Espectroscopía gamma utilizando un centellador de NaI(Tl).

Timoteo Daniel Herrera, Matías Grassi, Lucas Emiliano Neñer y Lucila Peralta Gavensky.
Física de Partículas y Nuclear,
Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo,
Comisión Nacional de Energía Atómica Bariloche.
(8400) Bariloche, Argentina.
(Dated: 25 de marzo de 2015)

Se estudió el espectro de radiación γ de muestras de arena de Brasil utilizando un centellador de NaI dopado con Tl. Para ello se calibró el dispositivo experimental utilizando fuentes de ^{152}Eu, ^{60}Co, ^{22}Na y ^{133}Ba. Se encontró que los picos de emisión de la arena se corresponden con la cadena de decaimiento del Torio (Th), elemento presente en la Monacita.

I. INTRODUCCIÓN.

En el presente trabajo se analizarán los espectros de emisión γ de muestras de laboratorio y de arenas de brasil utilizando un centellador de NaI(Tl). Existen tres mecanismos fundamentales por los que se produce una interacción en el detector con la radiación: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares. Estos producen una transferencia parcial o completa de la energía de los fotones incidentes a energía cinética de los electrones del centellador.

A. Efecto fotoeléctrico.

En este proceso se produce la emisión de un electrón de un átomo al absorber un fotón de energía suficiente. El electrón luego del proceso tiene una energía dada por:

$$E_{e^-} = h\nu - E_b, \tag{1}$$

donde $h\nu$ es la energía del fotón incidente y E_b es la energía de ligadura del electrón en su capa original. Debido a que la probabilidad τ de que suceda un evento de absorción fotoeléctrica es proporcional a:

$$\tau \propto \frac{Z^n}{E_\gamma^{7/2}} \tag{2}$$

El efecto fotoeléctrico es el modo predominante de interacción para rayos γ de baja energía y se evidencia aún más para elementos de alto número atómico Z.

B. Efecto Compton.

El proceso Compton es uno de los mecanismos de interacción de la materia para rayos γ con energías típicas de las fuentes de radioisótopos. En el scattering de Compton, el fotón incidente es deflectado un cierto ángulo respecto de su dirección incidente y transfiere parte de su energía a un electrón, por lo que es un proceso inelástico. Teniendo en cuenta la conservación de energía e impulso del proceso se puede mostrar que la energía del fotón deflectado en un ángulo θ es de la forma

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0\, c^2}(1 - cos(\theta)}, \tag{3}$$

donde ν' y ν son las frecuencias del fotón incidente y deflectado respectivamente, m_0 es la masa en reposo del electrón y c es la velocidad de la luz. La probabilidad de emisión como función del ángulo θ se puede calcular a partir de la fórmula de Klein–Nishina.

De esta fórmula también se puede deducir que la probabilidad de que suceda un evento compton es proporcional a Z/A, por lo que es aproximadamente constante al cambiar el elemento.

C. Producción de pares.

Si la energía del fotón γ incidente supera el doble de la masa en reposo del electrón ($1{,}02\, MeV$), el proceso de producción de pares es energéticamente posible. El fotón desaparece y da lugar a dos partículas, un electrón y un positrón, que tienden a aniquilarse emitiendo dos fotones cada uno con energía $m_0\, c^2$.

II. MÉTODO EXPERIMENTAL.

Para la caracterización de la radiación emitida por las fuentes se utilizó un detector γ, basado en un cristal centellador (componente activo) y un tubo fotomultiplicador (PMT). Un esquema de dicho dispositivo se puede ver en la Fig. 1.

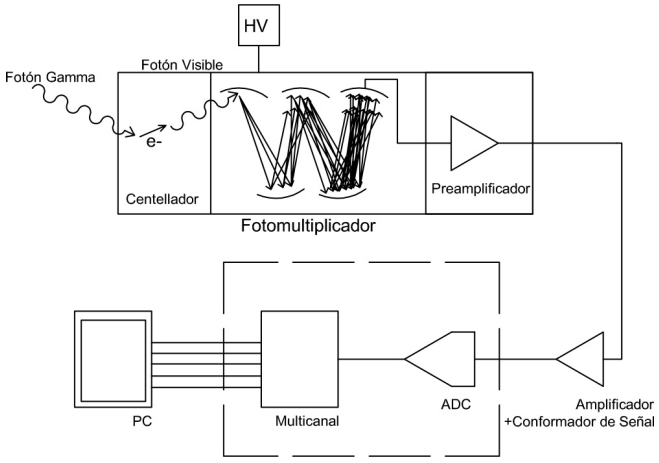

Figura 1. Esquema experimental utilizado. Se indica la interacción de un fotón γ con un electrón del centellador por efecto fotoeléctrico, el que luego es absorbido y emite luz en el rango visible. La señal obtenida es amplificada a través de un fotomultiplicador y un amplificador. Luego se digitaliza y se procesa con un multicanal.

Los materiales centelladores sirven para la detección del paso de partículas cargadas a traves de ellos. Existen de tipo orgánico e inorgánico: en los primeros, la interacción con una partícula cargada produce la excitación de niveles moleculares, y en los inorgánicos de niveles del cristal. En ambos casos, la desexcitación se produce mediante la emisión de fotones en el espectro visible. La distinción principal entre los centelladores orgánicos e inorgánicos es que los primeros tienen un tiempo de respuesta mucho menor.

Para esta práctica se utilizó un cristal inorgánico, de Yoduro de Sodio (NaI) dopado con Talio. Es importante aclarar que la cantidad de fotones emitidos será proporcional a la energía cinética de la partícula cargada. Para la detección de radiación γ, dichas partículas provienen de la interacción de los fotones γ con el cristal del centellador mediante los mecanismos descritos en la Introducción.

Los fotones provenientes del centellador son convertidos por el PMT en pulsos de tensión. En la entrada del mismo se encuentra un fotocátodo, cubierto por un material de función trabajo pequeña (metal alcalino o alcalino-térreo). En el interior del PMT se ubican una serie de dínodos y finalmente un ánodo. Se aplica una alta tensión (se utilizaron 750 V) entre el cátodo y el ánodo, que se reparte entre los dínodos. Al incidir un fotón, por efecto fotoeléctrico se emiten fotoelectrones, que son acelerados por la tensión entre el fotocátodo y el primer dínodo. Las colisiones con los sucesivos dínodos generan una cascada de electrones, produciendo finalmente un pulso de corriente en el ánodo, y por lo tanto una tensión. Cabe destacar que la carga de estos pulsos resultará proporcional a la cantidad de fotones incidentes en el PMT.

Los pulsos del PMT pasan a un preamplificador, que además de amplificar las señales, integra la carga de varios pulsos sucesivos. La señal pasa a un amplificador, que deriva los pulsos y aplica un filtro pasa banda además de amplificarlos. Se utilizó una ganancia de 50, y un *shaping time* de 1 μs, y finalmente a un conversor analógico-digital (ADC) y a un multicanal, que envía la información sobre la amplitud del pulso registrado en el amplificador a una PC. Finalmente, se obtienen los espectros deseados mediante un software de adquisición. Dicho software se configuró para realizar mediciones de 300 s de duración. Si la frecuencia de emisión de γ es demasiado alta para la duración de los pulsos producidos en el amplificador (por ejemplo, si la fuente está demasiado cerca), el software aplica intervalos de "tiempo muerto", para evitar la interferencia de pulsos sucesivos. Para las mediciones realizadas, se buscó que el tiempo muerto fuera de $\sim 3\,\%$ del tiempo total. Los datos entregados por el software al final de la medición son de número de cuentas en cada canal de registro. El número de canal depende de la amplitud del pulso proveniente del amplificador que, por lo visto anteriormente, será proporcional a la energía cinética de la partícula cargada proveniente de la interacción del fotón γ con el centellador.

A. Espectro esperado

Considerando que la radiación γ emitida por la fuente es monocromática, se espera la presencia de un pico correspondiente a todos los casos en los que el fotón deposita toda su energía ($h\nu$) en el centellador. Como dicho pico se corresponde con las interacciones de efecto fotoeléctrico, se lo conoce como *fotopico*. Las interacciones Compton producirán un espectro con baja energía conocido como *talón Compton*. Si la interacción es de producción de pares, podría producirse que uno o ambos de los fotones de 511 KeV producidos por la aniquilación electrón-positrón escapen del centellador. Se esperan entonces también dos picos adicionales, uno correspondiente al simple escape y otro al doble escape, ubicados a $h\nu - m_e c^2$ y $h\nu - 2m_e c^2$, respectivamente.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

A. Calibración

Con el objetivo de realizar una calibración de la energía de cada canal se midieron los espectros de radiación de fuentes conocidas. Se utilizaron muestras de ^{152}Eu, ^{133}Ba, ^{60}Co y ^{22}Na. Por otra parte, se realizaron mediciones del fondo de radiación que luego se le restó a los espectros de cada elemento obteniendo, con el fin de disminuir el ruido. Los espectros se muestran en la Fig. 2.

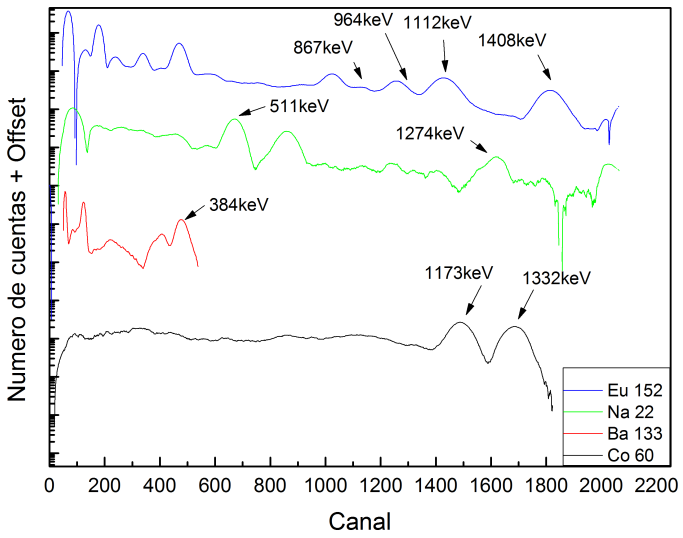

Figura 2. Espectros de emisión de las fuentes radiactivas de ^{152}Eu, ^{133}Ba, ^{60}Co y ^{22}Na. Se indican con flechas los picos de emisión utilizados para la calibración del centellador.

Se identificaron los picos producidos por los diferentes decaimientos de los elementos utilizados para calibrar, y teniendo en cuenta los datos de emisiones γ tabulados por la IAEA se realizó la regresión lineal mostrada en la Fig. 3. A partir de esta regresión se obtuvo la calibración de todo el sistema experimental: $E = (Canal)/1,27keV$. La ordenada al origen se puede considerar cero por estar dentro del error.

Como se ve en la Fig. 3 el ancho a mitad de altura de los picos mas angostos es de 10 canales, que se traduce a $7{,}9keV$, ésta se puede considerar como la resolución natural del equipo.

Cabe destacar que no se utilizaron todos los picos observados en la Fig. 2 sino sólo los que correspondían a los fotopicos esperados para cada elemento. El resto de los pulsos se deben a las diferentes interacciones de la radiación γ con la materia explicadas en la introducción; compton o producción de

pares.

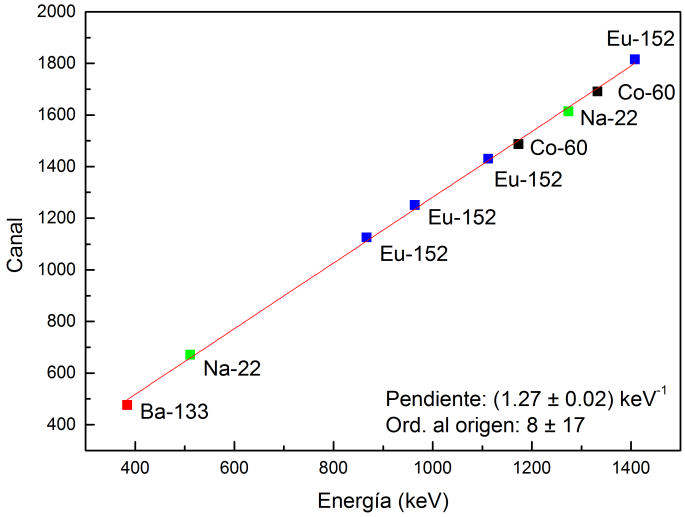

Figura 3. Recta de calibración entre los canales del dispositivo de medición y las energías de emisión de las fuentes calibradas.

B. Espectro de emisión de arena de Brasil

Se midió el espectro de emisión de una muestra de arena de Brasil, mostrado en la Fig. 4. Sabiendo que estas arenas son ricas en Monacita, que contiene Torio, se comparó este espectro con el esperado para una muestra de ^{232}Th natural. En esta no solo se encuentra el Torio, sino también los productos de decaimiento del mismo[1], cada uno con su propio espectro de emisión γ. Los picos observados se corresponden perfectamente con este espectro combinado.

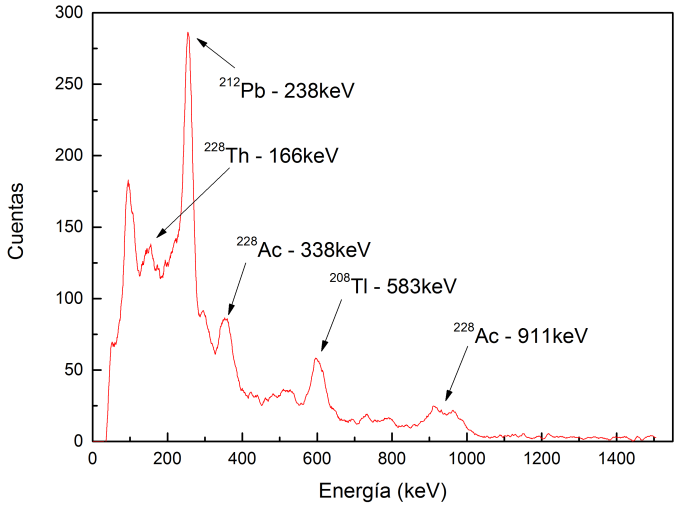

Figura 4. Espectros de emisión de la arena de Brasil, se indican con flechas los picos de emisión del Th y los elementos correspondientes a su cadena de decaimiento.

En la figura 5 se muestra la cadena de decaimiento del ^{232}Th, los fotopicos de los elementos de esta cadena que entran dentro del rango de energías del detector coinciden con los observados en la arena.

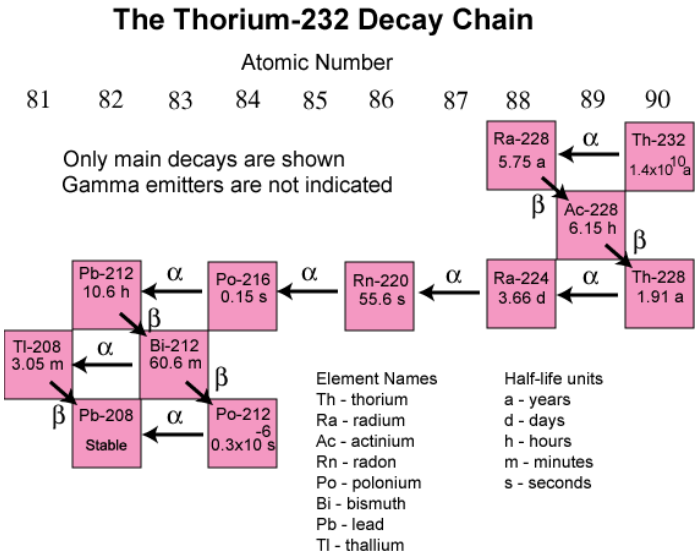

Figura 5. Cadena de decaimiento del ^{232}Th, se observa la presencia de los elementos que producen los fotopicos detectados en la Fig 4

C. Estimación de dosis equivalente recibida

Se realizó también un cálculo estimado de la dosis equivalente recibida durante la realización del experimento. Para eso, se utilizó la expresión[5]

$$\dot{D} = \frac{AE}{4\pi r^2}\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{Z,E} \tag{4}$$

donde $\dot{D}$ es la tasa de dosis absorbida, A es la actividad de la fuente, E es la energía de los γ emitidos (se supone una fuente monoenergética, r es la distancia a la fuente, y $\frac{\mu_{en}}{\rho}$ es el coeficiente de absorción másica, y depende del medio que absorbe la radiación y la energía de la fuente.

Los cálculos se realizaron para la fuente de ^{137}Cs, fuente γ monocromática, con una energía de $661,645\ keV$. En primer lugar se calculó la actividad de la fuente al momento de realizar el experimento, conociendo de[7] la actividad en una fecha de referencia. El valor obtenido fue de $205,082\ kBq$. Se consideró una distancia de 20 cm de la fuente para calcular una cota superior de dosis. El medio considerado fue agua, teniendo en cuenta la composición del cuerpo humano. El valor para el coeficiente de absorción se obtuvo de[6], siendo de $0,0896\ \frac{cm^2}{g}$. Como se trata de una fuente γ, la dosis absorbida coincide con la dosis equivalente H.

El valor obtenido para la tasa de dosis absorbida fue de $1,39\ \mu Sv/h$. Considerando una duración de la experiencia de 4 horas, la dosis equivalente recibida por estar en la presencia de esta muestra resulta ser $5,56\ \mu Sv$. Valor veinte veces mas chico que una radiografía de pecho, o una dosis equivalente a la recibida por comer 55 bananas.

IV. CONCLUSIONES

Se utilizó un sistema de medición basado en un centellador de NaI(Tl) con el fin de detectar fotones γ. Se calibró con fuentes emisoras con energías conocidas.

Además se calculó la dosis aproximada recibida debido a una de las muestras presentes en el experimento, mostrando que es un valor bajo.

Se analizó el espectro de emisión de una muestra de arena de brasil, encontrando picos provenientes de los elementos de la cadena de decaimiento del ^{232}Th, debido a la presencia de Monacita.

---

[1] $http://www.gammaspectacular.com/gamma_spectra/th232-spectrum$

[2] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 3rd Ed., John Wiley & Sons (2000).

[3] Particle Data Group, *Review of Particle Physics*, University of California (2010).

[4] M. Grassi, T. Herrera, *Caracterización de partículas provenientes de rayos cósmicos mediante detectores Cherenkov*, Física Experimental III, Instituto Balseiro (2014).

[5] *Cálculo de dosis en la irradiación externa*, Protección Radiológica, Instituto Balseiro.

[6] Coeficientes de atenuación $http://www.nucleonica.net/Application/Help/Helpfiles/Appendix3.htm$

[7] Características de las fuentes utilizadas $http://www.ib.edu.ar/FisicaExperimental/images/6/66/Iaea-sources.pdf$