

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

**DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURA DE LA MATERIA, FÍSICA TÉRMICA
Y ELECTRÓNICA**



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Código TFG: ETE12

Instrumentación Nuclear

Nuclear Instrumentation

José Manuel Udías Moinelo / Luis Mario Fraile Prieto

ANXO RODRÍGUEZ ÁLVAREZ

Grado en Física

Curso académico 2019-20

Convocatoria ordinaria

Instrumentación nuclear. Detectores Gamma.

Resumen:

La radiación gamma es una radiación electromagnética de carácter ionizante de muy alta frecuencia y gran poder de penetración. Así, se trata de una radiación de extremada peligrosidad para el hombre, quien ha recurrido a la física nuclear para construir aquellos dispositivos capaces de detectarla, medirla y, además, sacar una utilidad de ella.

El desarrollo de los detectores γ pasa ineludiblemente por el profundo conocimiento del modo en que estos rayos interaccionan con la materia a través del efecto fotoeléctrico, Compton y la creación de pares. Entendiendo las relaciones que se dan entre los fotones gamma y los distintos materiales, pueden seleccionarse aquellos más afines a este tipo de radiación, y generar el ambiente propicio para su absorción y posterior medida.

El desarrollo de fiables y seguros detectores se ha traducido en una mayor protección del ser humano y en una mejora de las técnicas médicas para el diagnóstico de enfermedades.

Abstract:

Gamma radiation is an electromagnetic ionizing radiation with a very high frequency and penetrating power. Thus, it is an extremely dangerous radiation for the man, who has resorted to nuclear physics to build those devices capable of detecting, measuring, and, in addition, taking advantage of it.

The development of γ detectors inevitably goes through the deep knowledge of the way in which these rays interact with matter, through the photoelectric, Compton and creation of pairs effects. Understanding the relationships that occur between the gamma photons and the different materials, those substances closest to this type of radiation can be selected, and the environment conducive to their absorption and subsequent measurement can be generated.

The development of reliable and safe detectors has resulted in greater protection of the human and also in an improvement in medical techniques for diseases diagnosing.

Índice

1.	Introducción	4
2.	Objetivos	4
3.	Metodología	5
4.	Radiación Gamma	6
4.1	Características	6
4.2	Interacción de la radiación gamma con la materia	7
4.2.1	Efecto fotoeléctrico	8
4.2.2	Efecto Compton.....	8
4.2.3	Creación de pares.....	9
5.	Detectores Gamma	11
5.1	Detectores Gaseosos.....	11
5.1.1	Cámara de ionización	11
5.1.2	Contador proporcional	11
5.1.3	Detector Geiger-Müller	12
5.2	Detectores sólidos.....	12
5.2.1	Detector de centelleo.....	13
5.2.2	Detectores semiconductores	16
6.	Usos y aplicaciones de los detectores.....	18
7.	Conclusiones.....	19
8.	Bibliografía.....	20

1. Introducción

La Sociedad Nuclear Española (SNE), define el sistema de instrumentación nuclear como “el conjunto de elementos interrelacionados dedicados a la captura de las magnitudes físicas aportadas por los instrumentos de medida de un reactor nuclear y a su transmisión a la unidad central de procesamiento para la generación de las señales de información, mando, protección y regulación”.

Así, el buen profesional físico será aquel que conozca de las teorías físicas, tan bien como de los instrumentos para la medición y posterior interpretación de las señales nucleares.

La física nuclear encuentra a su paso un creciente número de aplicaciones y son estas a su vez de una mayor sofisticación. Ejemplo de ello es el uso de esta disciplina en los sistemas de imagen para el diagnóstico médico o los sensores remotos para el control de la calidad ambiental, para los que se requiere instrumentación nuclear avanzada, de alta precisión, calidad y fiabilidad. En este sentido, y de acuerdo con lo publicado por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés), “el uso seguro y eficaz de las técnicas nucleares requiere instrumentación fiable para llevar a cabo las actividades de medición, diagnóstico y control”.

La detección y posterior medida de la radiación requiere, en primer lugar, de un conocimiento básico de los procesos fundamentales que ocurren cuando aquella atraviesa la materia. Estos procesos son la base de todos los sistemas de detección de partículas y al mismo tiempo determinan cuál ha de ser el detector idóneo para cada caso particular, así como la sensibilidad y eficiencia esperada. A este respecto, sabiendo que la radiación gamma interactúa con la materia por medio de los efectos fotoeléctrico, Compton y creación de pares, es posible estudiar los diferentes materiales y seleccionar entre todos ellos el más conveniente para la detección de la radiación, induciendo las óptimas condiciones para cada material.

La detección y control de la radiación se vuelve especialmente relevante cuando, más allá de fines docentes o investigadores, encuentra aplicaciones en sectores tan importantes como es el médico, o el de seguridad ambiental.

2. Objetivos

El presente proyecto pretende acercar a lector a una de las familias más relevantes en el campo de la física nuclear, los detectores gamma.

Tras una breve presentación de la radiación gamma, exhibiendo sus rasgos más característicos, las claves de su comportamiento y otros factores que se consideraban interesantes para el mejor entendimiento del proyecto, se aborda de un modo más extenso y detallado el tema principal del trabajo: los detectores gamma. De este modo, el objetivo central del proyecto ha sido esclarecer qué son los detectores de

radiación gamma, qué tipos existen, cómo funciona cada uno de ellos, y cuáles son los principales usos y aplicaciones a los que están destinados.

Dentro del amplio campo de la instrumentación nuclear se ha optado por estrechar el círculo sobre los detectores gamma, dotando así al trabajo de una mayor profundidad y tecnicismo, tratando de sumergir al interesado en el interesante área de los detectores nucleares.

Así, no ha existido pretensión distinta en la redacción del presente Trabajo de Fin de Carrera que la de recopilar y concentrar la información preexistente sobre la materia, con el fin de nutrir el interés de los ya curiosos, o despertarlo en quienes no se encontraran aun en dicha posición, tratando de conferir una visión transversal a un tema que, cada vez más, encuentra aplicaciones prácticas en múltiples ámbitos de la vida cotidiana.

Por último, no debe obviarse el objetivo académico por el cual se ha efectuado el presente trabajo con el que se ha tratado de profundizar en un tema íntimamente relacionado con diversos aspectos de la carrera, aplicando los conocimientos obtenidos a lo largo de la misma, a fin de completar con éxito el Grado de Física.

3. Metodología

Por tratarse de un proyecto de revisión bibliográfica, la metodología empleada para la realización del presente Trabajo de Fin de Grado ha sido la búsqueda, recopilación y análisis crítico de información relevante, relativa a la instrumentación nuclear en general, y a los detectores de radiación gamma en particular. Para ello se ha recurrido a la lectura y análisis exhaustivos de proyectos de investigación, sitios webs oficiales de Institutos Nacionales de referencia en la física nuclear, libros, tesis doctorales, y otras diversas fuentes.

De este modo, en el apartado de bibliografía recogido en el último apéndice del trabajo, pueden encontrarse algunas de las publicaciones que más han influido en la redacción del texto, a pesar de que, gracias a la gran actualidad del tema, existe un amplio abanico de información de calidad a disposición de los interesados, tanto en plataformas virtuales, como en importantes libros sobre la materia.

Para la redacción del texto propiamente dicha, se ha optado por estructurarlo en apéndices tal y como se exponen en el índice, tratando de guiar al lector desde una perspectiva más amplia hacia el tema específico a estudiar; empleando para ello la antesala de los rayos gamma, a los cuales se ha querido dedicar una parte importante del trabajo por considerar su manejo imprescindible para la correcta comprensión del núcleo del texto. Se ha recogido igualmente en la parte final del proyecto, un apéndice denominado “conclusiones” en el que se exponen los conceptos más importantes y que mejor exhiben la esencia y contenido del texto académico.

4. Radiación Gamma

Los rayos Gamma (γ) son radiaciones electromagnéticas derivadas de la desintegración radiactiva de núcleos atómicos. Como radiación de energía del campo electromagnético (radiación electromagnética), se trata de un fenómeno de comportamiento dual, esto es, corpuscular y ondulatorio.

Pertenecen los rayos γ a la familia de radiaciones ionizantes y, como tal, corresponden a la radiación de muy alta frecuencia, por lo que son capaces de penetrar profundamente en la materia sobre la que inciden. De este modo, es lógico entender el grave peligro que supone esta radiación para los seres vivos expuestos, siendo capaz de atravesar con facilidad los tejidos y, además, de interactuar con el material celular. Sin embargo, y gracias al desarrollo de la instrumentación apropiada, el hombre es capaz de detectar este tipo de radiación, y controlarla con precisión para sacar utilidad de ella. De este modo, en la actualidad es empleada, entre otras muchas aplicaciones, para la esterilización de alimentos o en equipos de diagnóstico médico.

Los rayos gamma pueden encontrarse en la Tierra en fuentes naturales procedentes de la desintegración de los radionucleidos, de las interacciones de los rayos cósmicos con la atmósfera o, aunque menos frecuentemente, también de las tormentas eléctricas. Asimismo, se han detectado explosiones de rayos gamma en el espacio, resultado de eventos astrofísicos de gran violencia, como la explosión de estrellas masivas para su conversión en agujeros negros o en magnetares. No obstante, estos fenómenos están todavía por esclarecerse de un modo más concreto puesto que su fugacidad ha dificultado hasta el momento, con una instrumentación actual de pobre resolución angular, detectar el motor causante de la explosión.

4.1 Características

Las ondas electromagnéticas se caracterizan en función de tres parámetros fundamentales: la frecuencia, la longitud de onda y la polarización. Así, los rayos gamma presentan una frecuencia superior a 10^{20} Hz (con lo que su energía rebasa los 100keV); una longitud de onda inferior a 3×10^{-13} m (considerablemente menor al diámetro atómico); y, una polarización variable dependiendo del medio en que se propague la onda.

Igualmente, los rayos gamma se caracterizan por ser considerablemente más penetrantes que la radiación resultante de otras formas de desintegración radiactiva. Las partículas de radiación alfa (α), por ejemplo, exhiben un corto radio de acción, puesto que son partículas cargadas positivamente que, aunque muy energéticas, son tan pesadas que consumen su energía en las cortas distancias. Las partículas típicas de la radiación beta (β), en cambio, son partículas cargadas negativamente, pequeñas y veloces, fácilmente detenidas por materiales comunes presentados en capas delgadas.

En cuanto a su comportamiento como radiación electromagnética ionizante, cabe diferenciar la radiación γ de la radiación X. Así, ambas radiaciones divergen directamente desde el origen: los rayos gamma se producen por transiciones subatómicas, mientras que los rayos X se producen por transiciones de energía extranucleares. Es lógico entender entonces que, sabiendo que algunas transiciones electrónicas pueden superar las energías de algunas transiciones nucleares, la frecuencia de los rayos X más energéticos podrá superar la de los rayos gamma más débiles.

4.2 Interacción de la radiación gamma con la materia

Como se ha introducido en el apartado anterior, antes de perder por completo su energía, las partículas gamma pueden atravesar cierto grosor de materia. Así, por norma general, este espesor es medido en distintas unidades en función de la fuerza específica de cada radiación para incidir sobre los cuerpos sólidos, determinándose así cuáles son las unidades más adecuadas para medir cada tipo de radiación, como son: metros para los neutrones; centímetros para los rayos gamma; milímetros para los rayos β ; y centésimas de milímetro para los rayos α .

Haciéndose eco del poder de penetración de estos rayos, la instrumentación nuclear ha logrado direccionarlos hacia dispositivos capaces de detectarlos. Así, en función de la sensibilidad del dispositivo, pueden incluso llegar a contabilizarse corrientes de partículas individuales, midiendo y estudiando de este modo las transformaciones que pueden sufrir cantidades ínfimas de materia.

Los rayos incidentes sobre la materia van perdiendo energía al atravesar cualquier medio debido a la interacción entre éstos y los electrones o núcleos atómicos. Así, cuando se trata de partículas con carga, una parte relevante de la energía se pierde al ionizar los átomos contenidos en la materia a atravesar. Es interesante recordar que, como es bien sabido, la energía de la radiación electromagnética se expresa en forma de:

$$E = h\nu$$

donde h es la constante de Planck y ν la frecuencia de los fotones incidentes. Cabe entonces entender que cuando se trata de un único tipo de radiación, la energía precisada para producir un par de iones dependerá únicamente del cuerpo a atravesar.

En cualquier caso, por ser los rayos gamma los que resultan de interés para el trabajo, nos centraremos únicamente en la interacción de estos con la materia. Por norma general, la interacción directa, radiación-cuerpo, da lugar a la liberación de electrones secundarios, quienes producen la subsiguiente ionización. Así, la primera interacción directa se efectuará por cualquiera de los tres procesos siguientes, explicados más detalladamente a continuación: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la creación

de pares. La energía de la radiación incidente resulta determinante para que, según el caso, sea uno u otro efecto el dominante.

4.2.1 Efecto fotoeléctrico

Los fotones de energía más baja interactúan con la materia por medio del efecto fotoeléctrico, en el cual un haz de radiación gamma incidente de frecuencia suficientemente elevada interacciona con un electrón de las capas internas del átomo del material atravesado. Así, la energía del fotón incidente es completamente cedida al electrón ligado al átomo, el cual resulta expulsado del mismo en forma de fotoelectrón con una energía cinética resultante igual a la diferencia entre la energía de la radiación incidente y el potencial de ionización del átomo, esto es:

$$T = E_y - W = h\nu - W$$

Donde W es el potencial de ionización requerido para liberar el electrón, es decir, su energía de ligadura al átomo. Cabe entender que dicha energía de ligadura del electrón será mayor cuanto más profunda sea la capa en que éste se encuentre y más pesado sea el elemento. De este modo, elementos de peso medio y ligero, se asocian con una energía de ligadura de los electrones al átomo insignificante en relación con la energía que portan los rayos. Este mecanismo depende entonces directamente del número atómico Z del material, de tal modo que cuanto mayor sea éste, mayor será también su absorción.

4.2.2 Efecto Compton

En este caso, el fotón incidente cede únicamente parte de su energía (E_y) al electrón con el que colisiona, resultando en otro fotón γ de menor energía ($E_{y'}$) y frecuencia que es, además, despedido con una desviación ϕ de su trayectoria original. La interacción fotón-electrón viene dada por las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, de modo que la energía obtenida por el electrón vendrá determinada por la diferencia energética existente entre ambos fotones:

$$T = E_y - E_{y'} = h\nu - h\nu'$$

Y, en cualquier caso, oscilará de manera continua entre 0 y un valor máximo que se acerca a:

$$E_{m\acute{a}x} = \frac{4 E_y^2}{1 + 4E_y}$$

Para átomos de gran número atómico, los fotones resultantes de la colisión pueden a su vez ser dispersados nuevamente al colisionar con otros electrones del átomo, provocando así una reacción en cadena.

4.2.3 Creación de pares

En este caso, igual que ocurría en el efecto fotoeléctrico, el fotón incidente cede completamente su energía. En la producción de pares se da una transformación de energía en materia conforme a la equivalencia de Einstein. En los alrededores de otra partícula el rayo gamma se materializa en un electrón y un positrón, verificándose la conservación de la cantidad de movimiento. Si esta partícula es un núcleo, no absorberá apenas energía, con lo que la energía del rayo γ será comunicada al electrón y al positrón, en forma de energía cinética y a partes iguales¹. Si, en cambio, la partícula es un electrón, éste tomará también parte de la energía residual.

Dado que las masas en reposo de electrón y positrón suman una energía de 1,02 MeV, es lógico entender que ésta será la energía mínima de radiación incidente requerida para que tenga lugar este efecto.

$$E_{\text{fotón}} = 1.022\text{MeV} = 2m_0c^2$$

La creación de pares va acompañada de la aniquilación electrón-positrón. Una vez creado el positrón, va perdiendo velocidad debido a la interacción que sufre en el átomo hasta encontrarse con un electrón en su mismo estado. En ese momento, se produce la colisión entre ambos, dando lugar a dos fotones de energías iguales (0.511 MeV) que salen despedidos en direcciones opuestas.

A modo de esquema aclaratorio se incorpora la Figura 1 en la que pueden apreciarse los tres efectos anteriormente descritos. La elección de este esquema responde al elevado contenido de información que recoge, resultando enormemente instructivo. En él es fácil comprender cómo en el efecto Compton no se comunica completamente la energía de la radiación gamma incidente, como sí ocurre en el efecto fotoeléctrico y en la producción de pares. Puede también deducirse la profundidad de las capas en que proceden los electrones con los que interaccionan los rayos gamma en el efecto fotoeléctrico y Compton, mientras que en la creación de pares no se da esta interacción, sino que se produce una interacción eléctrica en el núcleo, con la consiguiente transformación del rayo en materia.

¹ Se comunicará aquella energía que exceda de la mínima requerida para que la creación de pares tenga lugar, esto es, 1,02 MeV.

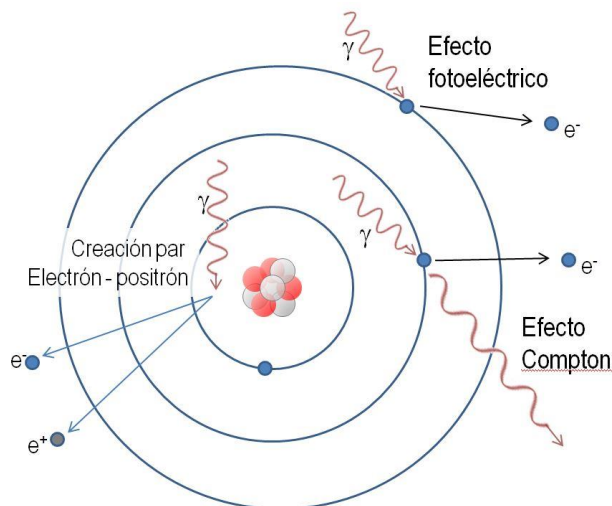


Figura 1. Interacción de la radiación gamma con la materia. Efectos fotoeléctrico, Compton y Creación de pares electrón-positrón. (El blog sobre ciencia del profesor McManus, 2003).

La absorción de la radiación gamma en la materia se realiza en virtud de los tres efectos descritos anteriormente. La magnitud de cada uno de los tres efectos en el proceso final dependerá de la energía de la radiación incidente, así como del número atómico Z del cuerpo atravesado. Es sensato entonces desintegrar el coeficiente de absorción total en la suma de los coeficientes de absorción lineal por efecto Compton (σ), por efecto fotoeléctrico (τ), y por creación de pares (K), según:

$$\mu = \sigma + \tau + K$$

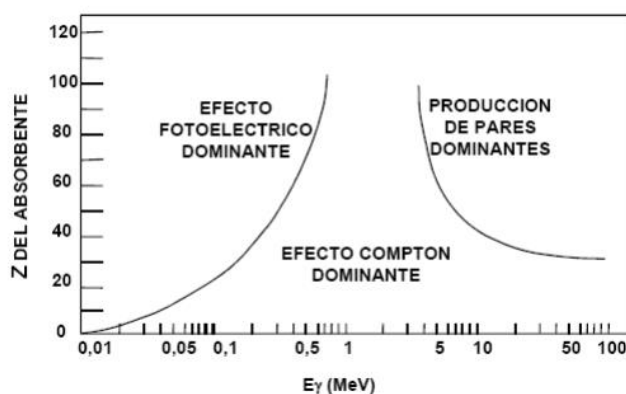


Figura 2. Dominancia de cada mecanismo de interacción según la energía incidente y el número atómico. Sánchez, A. (2011)

5. Detectores Gamma

Los detectores gamma son los instrumentos con los que medir la energía de un haz de radiación gamma incidente. Basándose en el conocimiento de la interacción de los rayos gamma con la materia, se dirige el haz incidente sobre un material conocido y estandarizado, y se procede a leer e interpretar los datos recogidos.

La clasificación de los detectores gamma para el presente trabajo se realizará distinguiendo entre dos grandes familias: los detectores gaseosos, y los detectores sólidos.

5.1 Detectores Gaseosos

La cámara de ionización, el contador proporcional y el detector Geiger-Müller son los principales detectores cuyo fundamento se basa en la lectura de la ionización derivada del paso de la radiación gamma a través de un gas comprendido entre dos electrodos entre los que existe una diferencia potencial.

Por la baja eficiencia que presentan para muchas radiaciones de interés en física nuclear, así como por la existencia de eficientes alternativas, apenas son utilizados. Nótese que mientras los detectores sólidos presentan altas densidades que permiten probabilidades de absorción razonables en detectores de tamaño normal, esto se convierte en una ardua tarea para los detectores gaseosos, puesto que el alcance de un rayo gamma de 1 MeV en el aire es próximo a los 100m.

5.1.1 Cámara de ionización

Puede entenderse como un condensador plano-paralelo donde el espacio entre los planos está ocupado por aire. El campo eléctrico generado evita que los iones se recombinen con los electrones, quienes se dirigen hacia el cátodo al tiempo que los cationes se dirigen hacia el ánodo.

La amplitud de la señal emitida por la cámara es directamente proporcional a la cantidad de iones generados y a la energía de la radiación incidente. Sin embargo, la capacidad para crear iones en una cámara de tamaño mediano es muy reducida ($8.9 \cdot 10^{-12} \text{F}$), por lo que el voltaje de pulso resultante deberá amplificarse antes de poder ser analizado.

No obstante, aunque la capacidad para generar iones no dependa del voltaje aplicado, sí lo hace la velocidad de deriva en el seno de la cámara. Así, la cámara de ionización resulta demasiado lenta en comparación con otros detectores, por lo que su uso ha quedado relegado a la monitorización de la radiación.

5.1.2 Contador proporcional

El fundamento del contador proporcional gira en torno a aumentar el voltaje aplicado en medida suficiente para lograr un campo eléctrico que permita la aceleración de los electrones en tanto en cuanto

puedan dar lugar a ionizaciones secundarias. Los electrones secundarios darán lugar a nuevas ionizaciones, y estas a su vez, a otras nuevas, en una cascada de ionizaciones. Como se verá, a diferencia de lo ocurrido en Geiger-Müller, el número de ionizaciones en la cámara es proporcional al número de sucesos primarios.

El factor limitante en el uso de estos detectores vuelve a ser el tiempo. La señal de respuesta del contador proporcional proviene fundamentalmente de la avalancha electrónica, la cual tiene lugar en una pequeña región de la cámara, la más próxima al ánodo. Sin embargo, la gran mayoría de los electrones son creados en otras áreas del habitáculo y deben trasladarse desde su lugar de nacimiento hasta los alrededores del ánodo generando un tiempo de respuesta poco competitivo.

5.1.3 Detector Geiger-Müller

También conocido como tubo Geiger, este detector no es más que un sencillo contador de flujo en el que cada pulso es registrado por un sistema de conteo. Su funcionamiento se basa en la producción de pulsos electrónicos a través de la generación de las conocidas avalanchas de Townsend. El paso de la radiación a través del tubo supone, igual que en los casos anteriores, la ionización del gas del detector, produciendo pares electrón-catión que son desplazados hacia los electrodos ubicados en los extremos del tubo y entre los que se establece una diferencia potencial.

La problemática de estos detectores radica en que pueden generarse avalanchas a lo largo de todo el tubo Geiger procedentes de los fotones emitidos en la avalancha primera, los cuales suelen distanciarse de ésta, amplificando el proceso a lo largo de todo el tubo. La cadena de avalanchas concluye cuando los cationes han alcanzado el ánodo y son neutralizados (aproximadamente en 10^{-4} - 10^{-3} s). Esta propagación de la ionización por todo el tubo conduce a una baja eficiencia² (inferior incluso al 1%) del detector, que resulta incapaz de medir la energía de la radiación original, así como de discriminar entre diferentes tipos de radiación, con lo que tampoco genera información espectral. Por todo ello, en la práctica su utilidad se reduce al conteo de pulsos.

No obstante, para controlar las avalanchas, a menudo se recurre a la mezcla del gas del detector con un “*quenching gas*” o gas de extinción, de naturaleza orgánica.

5.2 Detectores sólidos

Los detectores de radiación gamma de naturaleza sólida son los típicamente empleados en el laboratorio, pues resultan mucho más eficientes y eficaces que los anteriormente descritos. Así, el detector de

² Se entiende la eficiencia de un detector como la probabilidad de detectar un fotón que lo atraviese.

centelleo y los detectores de semiconductor constituyen los instrumentos más populares en la detección y medición de rayos γ .

Los detectores sólidos deben cumplir un exigente doble requisito: por un lado, el material empleado para la detección deberá soportar un gran campo eléctrico que permita recoger un potente flujo electrónico, pero que, en ausencia de radiación, este flujo sea inapreciable; por otro, los electrones deberán ser arrancados con facilidad al paso de la radiación, y deberán viajar fácil y rápidamente a través del material sólido.

5.2.1 Detector de centelleo

El centelleador no es más que un detector de radiación gamma basado en la espectrometría. Los fotones de radiación gamma incidentes interaccionan con el material luminiscente contenido en el detector liberando nuevos fotones luminosos que son dirigidos al fotomultiplicador; allí se emite una señal eléctrica que es leída y traducida por un ordenador. Consta así de dos órganos fundamentales que son la sustancia luminiscente, y el tubo fotomultiplicador (o fotocélula); ambos ubicados en el seno de un cilindro opaco a la luz natural, pero permeable a la radiación.

En el seno del centelleador tiene lugar un complejo proceso dependiente de la energía de la radiación incidente, así como de la existencia de otras radiaciones en la muestra; del material del detector; su tamaño; los materiales que intervienen en el blindaje; y, por supuesto, del tipo de detector.

5.2.1.1 Factores de los que depende la reacción en el centelleador

5.2.1.1.1 Material de detector

Es lógico comprender que el material del propio centelleador, donde ocurren las interacciones entre los fotones incidentes y los radionucleidos de la muestra, constituye la parte más importante de los detectores de centelleo. De este modo, la selección del material más apropiado constituye un factor determinante para la lectura de la muestra, así como para la obtención de datos fiables. La elección del mejor centelleador estará principalmente fundada en su número atómico, el volumen de detección y la transparencia luminosa.

Así, si bien existen centelleadores sintetizados a partir de materiales orgánicos e inorgánicos, lo más habitual es el uso de sólidos de cristal inorgánico (NaI), puesto que generan una importante cantidad de luz de salida y tienen una respuesta lineal, aunque más lenta que los centelleadores orgánicos.

5.2.1.1.2 Tamaño

El tamaño del detector resulta de gran importancia en cuanto a que es determinante de la cantidad y tiempo en que la energía es recogida. Así, se distinguen los detectores de tamaño grande, mediano y pequeño.

En los detectores grandes la radiación γ que alcanza el detector es completamente recogida, aunque no instantáneamente. Previa pérdida total de la energía, tienen lugar una serie de procesos, prácticamente fugaces, que concluyen con la generación de fotones de luz en el espectro visible que se dirigen al fotomultiplicador.

En los detectores medianos, en cambio, la energía de los fotones resultante no coincide exactamente con la energía gamma incidente, puesto que algunos de los rayos escapan del centelleador. Igual que ocurría anteriormente, el haz de radiación gamma incide sobre el material detector, pero ahora el proceso se ha ralentizado con lo que parte de la radiación gamma que se genera fruto las interacciones gamma-detector (Compton y aniquilación de pares, dependiendo de si $E > 1.022\text{MeV}$), pueden escapar del centelleador con la pérdida energética que ello supone. Son los más comúnmente empleados en el laboratorio.

Por último, en los detectores pequeños existe ya una probabilidad considerable de que los fotones generados escapen del detector, con la consiguiente pérdida energética, creando un espectro muy diferente a los anteriores.

5.2.1.1.3 Blindaje

Los materiales del detector afectan notablemente a la detección de la radiación incidente, de modo que dada la gran capacidad de penetración de los rayos γ , es lógico prever que se precisará para su apropiada detección, de materiales de mayor espesor que los requeridos para partículas alfa o beta.

Los materiales de protección se comparan atendiendo al espesor necesario para reducir a la mitad la radiación incidente, por lo que parece lógico entonces que se requieran mayores grosores de blindaje para mayores energías.

El material de blindaje adquiere una importancia capital en cuanto a protección se refiere, pues como se ha comentado anteriormente, los rayos gamma pueden atravesar los tejidos e interactuar con el ADN produciendo mutaciones genéticas o cáncer, entre otras manifestaciones. La protección será de extrema importancia no sólo en los reactores, si no también durante el almacenamiento y transporte.

5.2.1.1.4 Generación de rayos X

Cuando el haz incidente es poco energético (keV), aparece en el espectro un pico que expresa la generación de rayos X. Esto se debe a que los materiales que envuelven al detector son ionizados al recibir la radiación gamma dejando vacantes en los niveles electrónicos inferiores, las cuales son ocupadas por electrones de capas superiores que emiten rayos X ligados a la diferencia energética electrónica.

5.2.1.2 Órganos del centelleador: la sustancia luminiscente y el fotomultiplicador.

Como se ha comentado anteriormente, estructuralmente el centelleador es un dispositivo sencillo, que consta únicamente de dos elementos clave que se detallan a continuación: la sustancia luminiscente y el fotomultiplicador.

5.2.1.2.1 Sustancia luminiscente

La cualidad más fundamental de la sustancia luminiscente será su eficiencia en la absorción de la energía procedente de la radiación incidente, así como su capacidad de conversión de dicha energía absorbida en una señal luminosa. Dado el potente poder de penetración de las partículas gamma, es lógico prever que se requerirán importantes espesores de sustancia luminiscente para poder absorber toda la radiación incidente. Será asimismo de gran importancia la transparencia de esta sustancia a la radiación luminosa generada, pues si no tuviese esta cualidad, el nuevo haz no podría alcanzar el fotomultiplicador y, consecuentemente, no se generaría una señal de salida cuantificable. Así, la sustancia luminiscente ideal sería aquella sustancia cristalizada en forma de monocristales del mayor tamaño y transparencia.

Sin embargo, es necesario controlar el haz de luz que emite el cristal luminiscente, evitando que la luz salga reflectada en todas las direcciones. Para ello, todas las caras del cristal se recubren de una capa, generalmente de óxido de magnesio, a excepción de una de ellas, la que queda enfrentada con el fotomultiplicador. El objetivo en este punto es el de dirigir el haz luminiscente hacia el tubo. Para ello, además, suele ubicarse una sustancia de índice de refracción elevado, entre el cristal luminiscente (concretamente, entre la cara descubierta del mismo) y el fotomultiplicador, de tal modo que la práctica totalidad de la luz generada en el interior del cristal salga despedida en la dirección requerida.

El fundamento del detector de centelleo consiste en que, las partículas excitadas tras el paso de la radiación emiten fotones luminosos durante su desexcitación. Así, esta desexcitación no ocurre instantáneamente, sino que se produce una caída gradual de la intensidad luminosa emitida por el cristal. Así, el tiempo en que tarda éste en perder toda su luminiscencia es también una característica interesante a tener en cuenta de esta sustancia. Por último, también la longitud de onda de la luz emitida por el cristal constituye una característica importante, puesto que, como es lógico, el mejor cristal será aquel que despidiera una longitud de onda para la cual la sensibilidad del fotomultiplicador sea máxima.

Por reunir un buen número de las cualidades exigidas a una grata sustancia luminiscente, es comúnmente empleado el yoduro de sodio activado con talio (NaI(Tl)) que permite la obtención de monocristales voluminosos (cerca de un litro) y logran la consecución de detectores de altas eficiencias (60%) cuando se acoplan con un buen fotomultiplicador. Ahora bien, por su elevada higroscopicidad, su manejo se torna complicado; deben almacenarse bañados en aceite y montarse en cápsulas herméticas transparentes que aíslen la sustancia, pero permitan la salida de la luz.

5.2.1.2.2 Fotomultiplicador

El funcionamiento del tubo fotomultiplicador puede resumirse brevemente con la siguiente afirmación: el material en contacto con el cristal de centelleo funciona como fotocátodo convirtiendo la luz recibida en electrones, los cuales son acelerados y multiplicados con el objeto de que se pueda obtener una señal eléctrica lo suficientemente alta como para que pueda ser manejada por amplificadores posteriores (Rangel, 2017, p33).

5.2.1.3 Alternativas: CLYC

En la búsqueda de detectores de neutrones alternativos al He-3, surge el $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$ (en adelante, CLYC), un nuevo detector que mostraba luminiscencia núcleo-valencia, lo que le habilitaba para detectar radiación gamma y de neutrones al mismo tiempo y, además, para discriminar el origen de los pulsos.

Aunque el tiempo de respuesta del detector era adecuado, continuaba siendo alto comparado con otros detectores de neutrones, pues para aplicaciones en que se utilice el dispositivo para detectar ambas radiaciones, el tiempo requerido será el tiempo de detección de los neutrones.

La curva de proporcionalidad del CLYC es mejor incluso que los centelleadores tradicionales, puesto que el efecto Compton se ve muy reducido en este tipo de detector, de modo que un mayor número de fotones ceden completamente su energía en el cristal. En otros términos, la eficiencia del detector se ha visto incrementada en este nuevo instrumento.

5.2.2 Detectores semiconductores

Para cumplir el primer requisito exigido a un detector sólido, redactado en la introducción del epígrafe de los detectores sólidos, parece que fuera necesario un material aislante. Sin embargo, si atendemos al segundo requisito, parecería más lógico apostar por un conductor. Así, en base a este conocimiento alcanzado con posterioridad al desarrollo de los centelleadores, surgen los materiales semiconductores³ (Germanio y Silicio) para la detección de radiación gamma.

El Germanio y el Silicio, por su condición de semiconductores, se expresan como materiales cristalinos capaces de controlar su conducción en función de la estructura química, la temperatura, la luz y la presencia de compuestos dopantes. Su conductividad eléctrica se sitúa a medio camino entre el conductor y el aislante. Es por todos conocido que la estructura de bandas de los semiconductores presenta una banda prohibida⁴ (en torno a 1eV) la cual, en presencia de radiación gamma, permite el arranque de un electrón de la capa de valencia a la banda de conducción (creación de un par electrón-hueco).

Para regular el tráfico electrónico a través de los semiconductores, se añaden lo que se conoce como compuestos dopantes. Los compuestos dopantes son elementos de valencia 3 o 5 (recuérdese que tanto el Germanio como el Silicio son valencia 4) de modo que:

³ La diferencia entre un aislante y un semiconductor radica en el menor tamaño del GAP de energía del semiconductor con respecto al aislante (1 eV / 5 eV).

⁴ Energía mínima necesaria para excitar al electrón lo suficiente como para participar del fenómeno de la conducción o, expresado de otro modo, la diferencia entre la banda de valencia y la banda de conducción.

- Serán semiconductores tipo-n aquellos que generen un exceso de cargas negativas, es decir, los de valencia 5. En este caso, cuatro de los cinco electrones de la capa de valencia se unirán covalentemente a los átomos de valencia del semiconductor; el quinto transitará libremente por la sustancia cristalina, formando un conjunto de estados discretos bajo la banda de conducción.
- En cambio, serán semiconductores tipo-p aquellos que, por el contrario, generen un exceso de vacantes, es decir, los compuestos dopantes de valencia 3. Los tres electrones de la capa de valencia se unirán covalentemente a otros tres átomos de valencia del semiconductor; el cuarto quedará vacante y generará, junto con los demás átomos en su misma situación, una cubierta de electrones aceptores sobre la capa de valencia.

Comprendido esto resulta sencillo entender el funcionamiento de un detector de semiconductor, el cual puede resumirse del siguiente modo: la radiación ionizante incide sobre el cristal semiconductor dando lugar a la ionización de sus átomos mediante la producción de pares de electrones. Así, los electrones de la capa de valencia emigran a las vacantes de la banda de conducción, dejando el mismo número de vacantes en la banda de origen en una reacción en cadena que resulta en un flujo electrónico a través del cristal.

La principal ventaja que presentan los semiconductores respecto a otros detectores de radiación gamma es que requieren de una energía incidente muy baja en relación con la demandada para el mismo efecto en detectores gaseosos (logrado tradicionalmente con la cámara de ionización, cuyo principio de funcionamiento es realmente muy similar a este tipo de detector). Asimismo, el tiempo requerido para leer la carga de un detector de semiconductor es del orden de 10-100ns, es decir, varios órdenes de magnitud menos que los detectores gaseosos.

Por poner la guinda, cabe reseñar que la resolución energética de los detectores de semiconductor es extraordinaria y, además, la altura del pulso del espectro es prácticamente constante.

5.2.2.3 Alternativas: criostatos y CZT

5.2.2.3.1 Criostatos

La principal ventaja que soportan los criostatos es que, por concepto, su función es mantener temperaturas muy bajas allá donde sea requerido. Se trata de dispositivos eléctricos a base, generalmente, de helio o nitrógeno gaseoso (el formato líquido no es válido puesto que requiere la renovación del fluido), que pueden transportarse con facilidad, habilitándolos para el trabajo de campo.

Suponen un gran avance respecto a los semiconductores de germanio que habitualmente requieren el uso de refrigerantes para el control de la conducción,

5.2.2.3.2 CZT

Los detectores CZT son resultado de la evolución de los cristales de CT (CdTe), a los que se incorporó Zinc con la intención de mejorar la amplitud de la banda de valencias. Así, este tipo de detectores de última generación, no sólo presentan una estupenda banda de valencia, sino que, además, no requiere ningún tipo de refrigeración. Ello se traduce en un menor coste económico (el nitrógeno líquido encarece los detectores de semiconductor tradicionales), al tiempo que dota de autonomía y compactación al detector, validándolo para el trabajo de campo. Además, los CZT presentan una mejor resolución intrínseca y de energías que sus homólogos semiconductores.

Debe comentarse que los nuevos detectores de germanio ultra puro (HGe) presentan una mejor resolución en energía que los CZT, lo cual puede ser determinante en algunas ocasiones, aunque bien es cierto que aquellos sí requieren de la refrigeración del detector.

6. Usos y aplicaciones de los detectores

Más allá de la investigación, existen muchos fines por los que resulta interesante el desarrollo de detectores de radiación gamma. Así, en España se ha establecido un Sistema de Redes de Vigilancia Radiológica cuya finalidad es vigilar y, cuando así se requiera, detectar la existencia de elementos radiactivos en el aire, suelo, alimentos, etc.

Sin embargo, es digno de mención que los detectores de radiación gamma han encontrado un importantísimo campo de aplicación en el sector sanitario. Una muy interesante, aunque actualmente poco desarrollada, aplicación médica es la gammagrafía, por la cual se inyectan radioisótopos en el cuerpo que se asocian al órgano diana y, con la ayuda de un detector, es posible la visualización del tejido.

La cámara gamma es, por ejemplo, uno de los instrumentos empleados en radiología e imagen nuclear para el diagnóstico. Consta de un cristal centelleador que permite, previa administración del radiofármaco, observar la distribución de éste por el organismo del paciente, a través de la conversión de los rayos gamma en haces luminosos cuando se introducen en el cristal. La sofisticación de la cámara permite la generación simultánea de varias imágenes.

La Tomografía por Emisión de Positrones (PET por sus siglas en inglés) es otro método empleado en imagen nuclear para el diagnóstico. Se basa igualmente en la interacción de los rayos gamma con la materia por el fenómeno de aniquilación de pares dado en el interior del paciente. Comparte el principio físico de funcionamiento con la cámara gamma. Es cierto que para lograr una buena resolución en la imagen se precisan millones de eventos coincidentes provenientes de diferentes ángulos del cuerpo donde se halla el radionúclido; estos eventos se estructuran de modo que se formen imágenes tridimensionales de cortes tomográficos axial, coronal y sagital.

7. Conclusiones

1. La radiación gamma es una radiación electromagnética de muy alta frecuencia y elevado poder de penetración.
2. El desarrollo de detectores fiables y precisos pasa por un profundo conocimiento de la interacción que se da entre la materia y la radiación.
3. Los rayos gamma interaccionan con la materia por medio del efecto fotoeléctrico, Compton y de aniquilación de pares.
4. Los detectores gamma que emplean sustancias gaseosas son poco eficientes y su uso se reduce en favor de los detectores sólidos.
5. El detector de centelleo es un tipo de detector sólido en el que la radiación incidente interacciona con el cristal inorgánico, generando un haz de luz que se dirige al fotomultiplicador para la posterior lectura de la señal de salida.
6. Los detectores de semiconductor aprovechan las bandas prohibidas y el tráfico electrónico entre las bandas de valencia y vacías para generar un haz luminoso medible, relacionado con la energía de la radiación incidente.
7. La física nuclear ha encontrado en la imagen para el diagnóstico un potencial campo de desarrollo con prometedores avances.

8. Bibliografía

Gnell F. Knoll (2000). *Radiation, Detection and Measurement*

Giler, D., & Gabriel, A. (2017). *Caracterización de los detectores Cherenkov de agua de LAGO-México mediante simulación, para la determinación del área efectiva de partículas secundarias generadas por un gamma primario de energías entre 200 GeV y 1.1 TeV*. Recuperado el 26 de 5 de 2020, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17304/1/cd-7798.pdf>

Kainka, B. (2011). *Fotodiodo para medir rayos gamma: detector de radiación con el BPW34*. Recuperado el 20 de 5 de 2020, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3630815>

Laá, M. P. (2012). *Procedimiento de entrenamiento de redes neuronales para detectores centelleadores*. Recuperado el 16 de 6 de 2020, de <https://patents.google.com/patent/ES2435093A2/es>

Morales, J. M. (1993). *Empleo del yoduro de mercurio como detector de radiación gamma*. Recuperado el 26 de 5 de 2020, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=201045>

Olaizola, A. M. (2000). *Búsqueda de fuentes cósmicas de radiación gamma de muy alta energía con el detector airobicc*. Recuperado el 22 de 5 de 2020, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=10497>

Sanz, J. R. (2017). *Estudio de nuevos detectores para espectrometría de radiación gamma*. Recuperado el 21 de 5 de 2020, de <http://oa.upm.es/49203>

Zamorano, T., & Javier, F. (2017). *Análisis y diseño de un detector compacto de radiación gamma de estado sólido para espectrometría*. Recuperado el 22 de 5 de 2020, de <http://oa.upm.es/44542>

(Sanz, 2017) (Giler & Gabriel, 2017) (Zamorano & Javier, 2017) (Zamorano & Javier, 2017) (Morales, 1993) (Morales, 1993) (Laá, 2012) (Olaizola, 2000)

Sánchez Uribe, N. (2011). *Medición de dosis recibida por el personal ocupacionalmente expuesto del departamento de medicina nuclear del INCAN*. Recuperado el 15 de 6 de 2020 de https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/124/43124059.pdf