

Espectroscopía gamma de baja resolución

AMELIO, Marco Sthéfano; GARCÍA OPFINGER, Francisco Tomás;
GESUALDI, Flavia; LOZANO NEGRO, Fabricio Simón; PUIG, Joaquín Roberto
Instituto Balseiro, 28 de marzo del 2017

I. INTRODUCCIÓN

Se define como actividad de un material radioactivo a la cantidad de decaimientos por unidad de tiempo que presenta. En muchas de las reacciones nucleares se generan nucleidos que se encuentran en estados excitados. Éstos decaen rápidamente hacia el estado fundamental, emitiendo radiación gamma con fotones de una frecuencia característica de cada decaimiento, $\nu_\gamma = h(E_i - E_f)$, donde ν_γ es la frecuencia del fotón y (E_i, E_f) son las energías del nucleido excitado y en el estado fundamental respectivamente.

La radiación electromagnética presenta tres formas observables de interacción con la materia. La primera de ellas es el efecto fotoeléctrico, que consiste en un fotón interactuando con un electrón ligado a un átomo. El fotón es absorbido por el electrón, entregándole toda su energía. De este modo, si el fotón tiene una energía mayor a la necesaria para desligar el electrón del átomo (función trabajo del electrón), se tendrá un electrón *libre* con una energía cinética igual a la energía del fotón menos la función trabajo del electrón. En este trabajo se trató con fotones con energía cinética del orden de los MeV , mientras que las funciones trabajo características de los electrones de los átomos conocidos son del orden de los eV , con lo que se considerará que los electrones adquieren una energía cinética igual a la del fotón incidente.

Otra de las formas de interacción es el efecto Compton. En él, un fotón incide sobre un electrón, sin embargo, en esta ocasión el fotón no se absorbe, sino que entrega parte de su energía al electrón y se dispersa como un fotón de energía (y por lo tanto frecuencia) más baja. Las posibles variaciones de energía del fotón (que se corresponde con la energía entregada al electrón) están dadas por la ecuación $\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1 - \cos(\theta)}{m_e c^2}$, donde E y E' corresponden a la energía del fotón antes y después de la interacción, θ es el ángulo de dispersión y m_e es la masa del electrón.

La tercera forma de interacción de interés para este trabajo es la creación de pares, que consiste en un fotón que se aniquila creando un par electrón-positrón. Cabe destacar que para que tal efecto pueda ocurrir, debe haber algún mediador (como por ejemplo un átomo), ya que de otro modo no es posible que se conserven simultáneamente la energía y el momento. Además, la energía del fotón aniquilado debe ser mayor a $2m_e c^2 = 1,022 MeV$, que es la energía de la masa en reposo del par. El resto de la energía del fotón se convertirá en energía cinética del par o del mediador.

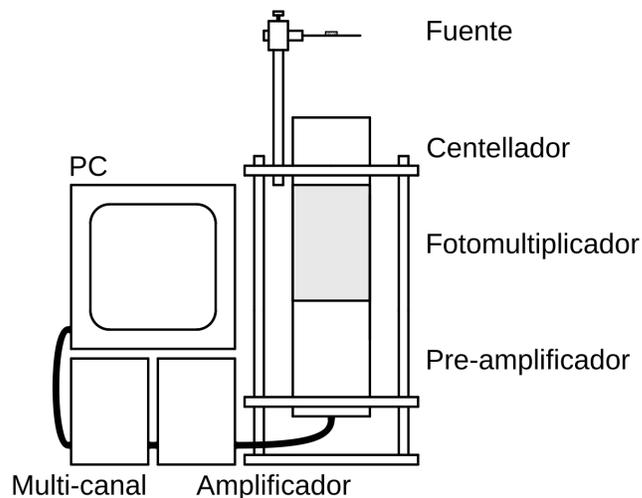


Figura 1: Esquema del arreglo experimental utilizado en la medición de energía de los rayos gamma.

II. MÉTODO EXPERIMENTAL

El esquema experimental se puede ver en la Figura 1. Se tenía una fuente de rayos gamma provenientes de la desexcitación del átomo hijo, que era un producto de otra reacción nuclear. Cuando un gamma llega al centellador extrae electrones por efecto fotoeléctrico. Uno de estos electrones posee una energía cinética alta, por lo cual al termalizar excitan más electrones del material. Este número es proporcional a la energía inicial del electrón. Estos electrones excitados decaen a niveles menores de energía emitiendo fotones. Detrás del centellador, se colocó un fotomultiplicador, en el cual nuevamente al llegar fotones extraen electrones del mismo por efecto fotoeléctrico. Estos electrones son enfocados hacia díodos, donde son multiplicados en un proceso de emisión secundaria. Sin embargo, la corriente lograda al final de esta cadena no es suficiente como para realizar una medición directa, con lo cual estos electrones van a un pre-amplificador y luego éste se conecta a un amplificador.

Finalmente se obtiene a la salida del amplificador un voltaje proporcional a la energía del rayo gamma incidente. Este voltaje se ponía a la entrada de un multicanal, que producía un pulso que agregaba una cuenta al canal asociado a la amplitud del pulso.

III. RESULTADOS

A. Calibración energía-canal y medición del espectro de la sal dietética

Se midió la cantidad de cuentas en función del canal para las siguientes fuentes radioactivas (Tabla I).

Tabla I: Fuentes radioactivas utilizadas.

N	Muestra	Modo de decaimiento
0	Fondo	—
1	^{60}Co	β^-
2	^{137}Cs	β^-
3	^{22}Na	ϵ
4	Sal “dietética”	

En las Figuras 2, 3 y 4 se muestran las cuentas en función del canal para las fuentes 1 a 3.

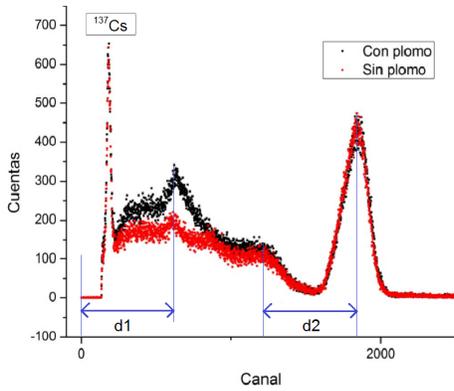


Figura 2: Espectro de energías (canales) del ^{137}Cs .

A partir de las mediciones correspondientes a las Figuras 2 a 4 se realizó una calibración energía-canal conociendo las energías de emisión de éstas fuentes.

El resultado del ajuste lineal para la calibración energía-canal es el siguiente:

$$E[\text{keV}] = \frac{E[\text{canales}]}{(2,68 \pm 0,03) \frac{\text{canales}}{\text{keV}}}$$

Con esta calibración se determinaron las energías del espectro de la sal “dietética”.

Como se observa en la Figura 6, la sal “dietética” presenta un pico en los (3870 ± 150) canales, o equivalentemente (utilizando la calibración energía-canal), en los $(1440 \pm 6)\text{keV}$. Este pico es consistente con el decaimiento del ^{40}K , cuya energía es de 1461keV .

B. Determinación de actividades

Las fuentes se encontraban aproximadamente a 20 cm del detector, cuya área era de aproximadamente 12cm^2 . A partir de estos datos y de las mediciones realizadas se

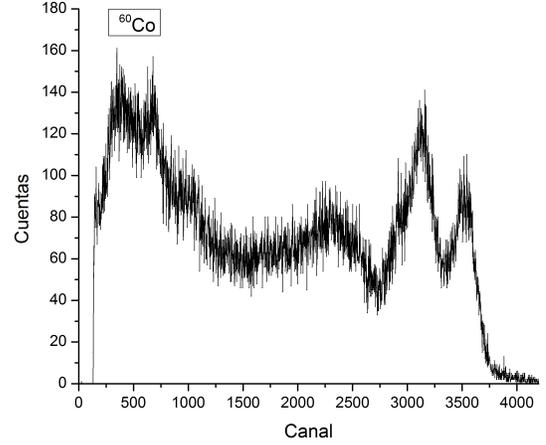


Figura 3: Espectro de energías (canales) del ^{60}Co . Se observa dos picos alrededor de los 3000 canales y 3500 canales, que son los picos fotoeléctricos correspondientes a $1173,237\text{keV}$ y $1332,501\text{keV}$ respectivamente. Alrededor de los 2250 canales se encuentra el talón Compton, que deja a su izquierda a la meseta Compton. Por debajo de los 1000 canales el ruido supera la señal útil.

calculó la actividad de las fuentes. Para esto se le restó a la medición de cada fuente lo siguiente: la medición del fondo normalizada por su tiempo vivo, multiplicada por el tiempo de medición de la fuente correspondiente. Las actividades así calculadas se muestran en la Tabla II.

Tabla II: Actividades de las fuentes radioactivas utilizadas.

Fuente (N)	Actividad (Bq)
0	14400
1	86140
2	86030
3	201500
4	79200
5	7150

De manera análoga se puede calcular la radiación recibida por los autores. Para esto se estimó un tiempo de exposición de 3 horas frente a una fuente de 85000Bq a un metro de distancia, y tomando la sección eficaz de una persona como $\frac{1}{12} = \frac{4\pi*(1m)^2}{2m*0,5m}$. Así se estima una dosis de aproximadamente $306,10^6\text{MeV} = 4,9,10^{-11}\text{J}$ (suponiendo que cada decaimiento es de 1MeV).

C. Back-Scattering

Se muestra en la Figura 1 un diagrama del espectro de energías obtenido para el ^{137}Cs en las mismas condiciones que las demás muestras y colocando ladrillos de plomo de modo que la muestra quedara ubicada entre ellos y el detector.

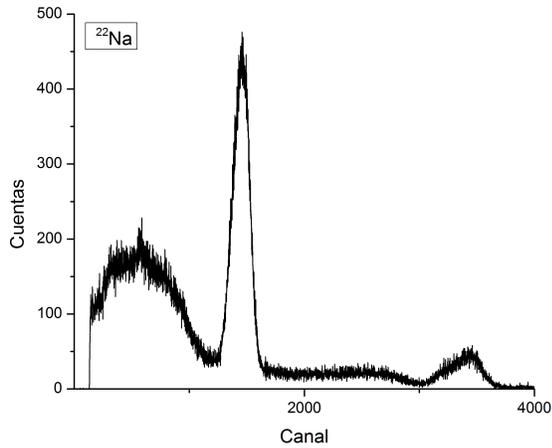


Figura 4: Espectro de energías (canales) del ^{22}Na . El pico más pequeño, alrededor de los 3500canales, corresponde al pico fotoeléctrico de 1275keV . Cerca de los 1750canales está el pico de 511keV . Éste pico se debe a que el ^{22}Na decae por β^+ , produciendo un positrón; el positrón interactúa con la materia perdiendo energía cinética, hasta que eventualmente se aniquila con un electrón, liberando dos fotones de 511keV de momentos opuestos, razón por la cual sólo uno podrá llegar al detector.

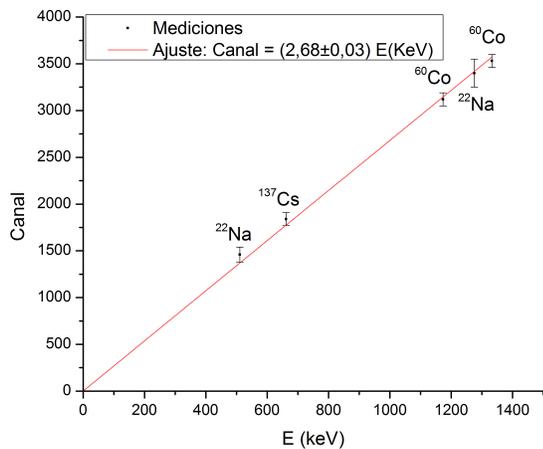


Figura 5: Calibración energía-canal a partir de las mediciones de ^{137}Cs , ^{60}Co y ^{22}Na . Superpuesto se muestra el ajuste lineal.

La fuente de ^{137}Cs emite fotones en todas las direcciones. El pico de mayor intensidad que se ve en la Figura 7 corresponde a los fotones emitidos en la dirección del detector. Sin embargo, los fotones emitidos en otras direcciones pueden dispersarse cambiando su dirección, y

eventualmente llegar al detector. De ser así, se esperaría que los fotones que se emitieron en dirección antiparalela a los que alcanzan el detector directamente, producto del back-scattering lleguen al detector con una energía igual

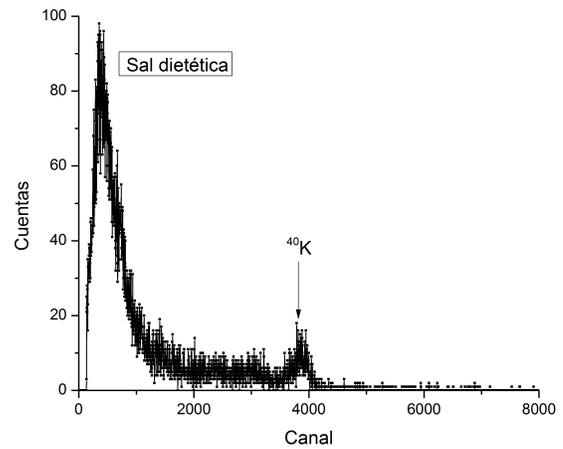


Figura 6: Espectro de energías de la sal “dietética”. El pico señalado es consistente con ser una emisión del ^{40}K .

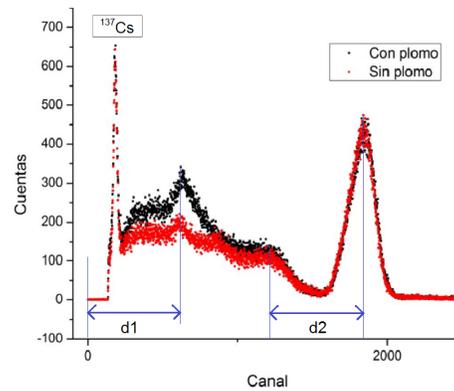


Figura 7: Espectro de energías del ^{137}Cs con y sin los ladrillos de plomo colocados detrás de la muestra.

a la diferencia entre el pico de efecto fotoeléctrico y el comienzo del talón Compton. Puede verse en la Figura 7, que en la curva del espectro de emisión marcada como “sin plomo”, se presenta un pico en la posición descrita ($d1 \approx d2$). En caso de corresponder tal pico a un efecto de back-scattering, al colocar ladrillos de un material pesado con una banda de conducción semi-llena (como el plomo) de modo que la fuente quede entre el detector y el plomo, la intensidad de este pico debería aumentar. Esto se observa en la Figura 7, en la curva marcada como “con plomo”.