

CAPÍTULO 2. RADIACIÓN IONIZANTE

2.1 Introducción

La radiación ionizante está en todas partes. Llega desde el espacio exterior en forma de rayos cósmicos, está en el aire en forma de emisiones del radón radiactivo y su progenie, está en los isótopos radiactivos que se originan de forma natural y que entran y permanecen en todos los seres vivos. De hecho, todas las especies de este planeta han evolucionado en presencia de la radiación ionizante. Aunque los seres humanos expuestos a dosis pequeñas de radiación pueden no presentar de inmediato ningún efecto biológico aparente, no hay duda de que la radiación ionizante, cuando se administra en cantidades suficientes, puede causar defectos. El tipo y el grado de estos efectos son bien conocidos.

Si bien la radiación ionizante puede ser perjudicial, también tiene muchas aplicaciones beneficiosas. El uranio radiactivo genera electricidad en centrales nucleares instaladas en muchos países. En medicina, los rayos X permiten obtener radiografías para el diagnóstico de lesiones y enfermedades internas. Los médicos especializados en medicina nuclear utilizan material radiactivo como trazadores para formar imágenes detalladas de estructuras internas y estudiar el metabolismo. Los médicos utilizan en radioterapia rayos gamma, haces de piones, haces de electrones, neutrones y otros tipos de radiación para tratar el cáncer. Los ingenieros emplean material radiactivo en las operaciones de registro de pozos petrolíferos y para medir la densidad de la humedad en los suelos. Los radiólogos industriales se valen de rayos X en el control de calidad para observar las estructuras internas de aparatos fabricados. Las señales de las salidas de edificios y aviones contienen tritio radiactivo para que brillen en la oscuridad en caso de fallo de la energía eléctrica. Muchos detectores de humos en viviendas y edificios comerciales contienen americio radiactivo. (Cherry, 1998)

Estos numerosos usos de la radiación ionizante y de los materiales radiactivos mejoran la calidad de vida y ayudan a la sociedad de muchas maneras. Pero siempre se deben sopesar

los beneficios de cada uso con sus riesgos. Estos pueden afectar a los trabajadores que intervienen directamente en la aplicación de la radiación o el material radiactivo, a la población en general, a las generaciones futuras y al medio ambiente, o a cualquier combinación de los grupos enumerados (Cherry, 1998).

2.2 Radiaciones Ionizantes e Interacción Radiación Materia

La radiación ionizante (partículas o fotones) es aquella que causa la separación de electrones de átomos y moléculas, es decir tiene la capacidad de excitar e ionizar a los átomos de la materia con la que interactúa. La determinación de la energía depositada en la materia por estas radiaciones es frecuentemente conocida como dosimetría (Attix, 1986). Algunos tipos de radiación de energía relativamente baja, como la luz ultravioleta, sólo puede originar ionización en determinadas circunstancias. Para distinguir estos tipos de radiación de la radiación que siempre causa ionización, se estableció un límite energético inferior arbitrario para la radiación ionizante, que se suele situar en torno a 10 kiloelectronvoltios (keV).

La radiación denominada directamente ionizante (Cherry, 1998) consta de partículas cargadas tales como los electrones energéticos (llamados a veces negatrones), los positrones, los protones, las partículas alfa, los mesones cargados, los muones y los iones pesados (átomos ionizados). Este tipo de radiación ionizante interactúa con la materia generalmente mediante fuerzas de Coulomb, que les hace repeler o atraer electrones de átomos y moléculas en función de sus cargas.

La radiación denominada indirectamente ionizante (Cherry, 1998) es producida por partículas sin carga. Los tipos más comunes de radiación indirectamente ionizante son los generados por fotones con energía superior a 10 keV (rayos X y rayos γ) y todos los neutrones.

Los fotones de los rayos X y γ al interactuar con la materia causan ionización de las siguientes formas:

- I. Los fotones de energía más baja interactúan a través del efecto fotoeléctrico, proceso mediante el cual el fotón cede toda su energía a un electrón, que abandona el átomo o molécula, mientras el fotón desaparece.

- II. Los fotones de energía intermedia interactúan fundamentalmente mediante el efecto Compton, en virtud del cual el fotón y un electrón colisionan esencialmente como partículas. El fotón continúa su trayectoria en una nueva dirección con su energía disminuida, mientras que el electrón liberado parte con el resto de la energía entrante (menos la energía de unión del electrón al átomo o a la molécula).

- III. Los fotones con energía superior a 1,02 MeV interactúan con la materia a través de un proceso conocido como producción de pares, en el cual el fotón desaparece, y en su lugar aparece una pareja electrón-positrón (este fenómeno sólo ocurre en la proximidad de un núcleo, por consideraciones de conservación del momento cinético y de la energía). La energía cinética total del par electrón-positrón es igual a la energía del fotón menos la suma de las energías de la masa residual de electrón y positrón (1,02 MeV). Estos electrones y positrones energéticos se comportan entonces como radiación directamente ionizante. A medida que pierde energía cinética, un positrón puede llegar a encontrarse con un electrón, y las partículas se aniquilarán entre sí. Entonces se emiten dos fotones de 0,511 MeV (por lo general) desde el punto de aniquilación, a 180 grados uno de otro.

Con un fotón dado puede ocurrir cualquiera de estos procesos, sólo que la energía del fotón y el material con el que interactúa determinan qué interacción es la más probable. La Figura 2.1 muestra las regiones en las que predomina cada tipo de interacción en función de la energía del fotón y del número atómico del absorbente.

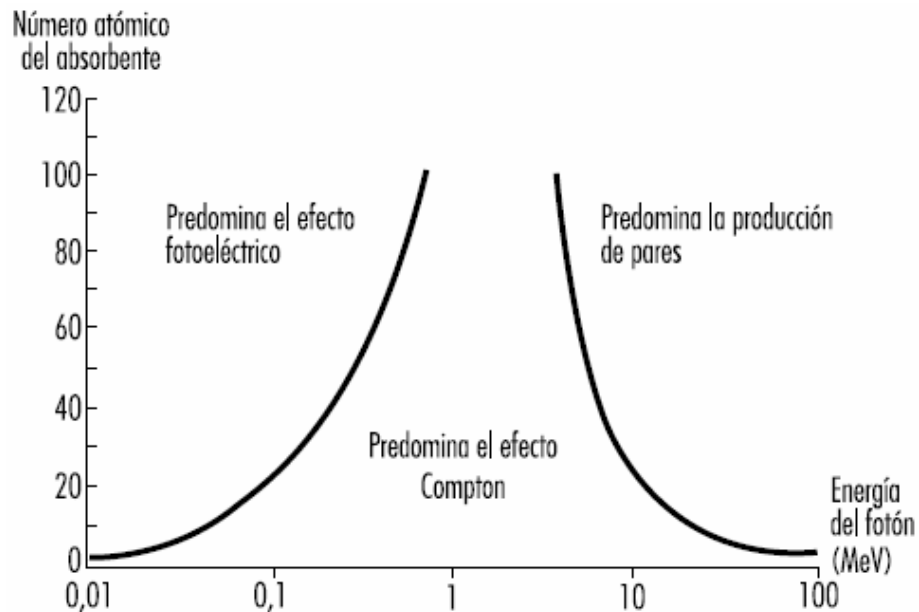


Figura 2.1. Importancia relativa de las tres interacciones principales de los fotones con la materia (Cherry, 1998).

Las interacciones más comunes del neutrón con la materia son colisiones inelásticas, captura (o activación) de neutrón y fisión. Todas ellas son interacciones con núcleos. Un núcleo que colisiona inelásticamente con un neutrón queda en un nivel de energía más alto. Entonces puede liberar esta energía en forma de un rayo gamma, de emisión de una partícula beta o de ambas formas. En la captura de neutrones, un núcleo afectado puede absorber el neutrón y expulsar energía en forma de rayos gamma o X o partículas beta, o de las tres cosas. Las partículas secundarias causan después ionización, como se ha visto antes. En la fisión, un núcleo pesado puede absorber al neutrón y se desdobra en dos núcleos más ligeros, que casi siempre son radiactivos. (Cherry, 1998)

2.3 Cantidades, Unidades y Definiciones

La Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (ICRU,33,1980,) desarrolla definiciones formales de cantidades y unidades de radiación y radiactividad que tienen aceptación internacional. La Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR,9,1982) también establece normas para la definición y utilización de diversas cantidades y unidades

empleadas en seguridad radiológica. A continuación se da la descripción de algunas cantidades, unidades y definiciones (ICRU,33,1980) que se suelen emplear en protección radiológica y dosimetría.

2.3.1 Dosis absorbida. Es la cantidad dosimétrica fundamental de la radiación ionizante. En esencia, es la energía que la radiación ionizante imparte a la materia por unidad de masa. Se expresa por:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (2.1)$$

Donde D es la dosis absorbida, $d\varepsilon$ es la energía media impartida a la materia de masa dm . La unidad de dosis absorbida es el julio por kilogramo (J kg^{-1}). El nombre especial de la unidad de dosis absorbida es el Gray (Gy), de tal forma que $1\text{Gy} = 1\text{J/kg}$.

2.3.2 Dosis Efectiva. La dosis efectiva E es la suma de las dosis equivalentes ponderadas en todos los tejidos y órganos del cuerpo. Es una magnitud utilizada en seguridad radiológica, de manera que su empleo no es adecuado para medir grandes dosis absorbidas suministradas en un período de tiempo relativamente corto. Viene dada por:

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (2.2)$$

Donde w_T es la factor de ponderación tisular y H_T es la dosis equivalente del tejido T . La dosis efectiva se mide en J kg^{-1} . El nombre especial de la unidad de dosis efectiva (y en su defecto la de la dosis equivalente) es el Sievert (Sv). El Sievert es equivalente al Gray para rayos gamma y la principal diferencia con este radica en el hecho de que no establece diferencia en la calidad de la radiación, por tanto pueden considerarse las contribuciones α , β y γ .

2.3.3 Tasa de Dosis. Es la rapidez con la que se suministra la dosis:

$$\dot{D} = \frac{D}{t} \quad (2.3)$$

Donde D representa la dosis y t el tiempo. \dot{D} es definida en Gray por minuto (Gy/min) aunque también puede expresarse en Gray por hora (Gy/h) e incluso en Gy por año (Gy/a). En el caso de tejido humano puede expresarse en Sievert por minuto (Sv/min).

2.3.4 Actividad. Esta cantidad representa el número de transformaciones nucleares por unidad de tiempo desde un estado energético nuclear dado. Se expresa con:

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (2.4)$$

Donde A es la actividad, dN es el valor esperado del número de transiciones nucleares espontáneas desde un estado de energía dado durante el intervalo de tiempo dt . Está relacionada con el número de núcleos radiactivos N mediante:

$$A = -\lambda N \quad (2.5)$$

donde λ es la constante de desintegración. La actividad se expresa en desintegraciones por segundo o por año. El nombre especial de la unidad de actividad es el Becquerelio (Bq).

2.3.5 Transferencia Lineal de Energía. Esta cantidad es la energía que una partícula cargada imparte a la materia por unidad de longitud a medida que la atraviesa. Se expresa por,

$$L = \frac{d\varepsilon}{dl} \quad (2.6)$$

Donde L es la transferencia lineal de energía (llamada también poder de parada lineal de la colisión) y $d\varepsilon$ es la energía media perdida por la partícula al atravesar una distancia dl . La transferencia lineal de energía (TLE) se mide en J m^{-1} .

2.3.6 Vida media. Esta cantidad es el tiempo medio que un estado nuclear sobrevive, antes de experimentar una transformación hasta un estado de energía más baja mediante la emisión de radiación ionizante. Su unidad fundamental es el segundo (s), pero también puede expresarse en horas, días o años. Está relacionada con la constante de desintegración (λ) por:

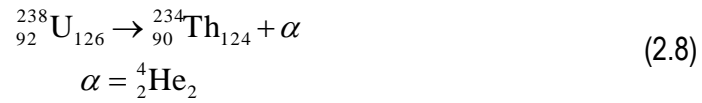
$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (2.7)$$

Donde τ es la vida media.

2.4 Tipos de Radiación Ionizante

2.4.1 Partículas alfa: Una partícula alfa es un conjunto de dos protones y dos neutrones estrechamente unidos. Es idéntica a un núcleo de helio 4 (${}^4\text{He}$). De hecho, su destino último después de haber perdido la mayoría de su energía cinética es capturar dos electrones y convertirse en un átomo de helio (Cherry, 1998).

Los radionucleidos emisores de partículas alfa son en general núcleos relativamente pesados. Casi todos los emisores alfa tienen números atómicos iguales o superiores al del plomo (${}^{82}\text{Pb}$). Cuando un núcleo se desintegra y emite una partícula alfa, su número atómico (el número de protones) y su número de neutrones disminuyen en dos, mientras que su número másico se reduce en cuatro. Por ejemplo, la desintegración alfa del uranio 238 (${}^{238}\text{U}$) a torio 234 (${}^{234}\text{Th}$) se representa por:



El superíndice de la izquierda es el número másico (número de protones más neutrones), el subíndice de la izquierda es el número atómico (número de protones) y el subíndice de la derecha es el número de neutrones. (Cherry, 1998)

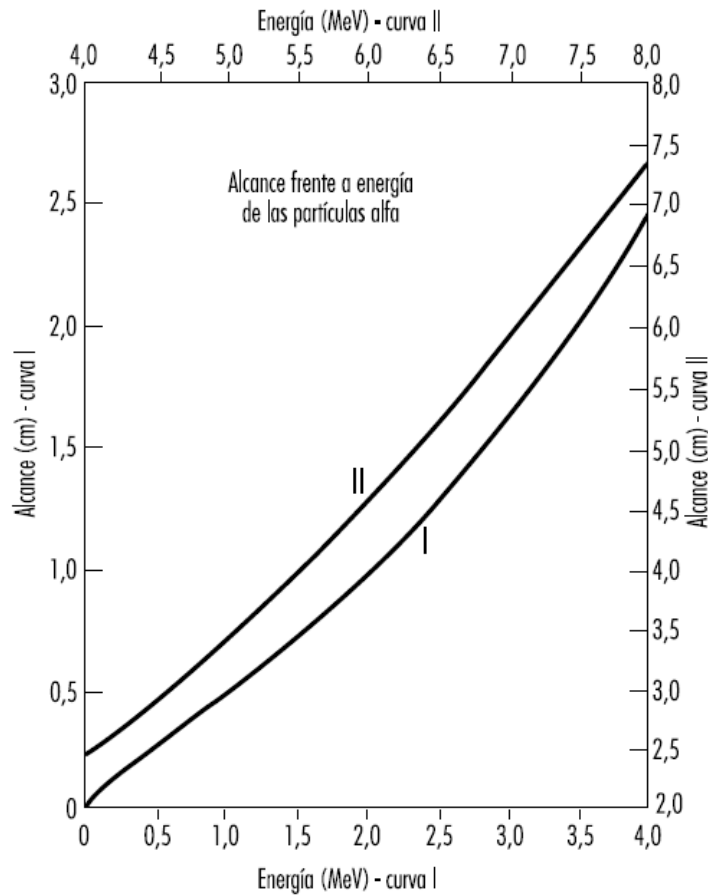


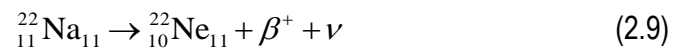
Figura 2.2. Alcance de las partículas alfa en función de su energía.

Los emisores alfa corrientes emiten partículas alfa con energías cinéticas entre unos 4 y 5,5 MeV. El alcance de estas partículas alfa en el aire no sobrepasa los 5 cm (véase la Figura 2.2). Se necesitan partículas alfa con una energía de 7,5 MeV para penetrar la epidermis (capa protectora de la piel, de 0,07 mm de espesor). Los emisores alfa no plantean por lo general ningún peligro de radiación externa. Sólo son peligrosos si se captan al interior del

cuerpo. Como depositan su energía a corta distancia, las partículas alfa constituyen una radiación de alta transferencia lineal de energía (TLE).

2.4.2 Partículas Beta: Una partícula beta es un electrón o positrón muy energético. El positrón es la antipartícula del electrón, tiene la misma masa y la mayoría de las demás propiedades del electrón, salvo su carga, cuya magnitud es exactamente la misma que la del electrón, pero de signo positivo. Los radionucleidos emisores beta pueden ser de peso atómico alto o bajo.

Los radionucleidos que tienen exceso de protones en comparación con nucleidos estables de número másico similar al suyo, pueden desintegrarse cuando un protón del núcleo se convierte en neutrón. Cuando así sucede, el núcleo emite un positrón y una partícula extraordinariamente ligera que muy rara vez interactúa llamada neutrino. (El neutrino y su antipartícula carecen de interés en protección radiológica.) Cuando ha cedido la mayoría de su energía cinética, el positrón termina por colisionar con un electrón, con lo que se aniquilan ambos. La radiación de aniquilación producida es casi siempre la de dos fotones de 0,511 keV que se desplazan en sentidos opuestos. La desintegración típica con emisión de un positrón se representa por:



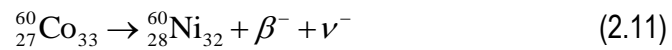
Donde el positrón está representado por β^{+} y el neutrino por ν . Obsérvese que el nucleido resultante tiene el mismo número másico que el nucleido padre y un número atómico (de protones) menor en una unidad y un número de neutrones mayor en una unidad que los del nucleido original.

En la desintegración, la captura de un electrón compite con la pérdida de un positrón. En la desintegración con captura de electrón, el núcleo absorbe un electrón orbital y emite un neutrino. Una desintegración típica con captura de electrón viene dada por:



La captura de un electrón es posible siempre que el núcleo resultante tenga una energía total menor que la del núcleo inicial. En cambio, la desintegración con positrón exige que la energía total del átomo inicial sea mayor que la del átomo resultante en más de 1,02 MeV (dos veces la energía másica residual del positrón) (Cherry, 1998).

De manera similar a la desintegración con positrón y con captura de electrón, la desintegración con negatrón (β^-) ocurre en núcleos que tengan exceso de neutrones en comparación con núcleos estables del mismo número másico. En este caso, el núcleo emite un negatrón (electrón energético) y un antineutrino. Una desintegración típica con negatrón se representa por:



donde el negatrón se representa por β^- y el antineutrino por ν^- . Aquí, el núcleo resultante gana un protón a expensas de un neutrón, pero tampoco cambia su número másico.

Las energías beta máximas típicas oscilan desde 18,6 keV para el tritio (${}^3\text{H}$) a 1,71 MeV para el fósforo 32 (${}^{32}\text{P}$).

La desintegración alfa es una reacción de dos cuerpos, de manera que las partículas se emiten con energías cinéticas discretas. En cambio, la desintegración beta es una reacción de tres cuerpos, de forma que las partículas beta se emiten en un espectro de energías. La energía máxima del espectro depende del radionucleido que se desintegra. La energía beta media del espectro es de alrededor de un tercio de la energía máxima (véase la Figura 2.3).

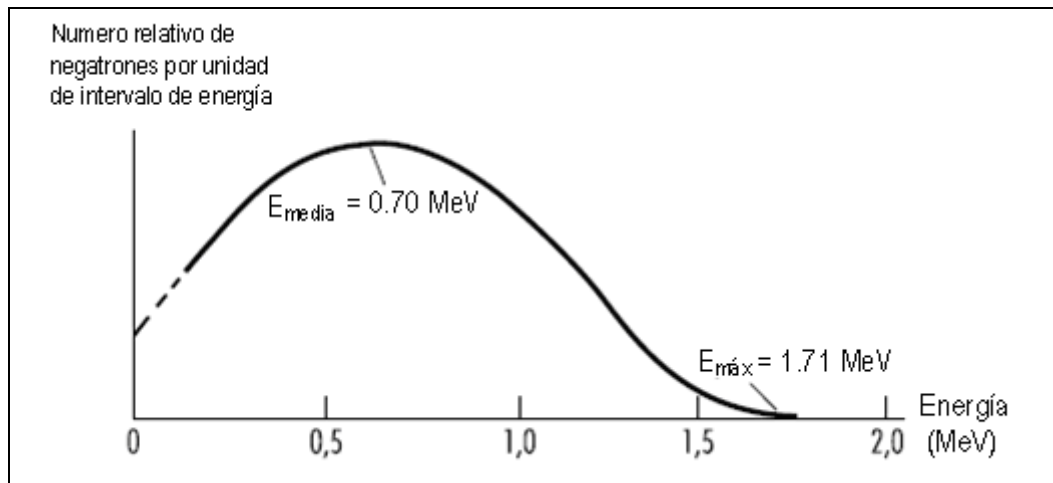


Figura 2.3. Espectro de energía beta.

El alcance de las partículas beta en el aire es de unos 3,65 m por MeV de energía cinética. Se necesitan partículas beta de 70 keV de energía como mínimo para atravesar la epidermis. Las partículas beta son radiación de baja TLE (Cherry, 1998).

2.4.3 Radiación gamma: La radiación gamma es radiación electromagnética emitida por un núcleo cuando experimenta una transición de un estado de energía más alto a un estado energético más bajo. El número de protones y neutrones del núcleo no varía en estas transiciones. El núcleo puede haber quedado en el estado de más energía después de una desintegración alfa o beta anterior. Es decir, los rayos gamma se emiten a menudo inmediatamente después de una desintegración alfa o beta. Los rayos gamma también pueden ser el resultado de la captura de un neutrón y de la dispersión inelástica de partículas subatómicas por núcleos. Los rayos gamma más energéticos se han observado en los rayos cósmicos.

En la Figura 2.4 se representa el esquema de desintegración del cobalto 60 (^{60}Co). Se muestra una cascada de dos rayos gamma emitidos por el ^{60}Co , para transformarse en níquel 60 (^{60}Ni), con energías de 1,17 MeV y 1,33 MeV, después de la desintegración beta del ^{60}Co (Cherry, 1998).

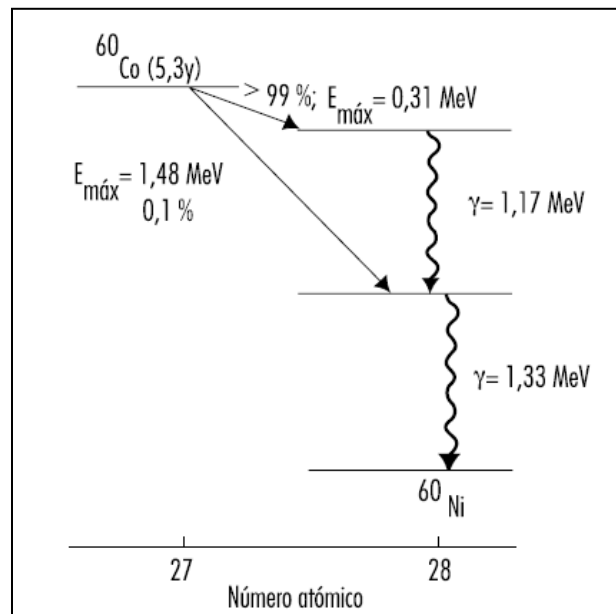


Figura 2.4. Esquema de desintegración del cobalto 60 (Cherry, 1998).

Mientras que las partículas alfa y beta tienen alcances definidos en la materia, los rayos gamma experimentan una atenuación exponencial (si se pasa por alto la acumulación que resulta de la dispersión dentro de un material) a medida que atraviesan la materia. Cuando puede prescindirse de la acumulación, la atenuación de los rayos gamma viene dada por:

$$I(X) = I(0) \cdot e^{-\mu X} \quad (2.12)$$

Donde $I(X)$ es la intensidad de los rayos gamma en función de la distancia x en el material y μ es el coeficiente másico de atenuación. El coeficiente másico de atenuación depende de la energía de los rayos gamma y del material con el que interactúan los rayos gamma. Los valores del coeficiente másico de atenuación están tabulados en numerosos documentos de referencia. La Figura 2.5 muestra la absorción de rayos gamma en la materia en condiciones de buena geometría (puede ignorarse la acumulación).

La acumulación tiene lugar cuando un haz ancho de rayos gamma interactúa con la materia. La intensidad medida en puntos dentro del material aumenta en relación con el valor esperado

en “buena geometría” (haz estrecho) a causa de los rayos gamma que se dispersan por los lados del haz directo en el interior del dispositivo de medición. El grado de acumulación depende de la geometría del haz, del material y de la energía de los rayos gamma.

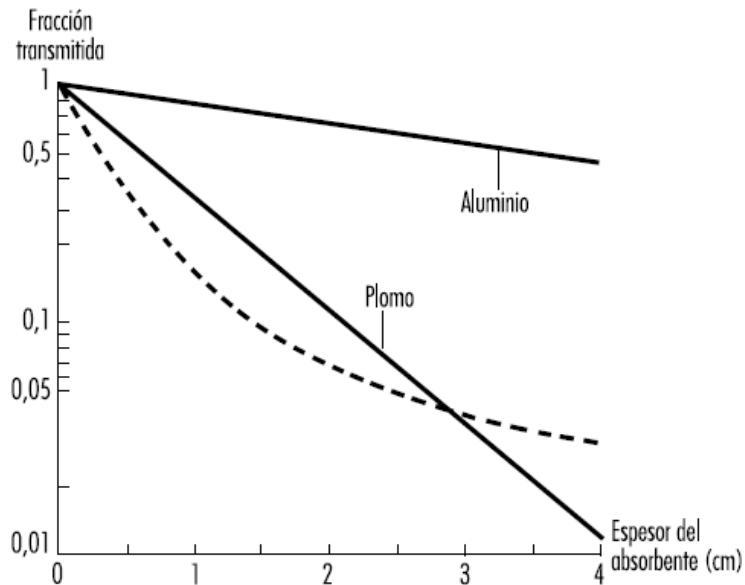


Figura 2.5. Absorción de rayos gamma en la materia en condiciones de buena geometría.

La conversión interna compite con la emisión gamma cuando un núcleo se transforma de un estado de más energía a otro de energía menor. En la conversión interna, en lugar de emitirse un rayo gamma desde el núcleo, se expulsa un electrón de una órbita interior del átomo. El electrón expulsado es ionizante directamente. A medida que los electrones de las órbitas exteriores caen a niveles de energía más bajos para llenar el hueco dejado por el electrón expulsado, el átomo emite rayos X. La probabilidad de conversión interna frente a la probabilidad de emisión gamma aumenta con el número atómico (Cherry, 1998).

2.4.4 Rayos X: Los rayos X son una radiación electromagnética y en ese sentido, son idénticos a los rayos gamma. La distinción entre rayos X y rayos gamma radica en su origen. Mientras que los rayos gamma se originan en el núcleo atómico, los rayos X resultan de interacciones entre electrones. Aunque a menudo los rayos X tienen energía inferior a la de los rayos gamma, éste no es el criterio que los diferencia. Se pueden producir rayos X con

energías mucho más elevadas que las de los rayos gamma procedentes de la desintegración radiactiva (Cherry, 1998).

La conversión interna antes explicada es uno de los métodos de producción de rayos X. En este caso, los rayos X resultantes tienen energías discretas iguales a la diferencia de los niveles de energía entre los que saltan los electrones orbitales.

Las partículas cargadas emiten radiación electromagnética siempre que son aceleradas o frenadas. La cantidad de radiación emitida es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la masa de la partícula. Por consiguiente, los electrones emiten mucha más radiación X que partículas más pesadas, como los protones, si todas las demás condiciones son iguales. Los sistemas de rayos X producen rayos X mediante la aceleración de electrones que circulan a través de una gran diferencia de potencial eléctrico, de muchos kV o MV. Los electrones son después frenados rápidamente en un material denso y resistente al calor, como el tungsteno (W).

Los rayos X emitidos desde estos sistemas tienen energías que se extienden en un espectro que va desde alrededor de cero hasta la energía cinética máxima adquirida por los electrones antes de la deceleración. A menudo, a este espectro continuo se superponen rayos X de energía discreta, que se producen cuando los electrones frenados ionizan el material del blanco o anticátodo. Como otros electrones orbitales saltan para llenar los huecos dejados tras la ionización, emiten rayos X de energías discretas similares a los rayos X que se emiten después de la conversión interna. Reciben el nombre de rayos X característicos porque son característicos del material del blanco (anticátodo). Véase en la Figura 2.6 un espectro típico de emisión de rayos X por un material utilizado como blanco. En la figura 2.7 se ofrece un esquema de un tubo de rayos X típico (Cherry, 1998) .

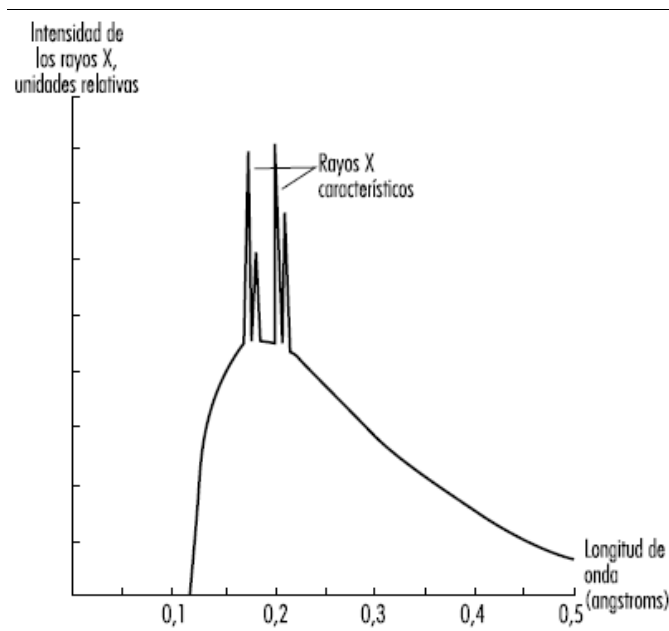


Figura 2.6. Espectro característico de emisión de rayos X por un material utilizado como blanco, .

Los rayos X interactúan con la materia de igual manera que los rayos gamma, pero una simple ecuación de atenuación exponencial no describe con precisión la atenuación de rayos X con una gama continua de energías (véase la Figura 2.5). Sin embargo, como los rayos X de energía más baja son eliminados del haz a medida que atraviesan el material con más rapidez que los de mayor energía, la descripción de la atenuación se aproxima a una función exponencial (Cherry, 1998).

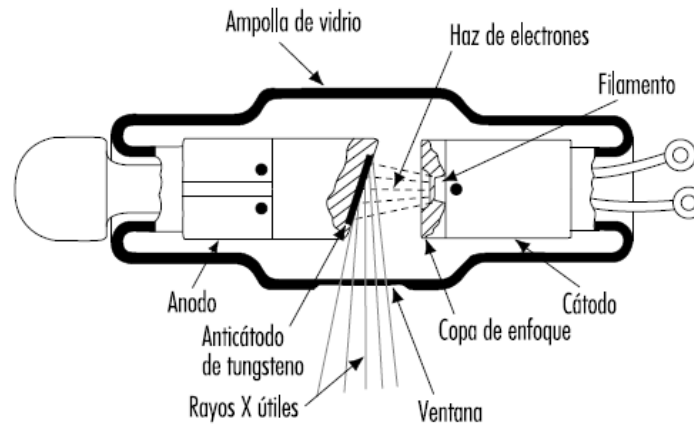


Figura 2.7 Esquema de un tubo de rayos X típico.

2.4.5 Neutrones: Por lo general, los neutrones no son emitidos como resultado directo de la desintegración radiactiva natural, sino que se producen durante reacciones nucleares. Los reactores nucleares son los que generan neutrones con mayor abundancia, pero los aceleradores de partículas y las fuentes especiales de neutrones, denominadas fuentes (α , n), también pueden producir neutrones.

Los reactores nucleares producen neutrones cuando los núcleos del Uranio (U), que constituye el combustible nuclear, se desdoblán o fisionan. De hecho, la producción de neutrones es esencial para mantener la fisión nuclear en un reactor.

Los aceleradores de partículas producen neutrones mediante la aceleración de partículas cargadas, como protones o electrones, hasta que alcanzan altas energías, para bombardear con ellas los núcleos estables de un blanco. Las partículas que pueden resultar de estas reacciones nucleares no son únicamente neutrones.

Existen varios modos posibles de interacción del neutrón con la materia, pero las dos formas principales a efectos de seguridad radiológica son la dispersión elástica y la captura de neutrones.

La dispersión elástica es el medio por el que los neutrones de mayor energía son reducidos para producir energía térmica. Los neutrones de mayor energía interactúan sobre todo por dispersión elástica y en general no causan fisión ni producen material radiactivo por captura de neutrones. Los neutrones térmicos (0-0,1 keV) son los principales responsables de los últimos tipos de interacción.

La dispersión elástica se produce cuando un neutrón interactúa con un núcleo y rebota con menos energía. El núcleo con el que ha chocado capta la energía cinética que el neutrón pierde. Después de ser excitado de este modo, el núcleo libera pronto esta energía en forma de radiación gamma (Cherry,1998).

Si el neutrón llega a alcanzar energías térmicas (llamadas así porque el neutrón está en equilibrio térmico con su entorno), es capturado fácilmente por la mayoría de los núcleos. Al no tener carga, los neutrones no son repelidos por los núcleos con cargas positivas, como les ocurre a los protones. Cuando un neutrón térmico se aproxima a un núcleo y se sitúa dentro del radio de acción de la fuerza nuclear potente, del orden de algunos fm ($1\text{fm} = 10^{-15}$ metros), el núcleo captura el neutrón. El producto resultante puede ser un núcleo radiactivo que emite un fotón u otra partícula o bien, en el caso de núcleos fisionables como ^{235}U y ^{239}Pu , el núcleo captador puede fisionarse en dos núcleos más pequeños y más neutrones.

Las leyes de la cinemática indican que los neutrones alcanzarán energías térmicas con mayor rapidez si en el medio de dispersión elástica existe un gran número de núcleos ligeros. Un neutrón que rebota en un núcleo ligero pierde un porcentaje mucho mayor de su energía cinética que si rebota en un núcleo pesado. Por este motivo, el agua y los materiales hidrogenados son el mejor material de blindaje para frenar neutrones.

Un haz de neutrones monoenergético experimentará una atenuación exponencial en el material según una ecuación similar a la indicada antes para los fotones. La probabilidad de que un neutrón interactúe con un núcleo dado se describe en función del valor de la sección eficaz.

Es extremadamente difícil producir neutrones sin acompañamiento de rayos gamma y rayos X. En general, cabe suponer que, si hay presentes neutrones, también hay fotones de alta energía. (Cherry, 1998)

2.5 Fuentes de radiación ionizante

2.5.1 Radionucleidos primordiales: En la naturaleza se encuentran radionúclidos primordiales porque sus períodos de semidesintegración son comparables con la edad de la Tierra. En la Tabla 2.1 se recogen los radionucleidos primordiales más importantes.

Radioisotopo	Periodo de Semidesintegración (10 ⁹ a)	Abundancia (%)
²³⁸ U	4,47	99,3
²³² Th	14,0	100
²³⁵ U	0,704	0,720
⁴⁰ K	1,25	0,0117
⁸⁷ Rb	48,9	27,9

Tabla 2.1. Radionucleidos primordiales más importantes.

Los isótopos del uranio y del torio encabezan una larga cadena de radioisótopos descendientes que están presentes también en la naturaleza.

El radón suele considerarse por separado de otros radionucleidos terrestres presentes en la naturaleza. Aflora al aire desde el suelo y una vez en el aire, el Radon (Rn) se desintegra aún más a isótopos radiactivos de Polonio (Po), Bismuto (Bi) y Plomo (Pb). Esta progenie de radionucleidos se une a partículas de polvo que pueden ser respiradas y quedar atrapadas en los pulmones. Como son emisores alfa, ceden casi toda su energía de radiación a los pulmones.

Es evidente que el Rn y su progenie de radionucleidos son los contribuyentes más importantes a la dosis efectiva de radiación de fondo (Cherry,1998).

2.5.2 Rayos Cósmicos: La radiación cósmica se compone de partículas energéticas de origen extraterrestre que inciden en la atmósfera de la Tierra (en su mayor parte protones). También incluye partículas secundarias, casi todas fotones, neutrones y muones generados por las interacciones de las partículas primarias con gases de la atmósfera.

En virtud de estas interacciones, la atmósfera sirve de escudo contra la radiación cósmica y cuanto más delgado sea este escudo, mayor será la tasa de dosis efectiva. Es decir, la tasa de dosis efectiva de rayos cósmicos aumenta con la altitud. Por ejemplo, la tasa de dosis a 1.800 metros de altura es alrededor del doble que al nivel del mar.

Como la radiación cósmica primaria consta esencialmente de partículas cargadas, recibe la influencia del campo magnético terrestre. Así, los habitantes de latitudes altas reciben dosis eficaces de radiación cósmica mayores que los que se encuentran más cerca del Ecuador. La variación debida a este efecto es del orden del 10 %.

Por último, la tasa de dosis efectiva de rayos cósmicos varía con la modulación de la salida de rayos cósmicos desde el Sol. En promedio, los rayos cósmicos contribuyen en alrededor de 0,3 mSv a la dosis efectiva de radiación de fondo en todo el cuerpo (Cherry,1998) .

2.5.3 Radionucleidos Cosmógenos: Los rayos cósmicos producen radionucleidos cosmógenos en la atmósfera. Los más destacados de éstos son el tritio (^3H), el berilio 7 (^7Be), el carbono 14 (^{14}C) y el sodio 22 (^{22}Na). Son producidos por rayos cósmicos que interactúan con gases atmosféricos. Los radionucleidos cosmógenos entregan una dosis efectiva anual de unos 0,01 mSv, que en su mayor parte procede del ^{14}C (Cherry,1998).

2.5.4 Lluvia Radiactiva: Desde el decenio de 1940 hasta el de 1960, se realizaron numerosas pruebas de armas nucleares sobre la superficie terrestre. Estas pruebas produjeron grandes cantidades de materiales radiactivos y los distribuyeron al medio ambiente de todo el mundo en forma de lluvia radiactiva. Aunque muchos de estos desechos se han transformado desde entonces en isótopos estables, las pequeñas cantidades que permanecen serán todavía una fuente de exposición durante muchos años. Además, las naciones que siguen realizando pruebas ocasionales de armas nucleares en la atmósfera añaden radiactividad a las existencias mundiales.

Los contribuyentes principales de la lluvia radiactiva a la dosis efectiva son en la actualidad el estroncio 90 (^{90}Sr) y el cesio 137 (^{137}Cs), los dos con períodos de semidesintegración de alrededor de 30 años. La dosis efectiva media anual debida a la lluvia radiactiva es de unos 0,05 mSv (Cherry, 1998) .

Además de las fuentes de radiaciones ionizantes mencionadas anteriormente existe un gran número de materiales y productos tecnológicos de uso común en la vida moderna que también generan este tipo de radiaciones. En la Tabla 2.2 se enumeran estas fuentes de radiación. (Cherry, 1998)

Grupo I – Comprende un gran número de personas y la dosis efectiva individual es muy amplia	
Productos del tabaco	Combustibles
Suministro doméstico y agua	Vidrio y cerámica
Materiales de construcción	Vidrio oftálmico
Minería y productos agrícolas	
Grupo II – Comprende un gran número de personas pero la dosis efectiva es relativamente pequeña o está limitada a una pequeña parte del cuerpo	
Receptores de televisión	Materiales de construcción de carreteras y autopistas
Productos radioluminosos	Transporte aéreo de materiales radiactivos
Sistemas de inspección de aeropuertos	Irradiadores de chipas y tubos electrónicos
Detectores de gases y aerosoles (humos)	Productos de torio-cebadores lámparas fluorescentes y camisas de lámparas de gas
Grupo III – Comprende relativamente pocas personas y la dosis efectiva colectiva es pequeña	
Productos de torio-varillas para soldar de Tungsteno	

Tabla 2.2. Materiales y Productos que involucran radiación ionizante.

Bibliografía.

ATTIX, F.H.,1986. Introduction to radiological physics and dosimetry radiation, Wiley, New York.

CHERRY R.N., 1998. Radiaciones ionizantes, Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, OIT., Vol. 2, Capitulo 48. Madrid.

CIPR (1982). Protection against ionizing radiation from external sources used in medicine . Ann ICRP 9(1).

ICRU, (1980), Radiations qualities and units, ICRU Report 33.