

## Capítulo 8

# Interacción de las Radiaciones Ionizantes con la materia

### 8.1. Introducción

Las radiaciones, tanto corpusculares ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $n$ , ...) como electromagnéticas (X,  $\gamma$ ), tienen la propiedad de penetrar en la materia, donde ceden su energía, total o parcialmente, en sus interacciones con los átomos constituyentes de la misma.

La comprensión de los principales procesos de interacción de las radiaciones con la materia que atraviesan es importante para poder proceder al estudio de los detectores de radiación, de las magnitudes y unidades asociadas con la radiación, de los efectos biológicos que producen al incidir sobre la materia viva y del diseño de blindajes apropiados para cada tipo de radiación.

Las radiaciones que tiene en común la propiedad de producir ionización en los medios materiales que atraviesan reciben el nombre de **radiaciones ionizantes** (la ionización es el resultado de la expulsión de un electrón fuera de la estructura atómica o molecular a la que pertenece).

Las radiaciones ionizantes constituidas por partículas cargadas (electrones, protones, partículas alfa, ...) son radiaciones **directamente ionizantes**, ya que la ionización del medio es producida por la propia partícula.

La radiación electromagnética (fotones X y  $\gamma$ ) y la constituida por partículas neutras (neutrones) también producen ionización en el medio en el que penetran. Pero esta ionización no es directa, sino indirecta, por intermedio de partículas cargadas. Por esta razón, la radiación electromagnética de alta energía y los neutrones se consideran como radiaciones **indirectamente ionizantes**.

### 8.2. Interacción de partículas cargadas

Cuando una partícula cargada penetra en la materia, experimenta la acción de fuerzas electrostáticas de núcleos y sobre todo de los electrones de la corteza atómica, lo que supone una acción paulatina de frenado que concluye con la detección de la partícula.

### 8.2.1. Tipos de interacción

Las partículas cargadas pierden su energía al interactuar con la materia a través de tres tipos de interacciones fundamentalmente, colisión elástica, inelástica y radiativa.

#### Colisión Elástica

En este tipo de colisiones, se conservan tanto la energía cinética como la cantidad de movimiento. En estos casos la partícula se desvía de su trayectoria, cediendo parte de su energía en forma de energía cinética. En las colisiones elásticas no se produce en el medio ninguna alteración, ni atómica ni nuclear.

#### Colisión Inelástica

En estas colisiones se conserva la cantidad de movimiento, pero no la energía cinética. La partícula al sufrir estas colisiones con los átomos del medio, modifica su estructura electrónica, produciendo excitación, ionización o disociación molecular.

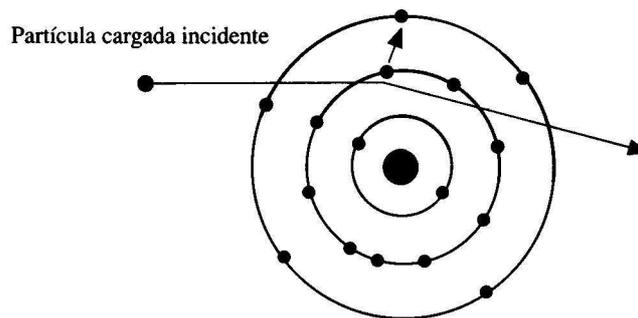
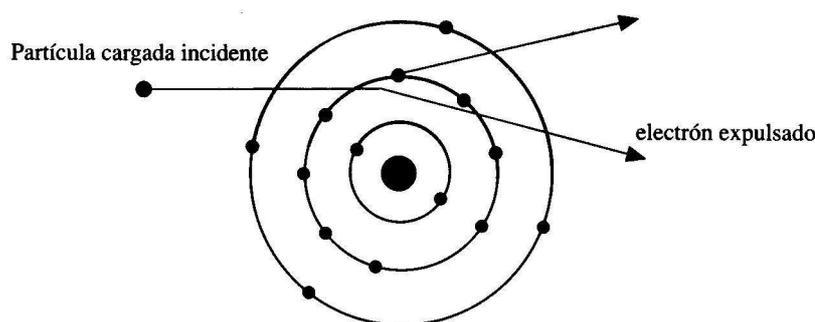


Figura 8.1: Colisión inelástica: excitación.

**Excitación** Cuando en la colisión la partícula incide sobre un electrón atómico, y la energía transferida es insuficiente para producir ionización, el electrón impactado no puede ser expulsado del átomo, pero si puede ser promovido a una órbita de mayor energía.

**Ionización** Si en los choques de la partícula con los electrones atómicos, la energía transferida es superior a la energía de enlace del electrón colisionado, éste abandona el átomo y en consecuencia se crea un ion positivo.

Se produce en estas condiciones un plasma diluido, a lo largo de la trayectoria de la partícula y hasta una cierta distancia de la misma, se crea un cierto número de pares ion-electrón, que en condiciones ordinarias tenderán a la recombinación, estableciéndose la neutralidad eléctrica del medio absorbente.



**Figura 8.2:** Colisión inelástica: ionización.

**Disociación** Cuando la energía cedida a una molécula por una partícula alcanza cierto valor crítico, puede producirse el fenómeno de la disociación o radiolisis. Este proceso consiste en la ruptura de enlaces químicos moleculares, y produce transformaciones químicas en las sustancias irradiadas.

Los efectos más intensos de la radiolisis se producen en moléculas con uniones covalentes, cuya disociación da lugar a la formación de radicales libres.

En general, los procesos químicos que ocasiona al radiolisis de la materia conducen a reacciones de descomposición, procesos de oxidación, como los sufridos por las sales ferrosas disueltas en agua, reducciones como las experimentadas por haluros de plata (que se emplea en la formación de la imagen radiológica, como se verá más adelante), o polimerizaciones como las experimentadas por el etileno o el acetileno.

### Colisión Radiativa

La partícula cargada se frena o se desvía en su interacción con los átomos del medio y como resultado emite ondas electromagnéticas (emite radiación, de ahí el nombre de colisión radiativa). Este proceso, a nivel elemental se produce con mayor probabilidad en las proximidades del núcleo atómico, como consecuencia de pequeñas desviaciones de la partícula incidente.

Cuando una partícula incidente, de masa  $M$  y carga  $ze$ , penetra en el campo eléctrico de un núcleo atómico con carga  $Ze$ , experimenta la acción de una fuerza eléctrica y por tanto una aceleración que resulta ser proporcional a  $zZ/M$ .

De acuerdo con las leyes de la Electrodinámica Clásica una partícula cargada, al ser acelerada emite radiación electromagnética (ver capítulo 3, apartado 3.4.5), cuya intensidad,  $I_r$ , es proporcional al cuadrado de la aceleración

$$I_r = \kappa \frac{z^2 Z^2}{M^2} \quad (8.1)$$

donde  $\kappa$  es una constante.

La energía de los fotones de frenado tiene valores comprendidos entre cero y la energía cinética de la partícula al producirse la colisión, correspondiente a procesos de frenado tanto más intensos cuanto menor sea la distancia entre la trayectoria inicial de la partícula y el núcleo (parámetro de impacto).

La radiación de frenado o bremsstrahlung resulta ser de mucha menor importancia, prácticamente despreciable para partículas cargadas pesadas (protones, deuterones, alfa....) que para los electrones que atraviesen un medio material (lo que se puede deducir de la expresión (8.1)), este es el proceso de emisión de rayos X de frenado, como ya se ha visto en la pag. 181. Además, para electrones, la radiación de frenado tiene una gran importancia cuando su energía es superior a algunos MeV, en especial si el material tiene un elevado número atómico  $Z$ , como se deduce de la relación que existe entre la pérdida de energía por radiación de frenado y por ionización,

$$\frac{\text{rad. frenado}}{\text{rad. ionizante}} \simeq \frac{ZE(\text{MeV})}{800} \quad (8.2)$$

siendo  $E$  la energía del electrón expresada en MeV

### 8.2.2. Ionización específica

Como hemos visto, si en la colisión inelástica con los electrones atómicos, la energía transferida es superior a la energía de enlace del electrón colisionado, éste abandona el átomo y en consecuencia se crea un ion positivo.

Este tipo de ionización originado por la transferencia de la energía de la partícula cargada a los electrones atómicos, recibe el nombre de **ionización primaria**. Existe además otro tipo de ionización, generada por electrones producidos en la ionización primaria, con energía suficiente para a su vez, producir nuevas ionizaciones en el medio. Este fenómeno recibe el nombre de **ionización secundaria**.

La ionización total,  $I_t$ , producida por una partícula cargada en su paso a través de la materia, es igual al número total de pares ion-electrón producidos por ionización primaria y secundaria, a lo largo de su trayectoria. Entonces, si  $T_C$  es la energía cinética inicial de la partícula

$$I_t = \frac{T_C}{w} \quad (8.3)$$

donde  $w$  (energía media de ionización) es la energía media necesaria para producir un par electrón-ion. En cada caso  $w$  depende de la naturaleza y energía de la partícula incidente y por otra, de la naturaleza del medio. Valores típicos de este parámetro son,  $w = 30$  eV/par para gases y  $w = 3$  eV/par para sólidos.

Recibe el nombre de **ionización específica**,  $I_e$ , el número de pares electrón-ion producidos por la partícula incidente, por unidad de recorrido en el medio material. La ionización específica varía a lo largo del recorrido de la partícula, alcanzando un valor máximo hacia el final de la trayectoria, cuando la velocidad es relativamente baja. A partir del máximo la ionización específica disminuye abruptamente, debido a la neutralización de la carga.

### 8.2.3. Poder de frenado y alcance

Cuando una partícula cargada atraviesa un medio material, va perdiendo su energía de forma continua, principalmente mediante los procesos de excitación e ionización de los átomos del medio.

Una magnitud importante en la descripción cuantitativa de la pérdida continua de energía de la partícula cargada incidente al atravesar la materia es el **poder de frenado**, que se define

como la pérdida de energía experimentada por la partícula por unidad de longitud a lo largo de su trayectoria en la materia

$$S(E) = -\frac{dE}{dx} \quad (8.4)$$

por lo que físicamente el poder de frenado no es más que una fuerza retardante.

Se expresa en unidades de energía por unidad de longitud, MeV/cm, J/cm. Depende del medio material y de la naturaleza y energía de la partícula cargada que lo atraviesa.

### Alcance

Después de recorrer una distancia más o menos definida, la partícula habrá perdido toda su energía cinética y se “termaliza” en el medio. Se define el **alcance** de una partícula cargada que incide sobre un medio material como la máxima distancia de penetración en dicho medio. Para las partículas cargadas pesadas el alcance coincide con la longitud de su trayectoria, ya que las trayectorias pueden considerarse como rectilíneas. Sin embargo, para los electrones, que experimentan desviaciones de gran ángulo sobre todo si son poco energéticos, el alcance es notoriamente inferior a la longitud de la trayectoria.

Existe una importante relación entre el poder de frenado y el alcance,  $R$

$$R = \int_0^R dx = \int_0^{T_o} \frac{dE}{S(E)} \quad (8.5)$$

donde  $T_o$  es la energía cinética inicial de la partícula incidente.

Es conveniente expresar el alcance para una partícula cargada en una sustancia mediante la masa, expresada en gramos o miligramos por  $\text{cm}^2$ , de una lámina de dicha sustancia de  $1 \text{ cm}^2$  de superficie y de grosor igual al espesor atravesado. A un espesor así expresado se le suele llamar **espesor másico**. A un espesor de  $X(\text{cm})$  en una sustancia de densidad  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$  le corresponde un espesor másico  $X_m(\text{g}/\text{cm}^2)$  dado por

$$X_m(\text{g}/\text{cm}^2) = X(\text{cm}) \times \rho(\text{g}/\text{cm}^3) \quad (8.6)$$

Los alcances de las partículas cargadas se suelen dar en estas unidades. La ventaja principal de expresar en esta forma espesores de sustancia radica en que el alcance depende sólo de las características de la partícula incidente y muy poco de la naturaleza de la sustancia atravesada.

**Alcance de partículas alfa** Al atravesar aire en condiciones normales, las partículas alfa producen varios miles de pares electrón-ion por milímetro de recorrido y más todavía si la sustancia es más densa. Por ello las partículas alfa pierden su energía muy rápidamente y su recorrido en todo caso es muy corto, de forma que el alcance de esas partículas en aire es de unos pocos cm. Son detenidas por una hoja de papel, la tela de un vestido o la piel del cuerpo humano.

El alcance medio de las partículas  $\alpha$  en aire tipo en condiciones normales, puede calcularse mediante la siguiente relación empírica con la energía cinética  $T_\alpha$

$$R(\text{cm}) = 0,318 \times T_\alpha^{3/2}(\text{MeV}) \quad (8.7)$$

esta expresión proporciona una buena aproximación para energías comprendidas entre 4 y 7 MeV

Si, como ocurre en la mayoría de los casos, la emisión de partículas alfa no fuera acompañada por los penetrantes rayos gamma, bastaría en principio los vestidos ordinarios y unos guantes de goma o plástico para manejar sin riesgo las sustancias emisoras de estas partículas. Sin embargo, si se introducen en el organismo via inhalación o ingestión o a través de una herida, estas sustancias pueden ser altamente ionizantes aún en muy pequeñas cantidades.

**Alcance de partículas beta** Debido a que son partículas ligeras, las partículas beta poseen una velocidad muy superior a las partículas alfa de la misma energía. Como consecuencia de su pequeña masa y gran velocidad, las partículas beta tiene mayor poder de penetración en la materia. Así, el alcance en aire puede estimarse en metros, dependiendo fuertemente de la energía de la partícula, siendo además muy irregular su trayectoria dentro de la materia, debido a las desviaciones que sufren al chocar.

En relación con los contenedores o **blindajes** para los radionucleidos que se desintegran via beta, interesa que estén formados por un primer espesor (en contacto con el radionucleido) de un material de bajo número atómico  $Z$ , para que frene los electrones o positrones produciendo la mínima cantidad de radiación de frenado, seguida de un cierto espesor de material de alto número atómico  $Z$ , que sirva para atenuar la posible radiación producida en el frenado de las partículas o fotones de aniquilación (para desintegración  $\beta^+$ ). Nunca debe ponerse al revés, ya que ello significará una cantidad apreciable de radiación fuera del contenedor o aumentar innecesariamente el tamaño de éste.

Para el cálculo analítico, el alcance se evalúa según las siguientes fórmulas empíricas de Feather:

En el caso de que  $0,08 < T_{\text{máx}} < 0,8$  MeV se cumple:

$$R_{\beta} \simeq 0,407 \times T_{\text{máx}}^{1,38} \quad (8.8)$$

Mientras que para  $0,8 < T_{\text{máx}} < 3$  MeV:

$$R_{\beta} = 0,542 \times T_{\text{máx}} - 0,106 \quad (8.9)$$

donde  $T_{\text{máx}}$  es la energía máxima del espectro beta emitido, expresada en MeV, y  $R_{\beta}$  es el alcance másico en  $\text{g}/\text{cm}^2$ .

Alcance de radiación beta en función de su energía Alcance en mm

Energía (MeV)	Aire	Tejido Biológico	Aluminio	Plástico
0,05	29	0,04	0,015	0,03
0,10	100	0,13	0,050	0,09
0,50	1.200	1,85	0,65	1,60
1,00	3.050	4,75	1,52	3,50
1,50	5.000	6,80	2,40	5,00
2,00	7.100	11,15	4,10	7,40
2,50	9.100	13,60	5,50	9,80
3,00	11.000	17,35	6,75	12,00
4,00	15.000	22,50	7,85	15,50

Como se ha indicado antes, las partículas beta experimentan cambios significativos en la dirección de su trayectoria en cada colisión, incluso hasta llegar a colisiones con ángulo de difusión mayor que  $90^\circ$ , fenómeno que recibe el nombre de retrodispersión.

**Aniquilación de positrones** Los positrones de gran energía tienen pérdidas por ionización y radiación, igual que los electrones. Sin embargo el fenómeno de aniquilación de positrones (ya comentado en pag. 176), introduce la variable adicional de la generación de radiación de aniquilación, circunstancia importante, en especial para el cálculo de blindajes biológicos.

### 8.3. Interacción de rayos X y rayos gamma

Tanto los rayos X como los rayos gamma son radiaciones electromagnéticas cuya interacción directa con la materia da lugar a la liberación de electrones primarios que serán los que producirán seguidamente excitación e ionización de los átomos y moléculas de la materia que atraviesan. Son por tanto radiaciones indirectamente ionizantes.

#### 8.3.1. Procesos de interacción

Los mecanismos de interacción de la radiación electromagnética de alta energía (X y  $\gamma$ ) son complejos, ya que resultan de la superposición de varios procesos independientes de los cuales los más importantes son:

##### Efecto fotoeléctrico

Este fenómeno ha sido previamente descrito en el apartado 5.2.3, aquí lo desarrollaremos teniendo en cuenta que en este caso se trata de radiación electromagnética de alta energía.

El efecto fotoeléctrico se produce cuando tiene lugar una colisión entre un fotón y un electrón ligado a un átomo. El fotón X o el gamma es completamente absorbido y toda su energía es comunicada al electrón, el cual escapa del átomo al que estaba ligado con una energía cinética igual a la diferencia entre la energía del fotón incidente y la de ligadura del átomo

$$E_f = E_\gamma - E_b \quad (8.10)$$

donde  $E_\gamma = h\nu$  es la energía del fotón incidente y  $E_b$  la de ligadura del electrón al átomo. Los electrones así emitidos se denominan fotoelectrones En la figura siguiente se ilustra el mecanismo del efecto fotoeléctrico.

El átomo residual que resulta tras un efecto fotoeléctrico, es un ion positivo con una vacante en una capa profunda, por lo general la capa  $K$ . En consecuencia el fotoelectrón emitido ira acompañado de rayos X característicos.

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno de absorción que tiene una importancia preponderante, por ejemplo en el aluminio, para energías  $E_\gamma < 50$  keV, y para el plomo hasta  $E_\gamma < 500$  keV.

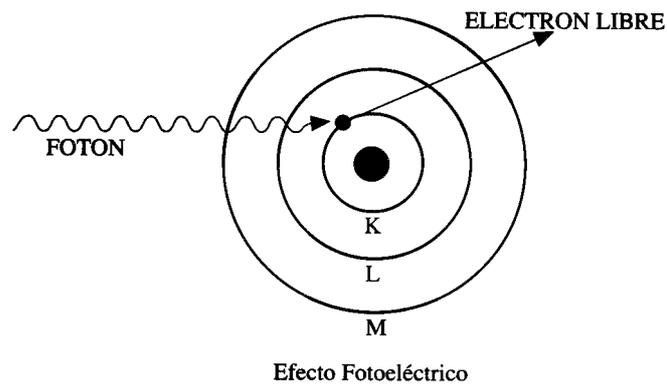


Figura 8.3: Esquema del efecto fotoeléctrico.

### Efecto Compton

El efecto Compton tiene lugar en la colisión entre un fotón y un electrón tan flojamente ligado ( $E_b \ll E_\gamma$ ) que se puede considerar como libre. El fotón X o gamma incidente sólo cede al electrón con el que choca parte de la energía, convirtiéndose en otro fotón de menor energía, y por tanto de menor frecuencia, desviado de la trayectoria inicial. El proceso se esquematiza en la siguiente figura.

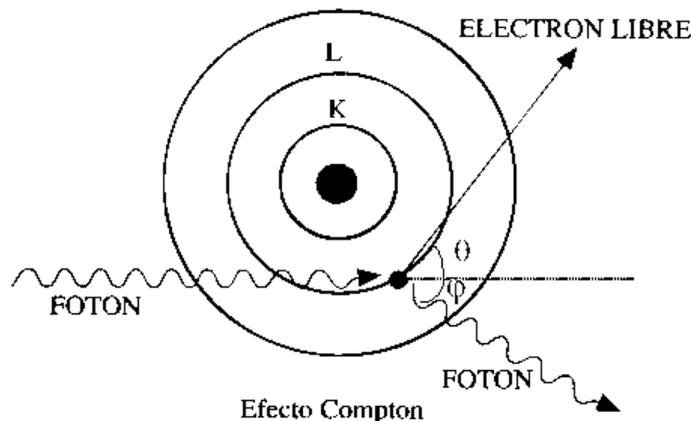


Figura 8.4: Esquema del efecto Compton.

La energía cedida al electrón es variable de unos sucesos a otros según el choque sea más o menos frontal y el nuevo fotón salga más o menos desviado respecto a la dirección inicial. Al chocar el fotón primario, de energía  $h\nu$ , el electrón resulta deflectado un ángulo  $\theta$ , y con energía  $E_e$ , mientras que el fotón primario sufre una dispersión según ángulo  $\varphi$  y su energía pasa a ser  $h\nu'$ . Por el principio de conservación de la energía se puede escribir, despreciando la energía de enlace del electrón,

$$h\nu = h\nu' + E_e \quad (8.11)$$

La aplicación de los principios de conservación de la energía y cantidad de movimiento en

condiciones relativistas (tanto los fotones como los electrones a esas energías son relativistas) permite calcular el valor de la energía del fotón dispersado

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos \varphi)} \quad (8.12)$$

con  $\alpha = h\nu/m_0c^2$ , donde  $m_0$  es la masa del electrón en reposo (0,511 MeV).

La energía cinética con la que sale el electrón es

$$E_e = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\alpha(1 - \cos \varphi)}{1 + \alpha(1 - \cos \varphi)} \quad (8.13)$$

por lo que  $E_e$  alcanza un valor máximo cuando  $\varphi = \pi$  (retrodispersión), que vale,

$$E_{e\text{máx}} = h\nu \frac{2\alpha}{1 + 2\alpha} \quad (8.14)$$

El efecto Compton, al igual que el efecto fotoeléctrico, produce un átomo residual ionizado, pero en este caso la vacante se produce en una capa poco profunda, por lo general la capa más externa (electrones de valencia) por lo que de emitirse radiación electromagnética de desexcitación, será de baja energía.

El efecto Compton es predominante en un amplio margen de energía, en el aluminio entre 50 keV y 15 MeV y en el plomo entre 500 keV y 5 MeV. El coeficiente de atenuación Compton varía linealmente con el número atómico del absorbente.

### Creación de pares

El efecto de creación de pares tiene lugar con fotones de alta energía, y representa un proceso de materialización de energía en el sentido de la Mecánica Relativista. El fotón gamma al acercarse a un núcleo atómico desaparece totalmente y en su lugar aparecen un positrón y un electrón; se trata de una conversión de energía en materia.

Como la suma de las masas del electrón y positrón equivale a una energía, teniendo en cuenta que la masa en reposo del electrón es  $0,511 \text{ MeV}/c^2$ , de  $2 \times 0,511 \text{ MeV} = 1,022 \text{ MeV}$ , está tendrá que ser la energía mínima de los fotones incidentes para que pueda tener lugar la creación de pares. El principio de conservación de la energía se expresa aquí de la forma

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_+ + E_- \quad (8.15)$$

donde  $E_+$  y  $E_-$  representan respectivamente las energías cinéticas del positrón y del electrón.

El exceso de energía sobre 1,02 MeV del fotón incidente se distribuye equitativamente en forma de energía cinética entre ambas partículas. El electrón pierde rápidamente su energía por choque con los átomos o moléculas circundantes a los que excita o ioniza. Como los positrones son partículas inestables, interactúan con un electrón para aniquilarse mutuamente. Por ello en el proceso de creación de pares tiene lugar la creación de un par de fotones de radiación electromagnética, cada uno de 0,511 MeV, que tienen direcciones opuestas. En el diagrama se describe el proceso de formación de pares.

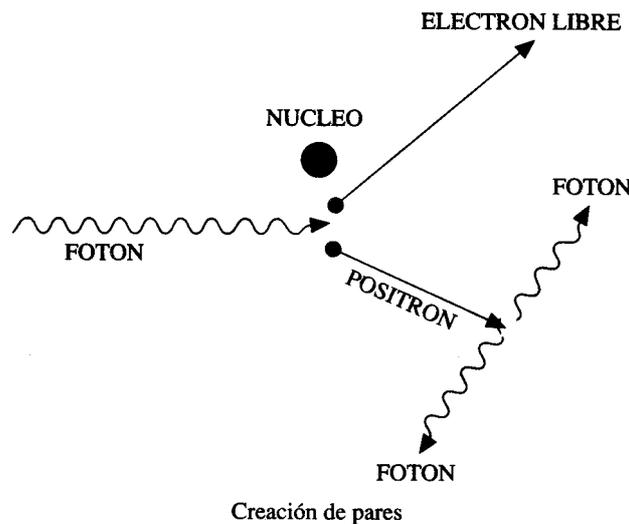


Figura 8.5: Esquema de la creación de pares.

### 8.3.2. Atenuación de la radiación electromagnética en la materia

Al incidir un haz de fotones sobre la materia, la probabilidad de que se produzca un efecto u otro depende de la energía de los fotones y de la naturaleza de la sustancia atravesada. El efecto fotoeléctrico es el más importante para la absorción de fotones de baja energía. El efecto Compton es el proceso que prevalece en la absorción de rayos gamma de energía intermedia. A partir de un valor mínimo de 1,02 MeV, la producción de pares aumenta con la energía de los fotones incidentes y es el proceso que predomina a energías altas.

En la absorción de la radiación electromagnética, las contribuciones del efecto fotoeléctrico y del de creación de pares aumentan notablemente con el número atómico  $Z$  del elemento que constituye la materia absorbente. La contribución del efecto Compton depende en menor grado de dicho número atómico.

El paso de la radiación electromagnética a través de la materia se caracteriza por una **ley de atenuación exponencial**. Esto es así porque en la interacción de un haz de fotones con la materia que atraviesan, éstos son eliminados del haz a título individual, mediante los procesos descritos anteriormente.

Si consideramos un haz de fotones de intensidad  $I_0$  (fotones por segundo) que incide sobre un medio material en el que penetran, la intensidad del haz transmitido después de atravesar un espesor  $x$  de absorbente será

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (8.16)$$

donde  $\mu$  es un parámetro característico del absorbente que depende aparte de la naturaleza y densidad del mismo, de la energía de los fotones incidentes. Recibe el nombre de **coeficiente de atenuación lineal** y se expresa en unidades de longitud inversa,  $\text{m}^{-1}$ ,  $\text{cm}^{-1}$ .

El **coeficiente de atenuación másico**, definido como  $\mu/\rho$  donde  $\rho$  es la densidad de la sustancia, se mide en  $\text{cm}^2/\text{g}$  o similares, y suele utilizarse en lugar del coeficiente lineal porque no depende del estado de agregación de la materia, en este caso los espesores utilizados serán los espesores másicos (pag. 193).

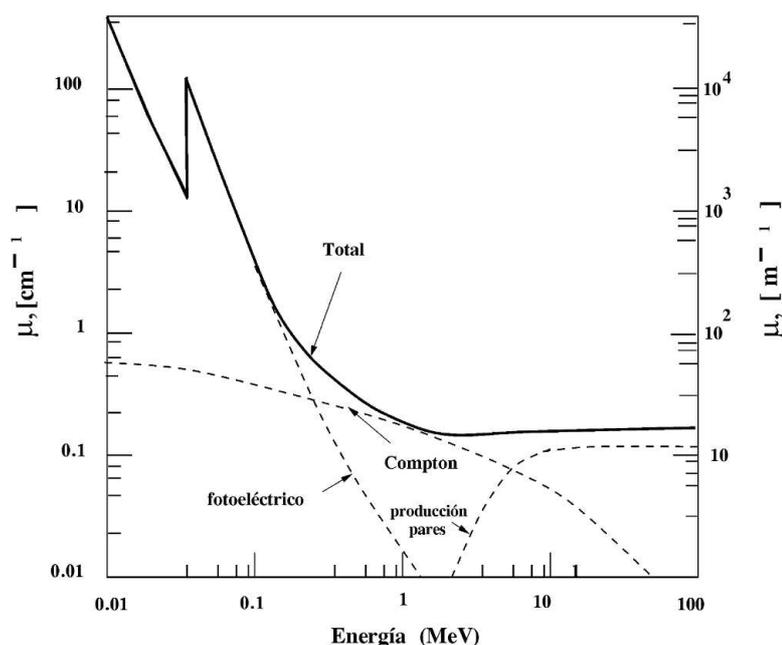


Figura 8.6: Variación del coeficiente de atenuación con la energía.

Se llama **espesor de semirreducción** ( $X_{1/2}$ ) o capa hemirreductora de un material para radiación X o gamma, al espesor de dicho material que, interpuesto en el camino de la radiación, reduce la intensidad a la mitad. El espesor de semirreducción depende de la energía de la radiación incidente y, en general, es tanto menor cuanto mayor es la densidad del material atravesado. Depende de la energía de la radiación incidente y de la densidad del material atravesado. Se relaciona con el coeficiente de atenuación con la siguiente expresión:

$$X_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (8.17)$$

En la tabla siguiente aparecen distintos ejemplos de los espesores de semirreducción en varios materiales para diferentes energías de radiación X o gamma.

Espesores de semirreducción, en cm para radiación X y gamma.

		Hormigón	Hierro	Plomo
Radiación X	50 keV	0,6	0,06	0,01
	100 keV	1,8	0,15	0,02
	150 keV	2,3	0,35	0,03
	200 keV	2,7	0,6	0,05
	250 keV	3,1	0,7	0,07
	300 keV	3,3	1,0	0,15
Emisión $\gamma$ de fuentes radiactivas	$Co^{60}$	6,6	2,2	1,24
	$Cs^{137}$	5,3	1,4	0,6
	$Ir^{192}$	4,8	1,1	0,5

## 8.4. Interacción de neutrones

Como se ha visto en el capítulo anterior, los neutrones son partículas que no tienen carga y no pueden interactuar con la materia a través de fuerzas coulombianas. El neutrón interactúa con un núcleo del material absorbente, que representa un pequeño volumen frente al volumen del átomo, por lo que son muy penetrantes. Como resultado de la interacción el neutrón puede desaparecer (**absorción**) y ser reemplazado por una o más radiaciones secundarias, o bien, cambiar significativamente la energía o dirección del neutrón (**dispersión**).

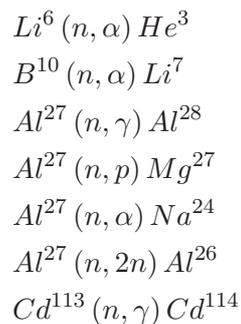
La probabilidad de que se produzca un tipo de interacción u otro es función de la energía de los neutrones y del material.

Las interacciones significativas son las siguientes:

**Dispersiones elásticas.** con los núcleos del material absorbente. La máxima transferencia media de energía tiene lugar cuando chocan los neutrones con núcleos de masa similar, por ejemplo núcleos de hidrógeno, los cuales se convierten en los protones de **retroceso**. Estos pierden seguidamente la energía recibida en el choque ionizando los átomos que encuentran en su camino. Como consecuencia de estos choques los neutrones van perdiendo energía hasta alcanzar la energía cinética media de los átomos y moléculas del medio. A estos neutrones de baja energía se les llama neutrones térmicos y al proceso moderación.

**Dispersiones inelásticas.** Tienen lugar cuando el núcleo después del choque queda en estado excitado y emite energía en exceso por emisión, en general de un fotón gamma.

**Absorción o Captura.** del neutrón por un núcleo del material absorbente produciéndose reacciones nucleares de diversos tipos, como captura radiativa, emisión de partículas o fisión. Entre estas reacciones se encuentran las siguientes



Los neutrones libres tienen un gran poder de penetración en la materia, incluso para materiales muy densos. No existen materiales eficaces para la absorción de neutrones rápidos, pero si algunos, como el cadmio o el boro que por su gran capacidad de capturar neutrones con menor energía según las reacciones descritas anteriormente son utilizados como absorbentes para este tipo de neutrones lentos y térmicos.

La forma más eficaz para detener un haz de neutrones rápidos (de mayor energía) consiste en convertirlos previamente en neutrones lentos, interponiendo en su camino un espesor conveniente de agua, parafina o plástico (materiales ricos en hidrógeno) seguido de unos milímetros de cadmio o unos centímetros de boro.

El cuerpo humano contiene un gran porcentaje de hidrógeno y por tanto es muy probable que, si inciden neutrones sobre el mismo, tengan lugar dispersiones elásticas produciéndose protones de retroceso que a su vez producirán daños biológicos. Por tanto el neutrón es una partícula de gran peligrosidad desde el punto de vista de la radioprotección.

## 8.5. Unidades de radiación

Desde el comienzo de las aplicaciones médicas, científicas e industriales de las fuentes de radiaciones ionizantes, se hizo necesario definir magnitudes y unidades que permitieran caracterizar de manera cuantitativa la radiación.

Las unidades de radiación tradicionales siguen teniendo uso extendido, sin embargo ya desde el año 1975 el Comité Internacional de Pesas y Medidas recomendó el uso de las unidades del llamado **Sistema Internacional de Unidades Físicas**.

### 8.5.1. Actividad

Esta magnitud ya ha sido introducida en el capítulo anterior. Una masa o cantidad de sustancia radiactiva se mide por la **actividad** que espontáneamente desarrolla, entendiéndose por tal el número de desintegraciones nucleares que en ella tienen lugar por unidad de tiempo. La unidad correspondiente en el sistema internacional es la desintegración por segundo, a la que se llama **Becquerelio**, designándola **Bq**.

Como unidad tradicional se escogió en su día el **Curio**, al que se designó con el símbolo **Ci** y que fue definido como la actividad de una masa radiactiva en la que se producen  $3,7 \times 10^{10}$  desintegraciones por segundo. Está claro que un curio equivale a  $3,7 \times 10^{10}$  Bq y representa muy aproximadamente la actividad de un gramo de radio natural  $Ra^{226}$ .

La relación entre las dos magnitudes es la siguiente

$$\boxed{1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}} \quad (8.18)$$

Aunque para definir la peligrosidad de una fuente radiactiva se precisa conocer las características de la radiación que emite, se puede dar una idea aproximada de dicha peligrosidad a partir de la actividad de la fuente. Por lo que, fuentes de pocos curios son en general muy peligrosas y deben manejarse con rigurosas precauciones. Fuentes de milicurios debidamente encapsuladas son poco peligrosas, aunque también requieren ciertas precauciones de manejo. Fuentes encapsuladas de microcurios no suelen encerrar peligro, aunque puede resultar peligrosa la ingestión o inhalación de tan pequeñas cantidades de algunos radionucleidos.

Se define **actividad específica** de un material radiactivo como la actividad de la unidad de masa de dicho material. Cuando se trata de un líquido o de un gas suele expresarse también como la actividad de la unidad de volumen en condiciones normales. Se acostumbra a medir en curios/gramo o curios/cm<sup>3</sup> en el sistema tradicional mientras que en el vigente sistema internacional deberá expresarse en bequerelios/kg o bequerelios/m<sup>3</sup> respectivamente.

### 8.5.2. Exposición

El concepto **exposición** ( $X$ ) se introdujo originalmente para permitir la comparación de “cantidades de radiación” suministradas por los tubos de rayos X relacionando su interacción con la materia.

Como fenómeno de interacción se adoptó la ionización producida por la radiación en aire y como unidad tradicional se tomó el **Roentgen** o **Renguenio**, representado por el símbolo **R**, que se definió como aquella exposición a la radiación X o gamma que al atravesar un volumen de aire seco, en condiciones normales de presión y temperatura, provoca la liberación, por cada centímetro cúbico, de iones y electrones que totalizan una unidad electrostática de carga (u.e.c) de cada signo (unidad de carga eléctrica en el antiguo sistema cegesimal).

$$1 \text{ u.e.c} = \frac{1}{3} \times 10^{-9} \text{ C}$$

Como unidad correspondiente en el sistema internacional se ha tomado aquella exposición a radiación X o gamma que al atravesar un kilogramo de aire seco provoca la liberación de iones y electrones que totalizan un culombio de carga eléctrica de cada signo. A esta unidad, el culombio por kilogramo en aire, no se le ha dado nombre especial y se la denomina por el símbolo **C/kg**

La equivalencia entre ambas unidades viene dada por

$$\boxed{1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}} \quad (8.19)$$

El uso del roentgen como unidad de radiación es inadecuado puesto que se aplica sólo a rayos X y radiación gamma y sus efectos en aire. Se introduce el concepto de dosis absorbida como generalización de la exposición para cualquier tipo de radiación y en cualquier medio.

### 8.5.3. Dosis absorbida

Se define la magnitud **dosis absorbida** ( $D$ ) como la energía depositada por cualquier radiación ionizante por unidad de masa de material irradiado. Los efectos que la radiación produce en una sustancia están determinados por la energía que dicha sustancia absorbe y podrán ser cuantificados con esta magnitud.

La unidad tradicional de dosis absorbida es el **rad**, equivalente a la absorción de una energía de 100 ergios por gramo de sustancia irradiada.

La correspondiente unidad del sistema internacional es el julio de energía absorbida por kilogramo de sustancia irradiada, a la que se llama **Gray**, y se representa por el símbolo **Gy**.

La equivalencia entre unidades es la siguiente

$$\boxed{1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}} \quad (8.20)$$

La energía absorbida por los tejidos blandos del cuerpo que han sufrido una exposición a radiación X o gamma de 1 R es aproximadamente la equivalente a 1 rad (10 mGy) de dosis absorbida. En los huesos, que poseen mayor coeficiente de absorción para dichas radiaciones, un roentgen de exposición equivale a algo más que un rad. En general

$$\boxed{D(\text{rad}) = f \times X(\text{R})} \quad (8.21)$$

donde  $f$  es un factor que depende del medio, para tejidos blandos  $f \approx 1$ .

#### 8.5.4. Dosis equivalente

A pesar de que la magnitud dosis absorbida es un concepto físico muy útil, sucede que la misma dosis absorbida debida a diferentes tipos de radiación no produce necesariamente el mismo daño biológico. Esta diferencia de efectividad radiobiológica debe tenerse en cuenta si se quiere sumar dosis debida a diferentes radiaciones para obtener la dosis biológicamente efectiva.

Para tratar de evaluar cuantitativamente los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes, se hace preciso definir una nueva magnitud, la **dosis equivalente** ( $H$ ) que resulta de multiplicar la dosis absorbida de cada tipo de radiación por un factor de calidad  $Q$  que representa la capacidad del tipo particular de radiación de causar daño

$$H(\text{dosis equivalente}) = D(\text{dosis absorbida}) \times Q \quad (8.22)$$

La dosis equivalente permite, desde el punto de vista de la radioprotección comparar la peligrosidad de una misma dosis para los diferentes tipos de radiación.

La unidad tradicional para esta magnitud es el **rem** cuando la dosis absorbida viene expresada en rad. En el sistema internacional, la dosis equivalente es el **Sievert (Sv)** correspondiente a la dosis absorbida de un gray.

$$H(\text{rem}) = D(\text{rad}) \times Q \quad (8.23)$$

$$H(\text{Sv}) = D(\text{Gy}) \times Q \quad (8.24)$$

Y dado que  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ , se tiene de manera análoga

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} \quad (8.25)$$

El valor del factor de calidad  $Q$  depende fuertemente de la densidad de ionización, es decir del número de iones por unidad de longitud que las distintas radiaciones producen a lo largo de su recorrido en el organismo. Los valores de  $Q$  para las distintas radiaciones ionizantes se dan en la siguiente tabla

Radiación	$Q$
$X, \gamma$	1
$e$	1
$n < 10 \text{ keV}$	5
$n > 20 \text{ MeV}$	5
$n$ de 10 a 100 keV	10
$n$ de 100 keV a 2 MeV	20
$n$ de 2 MeV a 20 MeV	10
$\alpha$ , núcleos pesados	20

#### 8.5.5. Tasa de dosis. Relaciones entre magnitudes

La exposición a radiación gamma o X, la dosis absorbida y la dosis equivalente de cualquier radiación, se han definido independientemente del tiempo que ha podido durar la irradiación.

TABLA RESUMEN DE UNIDADES

Magnitud medida	Unidad tradicional	Unidad en el S.I.
Actividad ( $A$ ) = Velocidad de desintegración	Curio (Ci)	Becquerelio (Bq)
Exposición ( $X$ ) = Ionización en aire	Roentgen (R)	C/kg
Dosis absorbida ( $D, D_a$ ) = Absorción de energía	rad	Gray (Gy)
Dosis equivalente ( $H, D_e$ ) = Efectividad biológica	rem	Sievert (Sv)

Pero no es lo mismo absorber la dosis total de un rad, por ejemplo, en un minuto en un campo de radiación intenso, o en un año por estar en un campo de radiación débil.

Se hace necesario definir unas magnitudes que dependen del tiempo, las **tasas**. La **tasa de exposición**  $\dot{X}$ , **tasa de dosis** (tanto **absorbida**,  $\dot{D}$ , como **equivalente**,  $\dot{H}$ ) son la exposición o la dosis que recibirá en condiciones constantes, por unidad de tiempo.

La **tasa de exposición** (que también se denomina ritmo de exposición), a una distancia  $d$  dada, está relacionado con la actividad,  $A$ ,

$$\dot{X} = \frac{\Delta X}{\Delta t} = \Gamma \frac{A}{d^2} \quad (8.26)$$

$\Gamma$  : **Constante específica de tasa de exposición  $\gamma$  de la fuente**

En la tabla siguiente aparecen los valores de la constante de tasa de exposición para algunos radionucleidos utilizados en gammagrafía.

Radioisótopo	Constante de tasa de exposición $\Gamma$ (C m <sup>2</sup> /kg s Bq)
<sup>60</sup> Co	$2,52 \times 10^{-18}$
<sup>137</sup> Cs	$6,29 \times 10^{-19}$
<sup>192</sup> Ir	$9,01 \times 10^{-19}$

## 8.6. Detección y medida de las Radiaciones Ionizantes

### 8.6.1. Fundamentos físicos

El hombre ha ideado procedimientos y aparatos para detectar, medir y analizar las radiaciones nucleares. Para ello se aprovechan los distintos efectos que produce la radiación al atravesar la materia. Los principales de estos efectos son:

- Ionización de medios materiales (gases, semiconductores).
- Excitación de luminiscencia.

- Disociación de la materia.

El principio de funcionamiento de un detector es sencillo: una partícula cargada pierde energía, ioniza el medio (además de producir excitaciones) y como consecuencia da una señal observable y accesible al observador. Cuando la radiación incidente no está formada por partículas cargadas, por ejemplo radiación gamma (radiación electromagnética), la detección se realiza gracias a algún fenómeno o efecto de la interacción de la radiación de este tipo con la materia, que producirá electrones, siendo el proceso posterior similar al producido por las partículas cargadas.

Una primera clasificación de los detectores, en función de su base física de funcionamiento, es la siguiente:

**Detectores eléctricos** Los electrones emitidos por ionización son acelerados por un potencial y a su vez producen más ionización, con lo cual la señal final es amplificada. Si el medio es un **gas**, funcionan por las descargas en gases (cámaras de ionización, contadores proporcionales, tubos de Geiger-Müller). En los cristales **semiconductores**, son los pares electrón-hueco creados por el paso de la partícula los que determinan la señal.

**Contadores de centelleo** Las partículas cargadas excitan los átomos del medio. La emisión luminosa producida en la desexcitación es convertida en pulso eléctrico por efecto fotoeléctrico y amplificada en un fotomultiplicador.

**Detectores de trazas** La trayectoria de la partícula se hace visible; por ejemplo, en cámaras de niebla o de Wilson, de burbujas, de chispas, emulsiones, etc.

La única manera de poder detectar partículas neutras es conseguir que interactúen con el detector y que se produzcan en el estado final partículas cargadas. Gracias a la detección de las partículas cargadas (secundarias) se podrán reconstruir las características de la partícula neutra incidente. Los detectores que se diseñen para partículas neutras deben ser sensibles a las interacciones siguientes:

- Si se quiere detectar fotones ( $\gamma$ ), hay que aprovechar la interacción **electromagnética** de dichos fotones, es decir el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton o la creación de pares.
- Si se quiere detectar neutrones ( $n$ ), hay que utilizar la interacción **fuerte**, por ejemplo, la colisión elástica  $np \rightarrow np$ , de forma que el protón adquiere energía y es el que se detecta.

Cualquiera de los procesos citados puede constituir el fundamento de un detector. En general se suele distinguir dentro de los detectores a los meros contadores de partículas o fotones que alcanzan al dispositivo de los espectrómetros, donde además de la información de la presencia de la radiación que da el contador, se mide la energía de la radiación incidente.

La noción de detector engloba también la electrónica asociada. El procesado electrónico de las señales, los ordenadores, etc., juegan un papel esencial en la detección de partículas.

Cuando una radiación nuclear atraviesa un medio provoca la ionización de una parte de sus átomos, lo que conlleva la liberación de iones positivos y electrones negativos. Si el medio es

un gas, por ejemplo, que se comportaba como un aislante eléctrico, pasa a ser parcialmente conductor. Midiendo la corriente eléctrica que por él circula, en determinadas condiciones, puede deducirse la intensidad de la radiación que lo atraviesa.

La radiación nuclear también puede provocar, al atravesar ciertos sólidos transparentes, la excitación de una fracción de átomos de la sustancia atravesada, los cuales se desexcitan inmediatamente emitiendo fotones luminosos. La medida de la luz permite medir y analizar la radiación nuclear que la provocó.

Los efectos producidos por la cesión de energía de la radiación, pueden dar lugar a la disociación, proceso por el que se rompen enlaces químicos produciendo alteraciones en la constitución de la materia. Un ejemplo de este fenómeno es el ennegrecimiento de placas fotográficas. Las radiaciones nucleares pueden atravesar la envoltura que protege de la luz ordinaria a una película fotográfica y ennegrecerla. Midiendo después la intensidad de dicho ennegrecimiento se puede deducir la dosis de radiación que ha alcanzado a la película fotográfica.

### Características de los detectores

**Eficiencia** Relación entre las partículas registradas y las que llegan al detector.

$$\varepsilon = N/A \quad (8.27)$$

Donde  $N$  son las partículas registradas y  $A$  las que llegan al detector (actividad de la muestra radiactiva).

**Tiempo muerto,  $\tau$**  Tiempo durante el cual el detector no es capaz de contar, después de haber llegado una partícula.

**Resolución** Capacidad que tiene un detector (espectrómetro) de ver distintas emisiones con energías muy próximas. Se mide como la anchura a semialtura (*FWHM*, *full width half maximum*) de una línea de emisión con relación a la energía.

$$R = \frac{FWHM}{E} \quad (8.28)$$

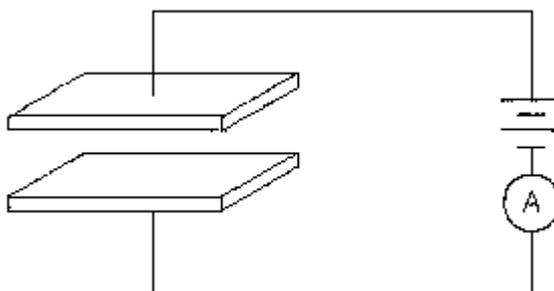
**Linealidad** La relación entre la energía disipada por un suceso ionizante  $E$  y el tamaño del impulso de tensión generado,  $V$ .

$$E = a + bV \quad (8.29)$$

#### 8.6.2. Detectores de ionización gaseosa

Los detectores de ionización gaseosa están esencialmente constituidos por un recinto lleno de un gas a presión conveniente en el que se disponen dos electrodos a los que se aplica una tensión de polarización, por lo que se crea un campo eléctrico en el volumen del detector.

Como los gases son aislantes en condiciones normales, no circula corriente eléctrica entre ambos electrodos. Pero cuando una partícula ionizante alcanza el espacio entre los electrodos, el campo eléctrico existente dará lugar a que las cargas eléctricas generadas por la interacción de las partículas, se muevan hacia los electrodos de signo contrario. De esta forma se origina



**Figura 8.7:** Esquema básico de un detector de ionización gaseosa.

en el circuito de detección un breve paso de corriente, o impulso de corriente (dependiendo de la electrónica asociada), que puede ser medido y revela la llegada de radiación al detector.

Al variar la tensión de polarización de los electrodos varía la amplitud del impulso generado, estableciéndose tres tipos de detectores gaseosos.

**Cámara de ionización (zona 2, véase figura 8.8)** La tensión de polarización aplicada produce un campo eléctrico suficiente para que sea posible la captación de toda la carga generada por la radiación incidente. Sólo hay ionización primaria. La amplitud del impulso obtenido es proporcional a la energía disipada por la partícula por lo que se puede hacer espectroscopía con ellas. La corriente generada es muy pequeña; para poder ser medida por instrumentos ordinarios, se tiene que amplificar previamente mediante un circuito electrónico que constituye un amplificador lineal.

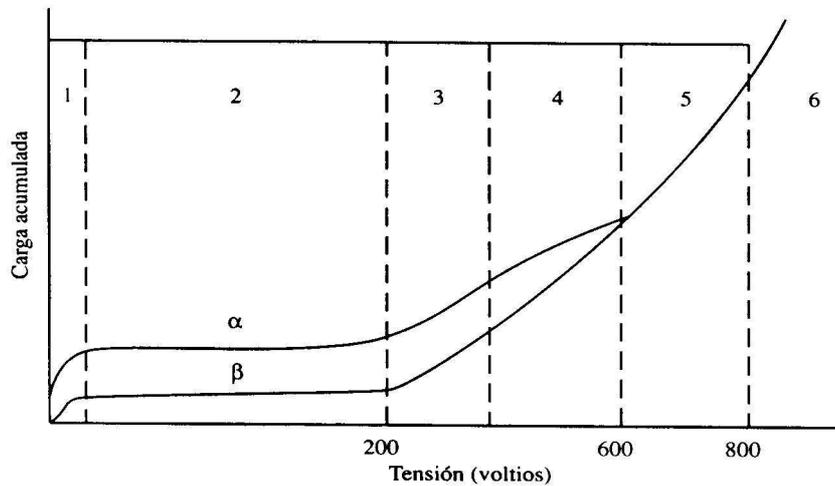
**Contador proporcional (zona 3)** Al aumentar la tensión aplicada por encima de la zona correspondiente a la cámara de ionización, se presenta el fenómeno de multiplicación de carga, al unirse a la ionización primaria, la secundaria, originada por los electrones que acelerados hacia el ánodo, ganan energía suficiente para ionizar por impacto a las moléculas de gas neutro. De esta forma aumenta el tamaño del impulso proporcionado en un factor, llamado factor de multiplicación gaseosa, que vendrá dado por el número de nuevos pares de iones producidos por cada electrón primario.

El contador proporcional trabaja satisfactoriamente como espectrómetro siempre que la partícula ionizante disipe la totalidad de su energía en el volumen sensible del detector ya que entonces el tamaño de los impulsos es proporcional a la energía de la partícula. Aunque la magnitud de los impulsos generados es mayor que en la cámara de ionización, se requiere como en ésta una amplificación de la señal.

**Contador Geiger (zona 5)** Si se eleva la tensión de polarización por encima de la zona de proporcionalidad, los impulsos resultantes alcanzan todos la misma amplitud, independientemente de la ionización primaria debida a la partícula detectada. Se dice entonces que la modalidad de funcionamiento del contador corresponde a la zona Geiger.

El fenómeno de multiplicación de carga, que ya aparecía en los contadores proporcionales, se incrementa y se propaga a lo largo del ánodo, produciendo una avalancha de iones que dan lugar a la formación de un impulso mucho mayor que en las cámaras de ionización o contadores proporcionales. La amplitud del impulso es suficiente para activar directamente sistemas electrónicos de registro, sin necesidad de amplificación previa.

Esta circunstancia, que abarata considerablemente la cadena electrónica, constituye la cualidad más apreciada de este tipo de detectores. Pero no dan ningún dato acerca de la naturaleza o energía de las partículas detectadas.



**Figura 8.8:** Variación de la carga en función de la tensión aplicada, en un detector de ionización gaseosa ideal.

### 8.6.3. Detectores de centelleo

Los detectores de centelleo utilizan la propiedad de ciertos materiales de emitir luz visible cuando sus átomos o moléculas se desexcitan tras el paso de la radiación ionizante. Estos detectores se basan en el fenómeno de excitación. La luz emitida debe ser transformada posteriormente en señal eléctrica capaz de ser medida mediante un fotomultiplicador.

Los elementos fundamentales de un detector de centelleo son la sustancia luminiscente y el fotomultiplicador.

Existe una gran variedad de sustancias luminiscentes, incluyendo cristales inorgánicos y compuestos orgánicos, bien en forma cristalina o en disolución.

Dos cualidades esenciales de una sustancia luminiscente deben ser: una gran eficiencia de detección para la radiación y una buena transparencia a la luz producida en su interior. Para mejorar la eficiencia de detección se les suele añadir en pequeña proporción una sustancia llamada activadora.

El tubo fotomultiplicador es, en esencia, una fotocélula. Consta de un fotocátodo, una serie de electrodos sucesivos denominados dinodos, a potenciales crecientes y un electrodo colector o ánodo. Todos estos elementos están contenidos en una cápsula de cristal en la que se ha hecho vacío.

El fotocátodo es una capa de material fotosensible en la que los fotones producidos en el centelleador producen electrones. Estos fotoelectrones (producidos por efecto fotoeléctrico) son acelerados hacia el primer dinodo a potencial positivo y allí se generan nuevos electrones secundarios, cuatro o cinco por cada electrón incidente. Este proceso se repite en cada dinodo,

con lo que se logra una amplificación que oscila entre  $10^6$  y  $10^9$ , según sea el número de dinodos y de la diferencia de potencial entre cada par de dinodos y de la diferencia de potencial entre cada par de dinodos consecutivos.

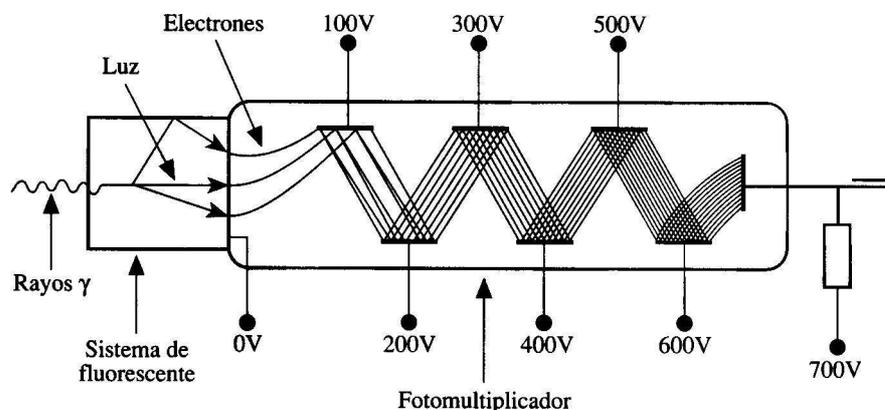


Figura 8.9: Esquema de un detector de centelleo.

Los compuestos inorgánicos fluorescentes más utilizados en detectores de centelleo son el  $\text{SZn(Ag)}$  y el  $\text{INa(Tl)}$ . El primero resulta adecuado para la detección de partículas cargadas, tales como partículas alfa.

El  $\text{INa(Tl)}$  es el detector de centelleo orgánico por excelencia. Su alta eficiencia de conversión luminosa, su excelente transparencia y su elevada capacidad para absorber fotones mediante efecto fotoeléctrico al estar formado por un gran porcentaje de yodo, cuyo número atómico es relativamente grande.

Cuando un fotón de radiación X o gamma es enteramente absorbido en el cristal de centelleo, el impulso eléctrico resultante en el fotomultiplicador es proporcional a la energía del fotón incidente. En particular, los cristales de  $\text{INa(Tl)}$  son ampliamente utilizados en el estudio de emisión gamma y deducción de la naturaleza del radioisótopo emisor.

DETECTOR	LLENADO	UTILIZACIÓN	$\epsilon$	$\tau$	R	Espectroscopía	CARACTERÍSTICAS
Cámara ionización	Aire, gases nobles	Fotones, beta y alfa	1% 100%	Rápido	Aceptable	Sí	Necesita amplificación
Cámara proporcional	Argón, metano	Fotones, beta y alfa	1% 100%	0,1 $\mu\text{s}$	Baja	Sí	Amplificación
Contador Geiger	Argón	Fotones, beta y alfa	1% 100%	100 $\mu\text{s}$	--	No	No amplificación
Centelleo	Sustancias luminiscentes	Fotones, beta y alfa	60% Alta	250 $\mu\text{s}$	Baja	Sí	Fotomultiplicador
Semiconductor	$\text{Si(Li)}$ $\text{Ge(Li)}$	Fotones, beta y alfa	Media	bajo	Buena	Sí	Trabaja a temperaturas bajas

Tabla-resumen de los distintos tipos de detectores.  $\epsilon$  es la eficiencia,  $\tau$  es el tiempo muerto y R la resolución.

#### 8.6.4. Detectores de estado sólido

Estos detectores se basan en la producción de pares electrón-hueco en un material semiconductor (silicio o germanio) y el posterior tratamiento de la señal.

Son muy utilizados los detectores de germanio compensado con litio, Ge(Li), aunque tienen la desventaja de que el cristal debe mantenerse siempre a una temperatura muy reducida, refrigerándose con nitrógeno líquido. Últimamente se han generalizado los detectores de germanio intrínseco o ultrapuro, que sólo debe estar a baja temperatura durante el proceso de medida.

Los detectores de semiconductor se utilizan casi exclusivamente para la espectrometría gamma y X, ya que ofrecen una resolución en energía elevada, aunque su eficiencia es algo inferior a los detectores de centelleo (INa(Tl)).

#### 8.6.5. Dosímetros

La **dosimetría** es la ciencia que tiene por objeto la medida de la dosis.

Para la vigilancia radiológica continua de las personas expuestas a las radiaciones ionizantes suelen realizarse dos tipos de medidas:

- Medida de la tasa de exposición o tasa de dosis absorbida en las áreas de trabajo.
- Medida periódica de las dosis acumuladas por cada individuo durante su trabajo.

El primer tipo de medidas lo podemos realizar mediante la dosimetría ambiental, utilizando dispositivos que registren las dosis que se producen en puntos claves de la instalación radiactiva. A estos dispositivos se les denomina **monitores de radiación**. La medida de las dosis acumuladas por cada trabajador se realiza mediante la llamada **dosimetría personal**, utilizando dispositivos, dosímetros que lleva cada persona mientras permanece en la instalación radiactiva y que registran por tanto la dosis que reciben individualmente.

#### Fundamentos físicos de monitores y dosímetros

Los principales efectos en los que se basan los monitores y dosímetros son

- Ionización de los gases.
- Excitación de luminiscencia en sólidos.
- Ennegrecimiento de placas fotográficas (disociación).

Las radiaciones ionizantes, al atravesar ciertas sustancias, pierden parte de su energía al provocar fenómenos de luminiscencia con emisión inmediata o diferida de fotones luminosos. La medida de la luz emitida permite a su vez medir, y en ocasiones analizar, la radiación que la provocó.

Las radiaciones ionizantes (a excepción de las partículas alfa por su muy reducido poder de penetración) pueden atravesar la envoltura que protege de la luz ordinaria a una película fotográfica y ennegrecerla. Midiendo después la intensidad de dicho ennegrecimiento se puede deducir la dosis de radiación que ha alcanzado a la película fotográfica.

### Monitores de tasa de exposición o dosis

La vigilancia radiológica de áreas de trabajo, en las que existe riesgo de operar en campos de radiación, consiste en la medida de la exposición, la dosis absorbida o las respectivas tasas en zonas determinadas.

Estos instrumentos suelen llevar como órgano detector una cámara de ionización o un contador Geiger, y suelen ir provistos de ventanas de pared delgada, ocultables por pantallas absorbentes desplazables, con objeto de medir, bien el efecto conjunto de radiación beta y gamma (ventana abierta) o sólo la componente gamma (ventana cerrada).

Los equipos de medida de radiación gamma suelen ofrecer las variantes de medida de exposición o tasa de exposición, y todos ellos poseen un mando de varias posiciones, de modo que pueda modificarse la sensibilidad del instrumento para adecuarla en cada caso al campo de radiación de interés

### Dosímetros personales

Estos dispositivos se utilizan para la vigilancia radiológica individual. Son detectores de pequeño tamaño, contruidos con materiales que equivalgan lo más estrechamente posible al aire o tejido biológico. En función de su principio de funcionamiento pueden ser: dosímetros de ionización, de película fotográfica y de termoluminiscencia.

**Los dosímetros de ionización** se basan en la medida de la ionización, se encuentran los llamados de lectura directa, que permiten la medida inmediata de la exposición o dosis absorbida por el detector en un tiempo dado.

**Los dosímetros fotográficos** se utilizan la sensibilidad a la radiaciones de las sales de plata. El principio en el que se basan es la exposición de una emulsión fotográfica a la radiación, seguido del revelado de la placa, y evaluación del grado de ennegrecimiento mediante un microdensitómetro. Este último dato permite evaluar la dosis absorbida, tras un calibrado previo para cada tipo de película.

Los dosímetros fotográficos constan de una película especial envuelta en una funda opaca, montada en un soporte provisto de una pinza, que permite llevar el instrumento sobre la bata o ropa de trabajo. El bastidor del soporte está dotado de una serie de ventanas y filtros, que permiten la determinación simultánea de una serie de datos radiológicos de interés.

### Monitores de contaminación

Cuando se manejan sustancias radiactivas no encapsuladas se hace necesario disponer de instrumentos apropiados para detectar y medir posibles contaminaciones en el aire y superficies.

Para la detección de contaminación en superficies suele utilizarse un monitor portátil dotado de una o varias sondas reemplazables, provistas del detector adecuado al tipo de contaminación que se debe detectar. Para contaminación con emisores beta el detector suele ser un contador Geiger con ventana delgada.

Para detectar la contaminación por emisores alfa la sonda suele estar dotada de un contador proporcional o de un detector de centelleo apropiados y provistos en caso necesario de una ventana muy delgada.

## Autoevaluación

1. Los detectores de estado sólido:
  - a) Tienen peor resolución que los Geiger.
  - b) Tienen peor resolución que los de Centelleo.
  - c) Tienen mejor eficiencia que los de Centelleo.
  - d) Tienen mejor resolución que los de Centelleo.
  
2. Los detectores de centelleo se basan en:
  - a) Ionización de un medio semiconductor.
  - b) Ionización de un gas.
  - c) Emisión de luz al paso de las radiaciones ionizantes.
  - d) Ennegrecimiento de sales de plata.

### Soluciones:

1. Respuesta D
2. Respuesta C