

# Capítulo 4 .

## Procesos de Detección.

### 4.1 Detectores de Rayos Gamma.

Por su alta energía los fotones gamma sólo pueden ser detectados y/o medidos indirectamente por el efecto que producen en la materia, y desafortunadamente por esta misma razón no interactúan con mucha probabilidad. Los métodos de detección y conteo de fotones de alta energía tienen aproximadamente 30 años de desarrollo, ya que era necesario entender primero todos los procesos en que se relacionan la materia y la radiación para poder producir detectores eficaces.

El principio básico de un detector centellador es convertir la longitud de onda de un rayo gamma en la longitud de onda de un fotón en la región del visible; para posteriormente transformar esa señal óptica en señal electrónica utilizando un fotomultiplicador (PMT, por sus siglas en inglés). Midiendo la respuesta del PMT se puede concluir indirectamente la cantidad de rayos gamma que entraron al detector. Actualmente estos detectores se construyen con cristales centelladores o materiales de estado sólido. En este trabajo sólo se estudiarán los detectores centelladores.

Los detectores de rayos gamma se aprovechan para producir imágenes utilizando métodos matemáticos avanzados y software especializado. Los cristales centelladores son principalmente usados para diagnósticos médicos como en el PET (Positron Emission Tomography) y la CT (Computer Tomography). La técnica de reconstrucción de imágenes se logra calculando el tiempo y la dirección de un fotón (o un par de ellos) que resulta distintas interacciones con el tejido.

## 4.2 Etapas del proceso de detección.

El proceso de medición de rayos gamma con detectores de centelleo consta de tres etapas principales: (1) Absorción de la energía ionizante, (2) transferencia de la energía absorbida y (3) emisión [2].

### 4.2.1 Absorción de la energía ionizante.

En esta primera etapa, los fotones de alta energía inciden en el detector e interactúan con los átomos del cristal produciendo una gran cantidad de defectos, entre ellos pares electrón-hueco primarios. Luego de esta creación, la energía de los fotones incidentes se disipa; es decir, ocurre una relajación del par e-h primario. Durante la relajación explica Rodnyi [21], un electrón primario puede ionizar un átomo A dejándolo excitado y liberando otro electrón, así:



En principio el electrón incidente y el liberado son indistinguibles. La relajación de hueco puede suceder de manera radiativa, cuando un átomo ionizado emite un fotón:



o de manera no radiativa generando un electrón secundario mediante un efecto Auger:



Durante el proceso de relajación, la energía del fotón inicial absorbido se va dividiendo entre todas las interacciones que tienen lugar, mas la energía no se pierde. Esta transformación da lugar a la creación de pares e-h secundarios y fotones de baja energía

que ya no son capaces de producir ionización. Dependiendo de la energía del fotón inicial, el proceso de relajación tiene una duración de  $10^{-13}$  a  $10^{-15}$  segundos [21]. La pérdida de energía durante el proceso de detección ocurre cuando: un electrón o fotón escapa del cristal, se crea un defecto en el material, se producen fonones o sucede una fosforescencia (emisión retardada de luz).

Los pares electron-hueco que no alcanzan el umbral de energía de ionización empiezan a interactuar con las vibraciones intrínsecas del material centellador; los electrones se mueven en la parte inferior de la banda de conducción, mientras que los huecos se sitúan en la parte superior de la banda de valencia. En consecuencia en esa sub-etapa la energía, tanto del electrón como del hueco, es igual a la energía prohibida  $E_g$  de los átomos del cristal. Este proceso se le conoce como relajación electrón-fonón o termalización y sucede aproximadamente en un lapso de  $10^{-11}$  a  $10^{-12}$  segundos [21].

El número de pares electrón-hueco secundarios por fotón incidente,  $N_{e-h}$ , no varía durante el proceso de termalización, por lo que determina la eficiencia de la primera etapa de detección. De esta manera,

$$N_{e-h} = \frac{E_\gamma}{\xi_{e-h}} \quad (4.4)$$

donde  $E_\gamma$  representa la energía del fotón gamma absorbido y  $\xi_{e-h}$  es la energía que se requiere para crear un par e-h secundario. En promedio  $\xi_{e-h}=2.3E_g$  [9].

Un cristal centellador se considera un mejor detector en lo que concierne a la primera etapa mientras mayor sea el número de electrones secundarios generados por fotón incidente,  $N_{e-h}$ . Se sabe que este número es inversamente proporcional a  $E_g$  [1]. Además para obtener una mayor eficiencia en esta etapa, se requiere que el material tenga número atómico y densidad altos debido a que la probabilidad de que ocurra una interacción con rayos gamma aumenta. De manera similar, se deben de cubrir las características necesarias para que el detector presente una sección eficaz grande para cualquier partícula incidente que se requiera medir.

### 4.2.2 *Transferencia de la energía absorbida.*

Los centros luminiscentes son átomos fácilmente excitables mediante la captura de un par e-h que al desexcitarse producen fotones visibles. La segunda etapa de detección es un proceso donde los pares electrón-hueco secundarios transfieren su energía al excitar un centro luminiscente  $A^+$ ; de este modo:



Los cristales centelladores se dopan con ciertos elementos, principalmente iones de tierras raras, para que actúen como centros luminiscentes y aumente la eficiencia de detección.

Si el electrón-hueco se encuentra cercano a un centro luminiscente, la probabilidad de que suceda una excitación es muy grande. Por el contrario, el par e-h puede ser capturado por alguna trampa o defecto del material. Por ejemplo, la vacancia de un ión negativo en la red representa una trampa para electrones excluyéndolos definitivamente del proceso de detección, generando los defectos llamados centros F (electrón unido a la vacancia). También existen impurezas en el cristal cuyo potencial no es muy grande, por lo que el electrón o hueco capturado puede ser emitido térmicamente después de cierto tiempo. Este defecto sólo hace más lento el proceso de detección.

De acuerdo con Rodnyi [21], es altamente probable que un hueco que se encuentra en la parte superior de la banda de valencia interactúe con un anión cercano; en este caso el hueco será compartido por los dos aniones vecinos formando un centro llamado  $V_k$ . Los centros  $V_k$  son estables sólo a temperaturas menores a 200 K. En este estado, al hueco se le denomina “*self-trapped hole*” o agujero autoatrapado (STH). Los STHs se forman en un tiempo promedio de  $10^{-11}$  a  $10^{-12}$  segundos, es decir, mucho más rápido que la vida media de un par e-h; por lo que la mayoría de los huecos en un cristal detector constituyen centros  $V_k$ . La creación de centros  $V_k$  es muy importante, ya que incluso cristales sin centros luminiscentes pueden presentar luminiscencia por medio de las propiedades de estos

defectos. Esta etapa de detección se caracteriza por la eficiencia de transferencia  $S$  y depende de las impurezas que presenta el cristal.

### 4.2.3 Emisión.

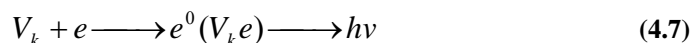
Como se mencionó, los centros luminiscentes excitados se recombinan con otros electrones-hueco dando lugar a la emisión de fotones visibles, así:



A temperatura ambiente los centros  $V_k$  se mueven y pueden también formar parte del proceso de recombinación. Este tipo de luminiscencia se llama luminiscencia extrínseca.

Para mejorar la eficiencia de los detectores en esta etapa, se busca que los centros luminiscentes tengan una probabilidad alta de transiciones radiativas. La curva total de energía en función a la posición de los átomos del estado excitado no debe tener ningún punto de intersección con la curva total de energía del estado base, ya que las vibraciones propias del cristal pueden ocasionar la desexcitación del átomo sin que exista la emisión de un fotón (proceso denominado *quenching* del centelleo) [5].

En la luminiscencia intrínseca no es necesario que exista un centro luminiscente. Sucede cuando un electrón libre es capturado por un centro  $V_k$  dando lugar a un “*self-trapped exciton*” (STE). Un STE,  $e^0$ , con una configuración  $(V_k e)$  emite un fotón visible.



Después de la emisión el centro  $V_k$  desaparece [21]. Este tipo de luminiscencia les acontece por ejemplo a los compuestos haluros alcalinos puros (como el NaI, CsI, etc.).

La última etapa de centelleo se caracteriza por la eficiencia cuántica  $q$ . Esta es una característica propia de la naturaleza del centro luminiscente, por ejemplo sus curvas totales de energía.

El material del detector debe ser transparente a los fotones visibles, para que así, estos logren viajar y llegar a un fotomultiplicador donde se hará la medición. Por eso, aunque en la primera etapa de detección se busca que la energía prohibida  $E_g$  sea lo más pequeña posible, ésta no debe tener una frecuencia asociada en la escala del rango visible pues entonces los fotones producidos serían absorbidos por el compuesto. Al incidir en un PMT, el fotón libera un electrón. Un voltaje es aplicado dentro del fotomultiplicador por lo que el electrón es acelerado y en su trayectoria puede colisionar con otro electrón creando un efecto avalancha. La corriente medida es proporcional al número de electrones producidos por el PMT, es decir, es proporcional al número de fotones gamma que incidieron en el detector. El número de fotones visibles medidos es directamente proporcional al número de fotones de alta energía que incidieron en el detector.

La eficiencia total de un detector durante las tres etapas,  $\eta$ , está determinada según Blasse [7] por:

$$\eta = (1 - r) \frac{\langle hv_e \rangle}{\xi_{e-h}} Sq \quad (4.8)$$

$r$  es la cantidad de radiación incidente no absorbida,  $\langle hv_e \rangle$  es la energía media de los fotones emitidos,  $S$  es la eficiencia de transferencia del par e-h al centro luminiscente y  $q$  es la eficiencia cuántica del centro luminiscente. Si consideramos que toda la radiación incidente es absorbida, todos los pares e-h alcanzan el centro luminiscente ( $S=1$ ), la eficiencia cuántica es 100% y recordamos que  $\xi_{e-h} = \alpha E_g$ ; obtenemos la expresión:

$$\eta_{\max} = \frac{\langle hv_e \rangle}{\alpha E_g} \quad (4.9)$$

### 4.3 Características Generales de los Cristales Iónicos Centelladores.

Distintas áreas de la ciencia, como la Física de altas energías y el desarrollo del PET, requieren que los detectores de rayos gamma sean cada vez más eficaces y especializados. Para que un centellador sea eficiente debe cumplir con ciertas características básicas [21].

#### 4.3.1 Producción de Luz.

Es una de las propiedades más importantes. La producción de luz ( $L$ ) es el número de fotones emitidos ( $N_{ph}$ ) por unidad de energía absorbida (generalmente  $E_\gamma = 1 \text{ MeV}$ ) [9]. Conociendo la eficiencia total de las tres etapas de detección podemos deducir entonces que:

$$L = \frac{N_{ph}}{E_\gamma} = \frac{\eta}{\langle hv_e \rangle} \quad (4.10)$$

Por lo tanto,  $L$  se refiere a la eficiencia del cristal para convertir radiación ionizante a radiación visible.

#### 4.3.2 Rapidez.

La rapidez de un detector está determinada por distintas constantes del proceso de emisión y de transferencia. Las impurezas en el material y la temperatura provocan un retraso en la luminiscencia. Además, el tiempo de decaimiento es directamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda, en consecuencia, los detectores de rayos ultravioleta son más rápidos. Las constantes de decaimiento  $\tau_i$ , deben de ser pequeñas en detectores donde el ritmo de conteo es muy alto.

### **4.3.3 *Respuesta a la temperatura.***

La temperatura de operación del detector varía debido al entorno y a la radiación incidente que debe detectar. Esta inestabilidad afecta a la producción de luz. Asimismo la probabilidad de una transición no radiactiva en un centro luminiscente es función de la temperatura; en consecuencia la eficiencia cuántica también varía. A temperaturas bajas predominan las transiciones radiativas y  $q$  es casi constante [21].

### **4.3.4 *Fosforescencia.***

La luminiscencia retardada o fosforescencia se debe a la emisión térmica de electrones-hueco por los defectos del material después de cierto tiempo. Para los detectores de centelleo más convencionales, la fosforescencia sólo aumenta el tiempo de respuesta. En cambio, los detectores de imágenes, como una placa de rayos X, disminuyen su resolución a causa de los fotones fosforescentes de baja intensidad.

### **4.3.5 *Propiedades ópticas.***

Los índices de transmisión y refracción deben ser los adecuados para lograr una buena detección. La tercera etapa de detección es afectada si el material no es transparente en el rango visible, es decir, si los fotones emitidos no son transmitidos (ver 4.2.3). La transmisión depende de la concentración de impurezas del cristal, porque absorben los fotones visibles. Los elementos que constituyen el material y el proceso de crecimiento del cristal determinan el número de defectos en el centellador; los que generalmente no se encuentran distribuidos uniformemente.

El índice de refracción del cristal debe ser similar al índice de refracción del fotomultiplicador para evitar que parte de los fotones sean reflejados. Se coloca un compuesto de silicón entre las superficies del cristal y del PMT, ya que este material hace



que la transición entre distintos índices de refracción no sea tan brusca, minimizando así la reflexión. Por otro lado para disminuir el tiempo de detección en centelladores, se recomienda que el índice de refracción sea pequeño. Los fotones recorren una mayor distancia debido a las repetidas reflexiones que sufren, en consecuencia tardan más en alcanzar el fotomultiplicador. El número de reflexiones es directamente proporcional al índice de refracción.

El máximo del espectro de la luz emitida por el centellador también debe coincidir con el máximo de la eficiencia cuántica del fotomultiplicador, es decir, alrededor de 280 a 500 nm. También existen otros fotosensores hechos de silicio que pueden sustituir a los PMT cuando se requiere. La eficiencia cuántica de estos sensores es máxima en el rango de 500 a 900 nm. Por otro lado, una emisión ultravioleta puede ser detectada por el fotomultiplicador si se le adapta un material especial que transforme la longitud de onda UV a visible.

#### ***4.3.6 Dureza a la radiación.***

La máxima dosis absorbida por un centellador es un parámetro para determinar la dureza a la radiación. Los fotones ionizantes provocan daños relevantes en la estructura del cristal perjudicando principalmente a la transmisión. La dosis tolerada aumenta al disminuir el nivel de impurezas del cristal; es decir, disminuyendo la creación de centros  $V_k$ , mejorando las técnicas de crecimiento y purificando los elementos constituyentes del material. Generalmente se puede obtener cristales más puros si estos presentan un punto de fusión bajo. La dureza a la radiación también depende del tamaño del detector.

#### ***4.3.7 Densidad.***

Esta característica permite que la sección eficaz que presenta el cristal a los rayos gamma sea alta y la primera etapa de detección sea eficiente (ver 4.2.1). Además, una alta

densidad provoca una mayor absorción de energía por lo que los detectores de centelleo pueden tener tamaños más pequeños [8].

#### ***4.3.8 Propiedades químicas y mecánicas***

En muchas aplicaciones se requiere que los detectores sean resistentes y duros. En general se busca que los centelladores tengan una composición química estable y sean inertes en condiciones atmosféricas normales y bajo el efecto de la radiación. Existen materiales llamados hidrocópicos, como el NaI, que se ven afectados por la humedad del ambiente; estos deben producirse en ambientes muy secos y conservarse en recipientes al vacío.

Es preferible que los cristales puedan ser fabricados a gran escala para cumplir con las necesidades de grandes detectores utilizados en los aceleradores nucleares. Esto implica que puedan ser pulidos y cortados, no formen fisuras, tengan un coeficiente térmico pequeño y un módulo de Young grande, además de las características ya mencionadas.

#### ***4.3.9 Costo.***

También es muy importante tomar en cuenta el costo del material y de su producción. El material, la pureza, la técnica de crecimiento y la energía necesaria en el proceso de producción determinarán si el material será fabricado.