovascular y en el sistema nervioso central. Estos efectos son efectos de corto plazo es decir solo se manifiestan mientras estamos sometidos a la exposición, se habla de efectos a largo plazo como la inducción de cáncer (en particular de leucemia en niños) que viven en casas cercanas a líneas de alta tensión pero los resultados de los estudios no son concluyentes.

Para prevenir la aparición de los efectos perjudiciales a corto plazo, tanto nerviosos como musculares, la ICNIRP ha propuesto límites para el público y los profesionales. Estos límites se establecen sobre la densidad de corriente inducida expresada en mA/m^2 : en el caso del público la intensidad del campo EM debe ser tal que induzca densidades de corriente inferiores a $2 mA/m^2$.