

# Espectroscopía gamma con centellador de NaI: calibración del arreglo experimental para caracterización de fuentes

D. Lisette Buding, Federico Clavero, Sebastian Moguilner

22 de abril de 2013

## Resumen

---

Se calibró un sistema de detección de energía de radiación gamma basado en el uso de un centellador de monocristal de NaI mediante fuentes de Cobre, Cesio y Sodio, cuyo espectro de radiación es conocido. Con esta técnica se analizó entonces el espectro de radiación de las fuentes mencionadas, de la radiación de fondo y de la sal dietética de uso doméstico.

---

## 1. Introducción

### 1.1. Interacción de la radiación con la materia

Existen isótopos radiactivos cuyos decaimientos nucleares emiten fotones (radiación electromagnética) del orden de los rayos  $\gamma$ , los cuales son altamente energéticos ( $\approx$ MeV). Esta emisión, característica para cada *fente* o material, interactúa con la materia transfiriéndole energía, por ejemplo mediante los siguientes mecanismos:

- *Compton*: un fotón colisiona con un electrón entregándole así impulso y perdiendo energía (por lo que de la interacción resulta un fotón de menor frecuencia). No puede ocurrir en el vacío, y tanto energía como impulso se conservan. La ecuación que relaciona la energía  $h\nu'$  del fotón resultante con la del incidente  $h\nu$  es:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \epsilon(1 - \cos\theta)}, \quad (1)$$

donde  $\epsilon$  es el cociente de la energía incidente con la del electrón en reposo y  $\theta$  el ángulo de desviación del fotón.

- *efecto Fotoeléctrico*: el fotón incidente de frecuencia  $\nu$  entrega toda su energía  $h\nu$  a un electrón ligado a un átomo, arrancándolo y dejando el átomo ionizado (pasando el electrón a un estado continuo). No puede ocurrir con electrones libres y la energía

entregada debe ser mayor que la función trabajo  $B$  del electrón (es decir, su energía de ligadura), que es del orden de los eV. La relación del balance energético implica que el electrón se lleva una energía  $E_{fe}$  equivalente a:

$$E_{fe} = h\nu - B \approx h\nu, \quad (2)$$

- *creación de pares*: ocurre cuando un fotón decae en un electrón y un positrón, por lo que la energía del fotón debe ser por lo menos mayor a la energía de ambas partículas en reposo. Si el positrón se detiene, este se aniquila con un electrón emitiendo dos fotones de 511 KeV en direcciones opuestas, consecuentes del balance energético y de impulso.

### 1.2. Bases del experimento

Si las interacciones mencionadas en el apartado anterior ocurren en el seno de un material, como un monocristal de Yoduro de Sodio (NaI), los electrones arrancados de los estados ligados con energía  $E_e$  no abandonan el material ya que éste debe mantenerse eléctricamente neutro. A su paso esos electrones entregan energía a los átomos, excitando los niveles electrónicos de las capas externas, siempre y cuando la energía entregada supere la energía de gap  $E_g$ . Cada interacción entregará una cierta energía  $E_e$ , la cual terminará excitando

aproximadamente  $N_e = E_e/E_g$  electrones. Éstos finalmente decaerán, emitiendo  $N_e$  fotones de energía  $E_g$  (que resultan fotones de luz visible). Ese número  $N_e$  (o mejor dicho, un porcentaje de  $N_e$  que depende de la eficiencia del arreglo experimental) es el que nos indica en proporción la energía que fue entregada al material por interacción con la radiación. Se pueden obtener entonces espectros como el de la Fig. 1.

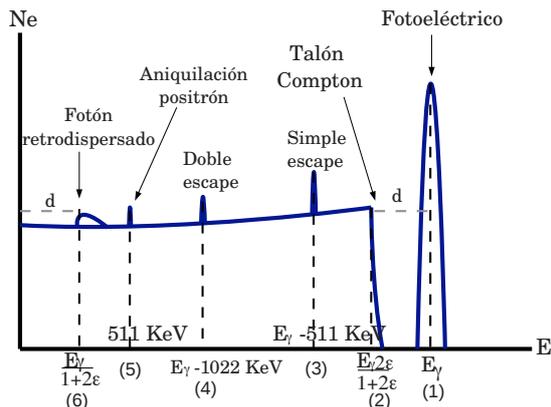


Figura 1: Número  $N_e$  de electrones que fueron excitados como consecuencia de que se entregara una energía  $E_e$  al material.

La información que nos da el gráfico de la Fig.1 se encuentra principalmente en los cambios de “relieve”: los picos y la caída marcada. El pico (1), angosto y centrado en la energía del fotón incidente, es resultado de que el rayo  $\gamma$  haya transferido toda su energía a un electrón (interacción por efecto fotoeléctrico). La caída que se observa en (2) corresponde a la máxima transferencia de impulso que se da por efecto Compton a un electrón, en la que el rayo resultante es retrodispersado. Si los fotones retrodispersados no escapan del material y transfieren su energía a algún electrón, se observa un pico como el (6). Podría suceder que el gamma incidente decaiga por creación de pares, y que el positrón resultante luego se aniquile con otro electrón. Los fotones resultantes podrían interactuar con la materia, dando lugar al pico (5), o podrían escaparse ambos registrándose entonces el pico (4), o hasta escapar uno sólo, dando lugar al pico (3). Cabe aclarar que en una medición el ruido y el efecto de la radiación de fondo podrían afectar el gráfico de manera tal que varios picos no se distingan. Además, si la fuente utilizada no es monocromática, po-

drían verse más picos y caídas, correspondientes a superponer los espectros de todas las frecuencias de emisión. Incluso en ciertos casos se podrían ver picos de “efecto fotoeléctrico” correspondiente a que dicho efecto ocurrió para más de una frecuencia en una ventana temporal más pequeña de la que se puede resolver con el arreglo experimental; el pico cae entonces en la energía correspondiente a la suma de los  $E_\gamma$  involucrados.

## 2. Método experimental

Para medir los histogramas de energía depositada se utilizó un centellador de NaI, un fotomultiplicador y una electrónica de multicanales conectada a una PC. El diagrama del dispositivo de medición se muestra en la Fig. 2.

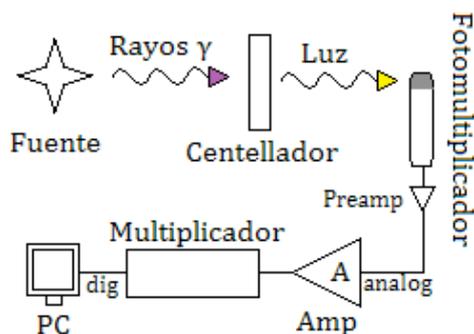


Figura 2: Esquema del arreglo experimental.

Cerca del centellador se colocaba la fuente de rayos gamma, los cuales interactuaban con el primero. Se tuvo a disposición en el laboratorio muestras de  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  y  $^{22}\text{Na}$ . También se usó sal de mesa con contenido de KCl. Los fotones resultantes de la interacción (de energía  $E_g$ , como se explicó en la sección 1.2) ingresaban al fotomultiplicador, obteniéndose a la salida un pico de tensión de aproximadamente 1 ns de duración, proporcional a la cantidad de fotones que hubiesen ingresado. Finalmente, la señal se amplificaba y se registraba en el multicanal, la cual posteriormente se procesó como histograma en la PC. A continuación se explica brevemente el funcionamiento de cada instrumento.

## 2.1. Centellador de NaI(Tl)

Un centellador es un material que absorbe radiación ionizante y emite fotones visibles. Inicialmente, el fotón incidente interactúa con un electrón del material, llevándolo a la banda de conducción. Éste se desacelera con el medio, excitando electrones cercanos, hasta ligarse nuevamente. Eventualmente, el material se relaja emitiendo los fotones visibles. En particular, el NaI es el más usado debido a que produce una cantidad relativamente alta de luz. Se activa con impurezas de Tl, que tiene estados ligados en donde el I tendría estados prohibidos. Este defecto aumenta la probabilidad de que se emita un fotón visible.

## 2.2. Fotomultiplicador

Es un dispositivo que puede recibir una luminosidad muy baja y obtener una tensión proporcional a ella con niveles de ruido aceptables. Se muestra un diagrama del mismo en la Fig. 3.

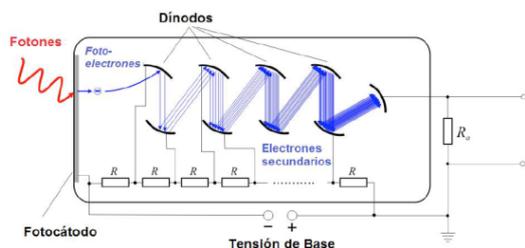


Figura 3: Diagrama del funcionamiento del fotomultiplicador. [1]

La luz incide sobre un fotocátodo, arrancando electrones por efecto fotoeléctrico. Dentro de un tubo se coloca una serie de dinodos, electrodos alimentados con alta tensión en donde cada uno tiene una tensión mayor que el anterior; esto se logra mediante un divisor resistivo. Cuando los fotoelectrones inciden sobre el primer dínodo se desprende una cantidad de electrones, que son acelerados por diferencia de potencial y generan un segundo desprendimiento. Finalmente, se logra tener una corriente amplificada hasta millones de veces. Como consecuencia se puede obtener una diferencia de potencial medible en una resistencia.

## 2.3. Multicanal

Un analizador multicanal (MCA) es prácticamente un histograma. Es una electrónica que

permite acumular cuentas en distintos canales digitales según una señal de entrada. Cuando ésta llega al MCA, el aparato encuentra cuál es el canal que le corresponde y registra el evento allí. Este histograma digital se envía a una PC para su almacenamiento y posterior procesamiento.

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1. Calibración del detector

Los espectros obtenidos mediante el MCA en la PC eran en realidad histogramas de cuentas en función de canales, para cada cuál a su vez corresponde una energía. Para asignar una energía a cada canal del MCA se realizó una calibración, utilizando los histogramas obtenidos de las fuentes de  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  y  $^{22}\text{Na}$  y comparándolos con valores tabulados [2] de energía de fotopico (correspondientes al pico de efecto fotoeléctrico o, lo que es lo mismo, la energía de radiación de la fuente). En la tabla 1 se muestran las energías de radiación de la fuentes y los canales correspondientes. Con dichos datos se realizó un ajuste lineal (relación impuesta por el arreglo experimental) y se obtuvo la relación de la siguiente ecuación:

$$E[\text{MeV}] = 0,00107(1) \cdot C, \quad (3)$$

donde E es la energía en MeV y C el canal.

Fuente	Energía (MeV)	Canal
$^{22}\text{Na}$	0,511	493(6)
$^{60}\text{Co}$	1,1732	1092(6)
$^{60}\text{Co}$	1,3325	1235(7)
$^{137}\text{Cs}$	0,6617	630(1)

Tabla 1: fotopicos para las fuentes de calibración utilizadas, y los respectivos canales en que dichos picos se encontraban.

El  $^{60}\text{Co}$  presenta dos picos, debido a que en su decaimiento a  $^{60}\text{Ni}_{0+}$  emite dos fotones de energías distintas, como se detalla más adelante en la sección 3.2.

### 3.2. Espectros de radiación

Se obtuvieron los espectros de cada una de las muestras, y también los espectros de la radiación de fondo y de "sal light" de mesa con contenido de KCl. La radiación

de fondo, que se analizará más adelante, fue suprimida de los resultados para optimizar la búsqueda de los picos de mayor interés. Como el tiempo de exposición del centellador a las muestras fue diferente en algunas mediciones, se normalizaron los datos por el tiempo de medición.

Para la fuente de  $^{137}\text{Cs}$ , la de mayor actividad con la que se trabajó, la exposición que se registró duró 1 minuto. En la Fig. 4 se puede observar el espectro de la fuente, donde por más que no se observen todos los picos mencionados en la sección 1.2, debido a que su emisión no supera el umbral a partir del cual puede ocurrir el proceso de creación de pares, se puede apreciar que el gráfico está bien definido.

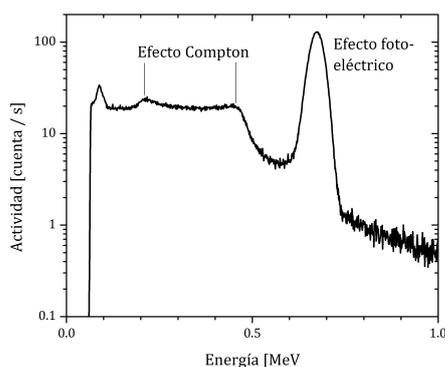


Figura 4: Espectro del  $^{137}\text{Cs}$

A la derecha puede verse el pico resultante de la interacción por efecto fotoeléctrico. A una energía de 0.447(6) MeV se ve la caída característica del impulso máximo transferido por interacción Compton, mientras que a 0.212(8) MeV se observa el efecto del fotón dispersado también por interacción Compton, de mínima energía (retrodispersado). Se observa un pico de baja energía, del que no se conoce su origen.

Para la fuente de  $^{60}\text{Co}$  se obtuvo el espectro de la Fig. 5. Se pueden observar dos picos de gran actividad, correspondientes a las dos emisiones  $\gamma$  de la fuente, como se adelantó en la sección 3.1. A .89(3) MeV se ve el talón Compton de la emisión de 1,17(1) MeV, mientras que el correspondiente a 1.32(1) MeV podría ser la protuberancia visible a los 1.07(1) MeV. La superposición de ambas emisiones impide

asegurarlos. A 0.24(1) MeV se ve el pico de retrodispersión de la emisión de 1,17(1) MeV. El pico de retrodispersión de la emisión de 1.32(1) MeV no se logra distinguir. El pico observado a los 2.15(3) MeV podría corresponder a la interacción de ambas emisiones simultáneamente, pero está corrido respecto del valor que debería ser (2.50(2) MeV). La energía de la emisión de 1.32(1) MeV supera el umbral a partir del cual puede suceder la interacción resultante de la creación de pares, pero la resolución del sistema experimental no fue suficiente para poder distinguir los picos característicos en el resultado.

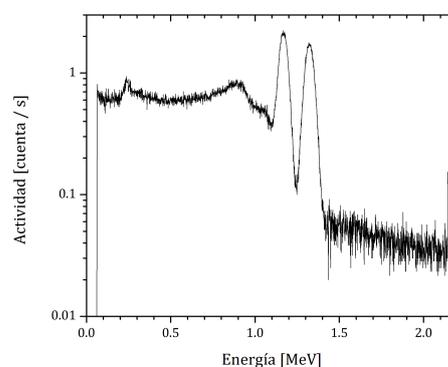


Figura 5: Espectro del  $^{60}\text{Co}$

Para la fuente de  $^{22}\text{Na}$  se obtuvo el espectro de la Fig. 6. Resultó ser la fuente trabajada de menor actividad. Sólo puede observarse su fotopico.

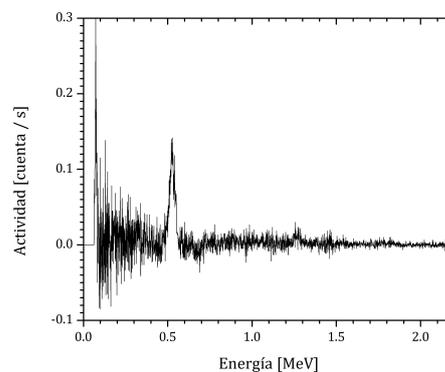


Figura 6: Espectro del  $^{22}\text{Na}$

Se obtuvo la radiación sin fuentes cerca del centellador, como se observa en la Fig. 7, junto con el resultado del espectro de  $^{40}\text{K}$ , presente en la sal dietética comestible (KCl). Al espec-

tro obtenido con la sal no se le ha suprimido el fondo. El fotopico del  $^{40}\text{K}$  coincide con el pico de la radiación de fondo alrededor de los 1,45(1) MeV (energía característica del decaimiento de  $^{40}\text{K}$  al  $^{40}\text{Ar}_{0+}$ ), con lo que se puede deducir que en el ambiente existe una proporción de  $^{40}\text{K}$  natural.

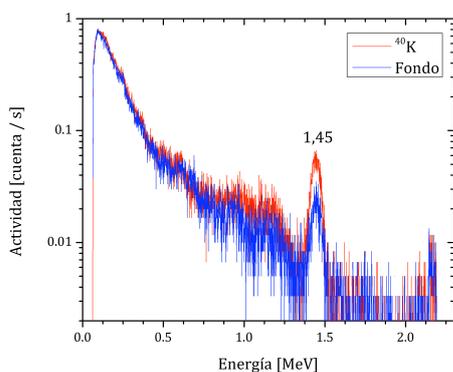


Figura 7: Espectros del  $^{40}\text{K}$  y del ambiente (fondo)

Se ve también en el gráfico de la Fig. 7 que a bajas energías la radiación parece subir, pero este es un efecto de la activación térmica del fototubo.

## 4. Conclusiones

Se calibró un sistema de medición de espectros de rayos  $\gamma$  con un centellador de NaI, usando fuentes radiactivas cuyas energías de emisión eran conocidas. Concretamente se utilizó  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$  y  $^{60}\text{Co}$ . Posteriormente se analizaron los espectros de estos elementos, identificándose en los resultados los mecanismos de interacción con la materia para cada caso. También se midieron los espectros de radiación de fondo y de la “sal light” de mesa con contenido de KCl. Se encontró en ambos un fotopico alrededor de 1,45(1) MeV, más intenso en el primer caso. Ese fotopico coincide con la energía de decaimiento de  $^{40}\text{Ar}_{2+}$  a  $^{40}\text{Ar}_{0+}$ , un isótopo que se obtiene del decaimiento del  $^{40}\text{K}$ . Puede deducirse de ello que había presencia de  $^{40}\text{K}$  en el ambiente donde se realizó el experimento, pero que su nivel de radiación no supera al de la sal dietética comestible.

## Referencias

- [1] Wikipedia - Obtenido el 20 de Abril de 2013, [http : //commons.wikimedia.org/wiki/File : Photomultiplier\\_schema\\_e.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photomultiplier_schema_e.png)
- [2] Table of Gamma rays - Obtenido el 20 de Abril de 2013, [http : //atom.kaeri.re.kr/gamrays.html](http://atom.kaeri.re.kr/gamrays.html)