

# Espectroscopía gamma utilizando un centellador de NaI

Rodrigo Bonazzola, Mauricio Montellano Durán,  
Hernán Saraceni, Alberto Villagrán

Introducción a Partículas y Física Nuclear  
Instituto Balseiro - Universidad Nacional de Cuyo

Marzo de 2014

## Resumen

Se registraron espectros de emisión de las fuentes radiactivas  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{22}\text{Na}$  e  $^{88}\text{Y}$ , a través de detector de centelleo y un analizador multicanal. Se observaron en los mismos las distintas formas de interacción de la radiación gamma con la materia. Luego, utilizando datos de referencia de energía de emisión para las muestras, se construyó la recta de calibración del sistema de medición. Además, se observaron los fenómenos de retrodispersión y atenuación del espectro debido a un ladrillo de plomo.

## Introducción

Existen tres formas mediante las cuales la radiación puede interactuar con la materia: el efecto Compton, el efecto fotoeléctrico, y la creación de pares electrón-positrón.

El efecto Compton se produce cuando un fotón choca contra un electrón, resultando disperso por el último, y perdiendo parte de su energía como resultado de esto. La relación energética está dada por [1]

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

donde  $m_0$  es la masa en reposo del electrón,  $h$  la constante de Planck,  $\nu$  la frecuencia del fotón incidente,  $\nu'$  la del fotón luego de la dispersión, y  $\theta$  es el ángulo entre la trayectoria del electrón luego de la dispersión y su trayectoria incidente. La máxima energía con la que puede ser dispersado el electrón corresponde al caso de colisión frontal ( $\theta = \pi$ ), en el cual el electrón es retrodispersado (talón de Compton), y su energía está dada por

$$E_{e^-}(\theta = \pi) = h\nu - h\nu' = \frac{h\nu}{\frac{m_0 c^2}{2h\nu} + 1} \quad (2)$$

Debido a que, en principio, la dispersión puede ocurrir para cualquier valor de  $\theta$ , el espectro de este proceso, que se muestra en la Fig. 1, muestra un continuo de energías desde  $\theta = 0$  hasta  $\theta = \pi$ , el valor máximo desplazado una cantidad  $W$  del valor de la energía de los fotones incidentes.

El efecto fotoeléctrico se produce cuando un fotón choca contra un electrón ligado, y el último absorbe

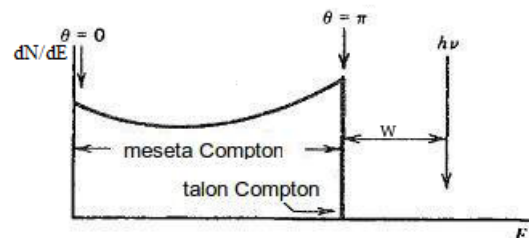


Figura 1: Espectro de energía del efecto Compton.

todo la energía del primero, quedando en un estado libre. La relación energética es la siguiente [1]:

$$E_{e^-} = h\nu - W, \quad (3)$$

donde  $E_{e^-}$  es la energía del electrón luego de absorber un fotón de energía  $h\nu$ , y  $W$  es la función trabajo del material del que se extrae el electrón. Se ve, por lo tanto, que el espectro de energía de este proceso será el mostrado en la Fig. 2, correspondiente a un único pico ubicado en la energía  $h\nu$  del fotón incidente.

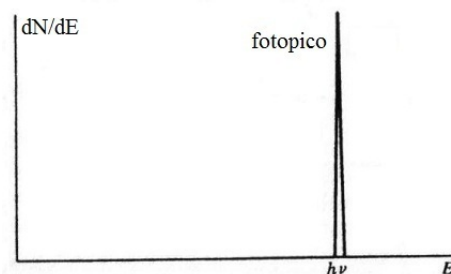


Figura 2: Espectro de energía fotoeléctrico (fotopico).

La creación de pares electrón-positrón es un proceso espontáneo que se da, con cierta probabilidad, para

fotones con  $h\nu > 2m_0c^2 = 1,022\text{MeV}$  [1]. Este proceso no se puede producir en el vacío, debido a la conservación del momento. La relación energética es

$$E_{e+} + E_{e-} = h\nu - 2m_0c^2 \quad (4)$$

donde  $E_{e+}$  es la energía del positrón, y  $E_{e-}$  la del electrón. Se ve, por lo tanto, que el espectro de energía de este proceso será el mostrado en la Fig. 3, el cual consiste en una delta desplazada en una cantidad  $2m_0c^2$  de la energía del fotón incidente.

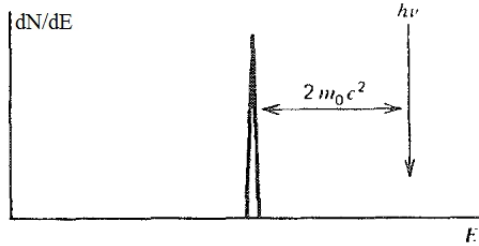


Figura 3: Espectro de energía de la creación de pares.

Mediante la superposición de los tres mecanismos de interacción, se espera obtener un espectro como el mostrado en la Fig. 4.

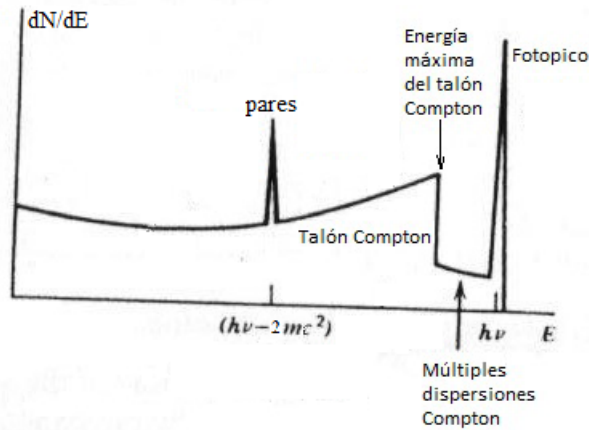


Figura 4: Espectro de energía de los tres mecanismos de interacción superpuestos.

## Método experimental

La espectroscopía gamma consiste en la obtención del espectro de las radiaciones gammas emitidas por los radio nucleídos. Para esto se utilizó un arreglo experimental compuesto de un detector de centelleo sólido de NaI, MCA (analizador multicanal, por sus siglas en inglés) de 2048 canales y una PC, como se muestra en la Fig. 5.

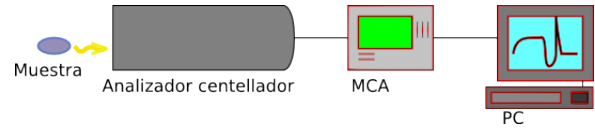


Figura 5: Arreglo experimental utilizado en la experiencia.

## Detector

El detector consiste en un cristal de ioduro de sodio dopado con talio, un fotomultiplicador (PMT), y un preamplificador, como se puede ver en la Fig. 6.

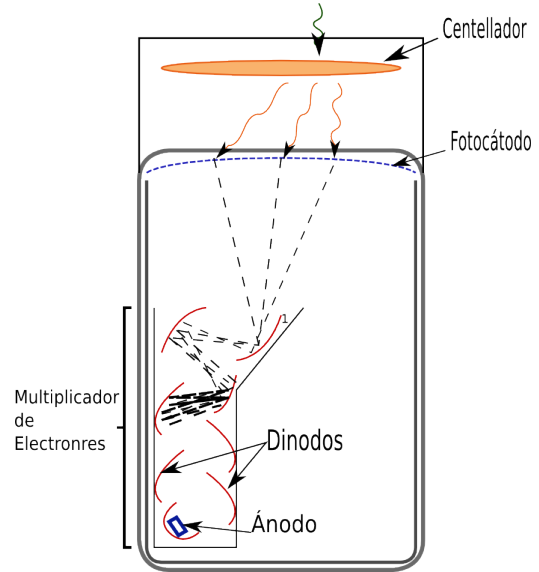


Figura 6: Diagrama del fotomultiplicador.

## Centellador

El mecanismo de centelleo en materiales inorgánicos depende los estados de energía determinados por la red cristalina del material. La absorción de energía resulta en la elevación de un electrón desde la banda de valencia a través del gap (banda intermedia de energía prohibida para los electrones) hasta la de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia. El electrón excitado retorna a la banda de valencia por un proceso de relajación en el que se emite un fotón de energía igual al ancho del gap, típicamente este es un proceso ineficiente y de energías mayores a las de un fotón en el rango visible. Para aumentar la probabilidad de la emisión de un fotón en el rango visible se agregan impurezas (activadores) que modifican las bandas de energía del cristal dando así lugar a la emisión de fotones de menor energía. El centellador se acopla con el cátodo de un fotomultiplicador a través de un medio transparente de mismo índice de refracción que el centellador.

## Fotomultiplicador

La estructura simplificada de un fotomultiplicador consta de una capa foto-sensitiva denominada fotocátodo acoplada a una estructura multiplicadora de electrones. El fotocátodo sirve para convertir tantos fotones incidentes como sea posible en electrones de baja energía. Si la luz emitida por centellador consiste en un pulso, los fotoelectrones producidos también consistirán en pulso de la misma duración. Como solo unos cuantos fotoelectrones están involucrados en un pulso típico su carga es demasiado pequeña como para utilizarlo como una señal eléctrica medible. La sección multiplicadora del PMT, consiste de  $N$  etapas iguales, cada etapa se basa en el fenómeno de emisión secundaria de electrones, es decir, los electrones emitidos por el fotocátodo son acelerados hasta impactar con la superficie de un electrodo (dinodo) ocasionando la reemisión de  $\delta$  ( $\delta \approx 1$ ) electrones. Entre cada dinodo se coloca una diferencia de potencial para acelerar los electrones y repetir el proceso. De esta forma se obtiene una ganancia ideal de  $\delta^N$ . Finalmente estos pulsos son amplificados por un preamplificador y los convierte en una señal analógica proporcional a la intensidad de los mismos.

## Multicanal

La función básica de un multicanal es la conversión analógica-digital y el registro de memoria. Es decir una vez convertida una señal analógica (amplitud del pulso) en una digital equivalente, el MCA busca la dirección de memoria asignada (canal) a la amplitud digitalizada y aumenta en uno el contenido de esa dirección, este proceso se denomina conteo. Se configuro el MCA en 2048 canales, donde cada canal representa una tensión de alrededor de 5 mV.

## Resultados y discusión

### Espectros

Se registraron, por medio de un analizador multicanal, los espectros de emisión gamma de las siguientes muestras radiactivas:  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{22}\text{Na}$  e  $^{88}\text{Y}$ . Las muestras cuya emisión se logró detectar fueron  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{60}\text{Co}$  y  $^{137}\text{Cs}$ , ya que las demás tenían una actividad muy baja en relación al fondo. Esto se explica teniendo en cuenta los tiempos de semidesintegración  $T_{1/2}$  que se presentan en la tabla: se ve de ésta que las muestras que presentan baja actividad son aquellas con menor  $T_{1/2}$  y que, por lo tanto, contienen menor cantidad de material radiactivo que aún no ha decaído. En las Fig. 7 y 8 se presentan los espectros obtenidos para las tres

muestras mencionadas, a los cuales se les descontó un fondo ambiente. En el caso del espectro del  $^{137}\text{Cs}$ , se ven claramente las regiones asociadas al efecto fotoeléctrico y al efecto Compton. También se observa un pico de retrodispersión y un pico debido a rayos X. No se produce creación de pares debido a que la energía del fotón es menor a 1,022 MeV.

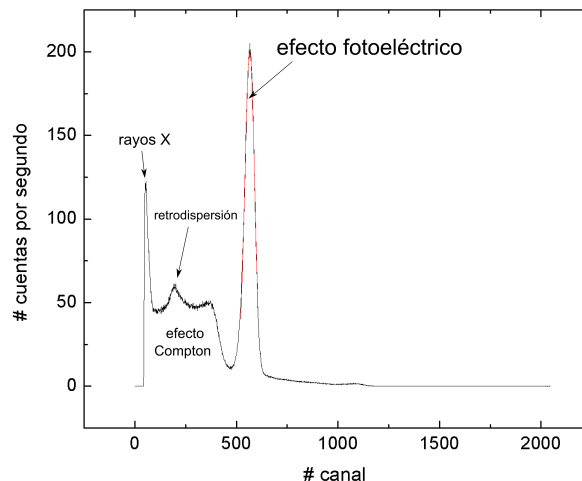


Figura 7: Espectro medido para la muestra de  $^{137}\text{Cs}$ .

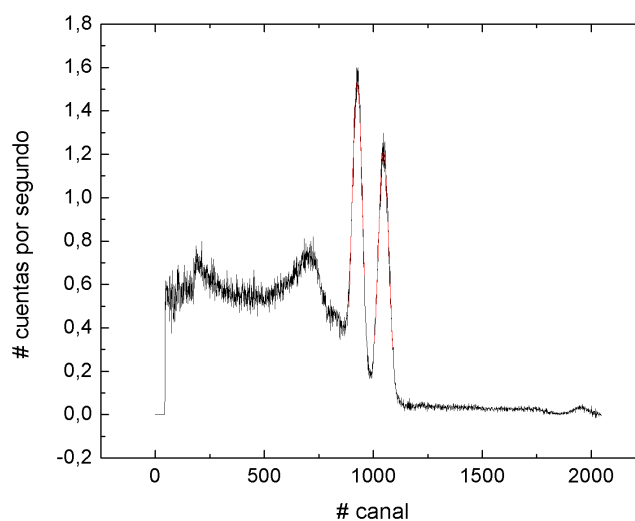


Figura 8: Espectro medido para la muestra de  $^{60}\text{Co}$ .

Para el caso del espectro del  $^{60}\text{Co}$ , se observan dos picos de emisión asociados al efecto fotoeléctrico, donde el de menor energía se encuentra montado sobre la zona de efecto Compton asociada al de mayor energía (según la Tabla 10, las intensidades de ambos son equivalentes). La posición de los picos del efecto fotoeléctrico se obtuvo realizando un ajuste de los mismos con curvas gaussianas, a través de la posición de su centro.

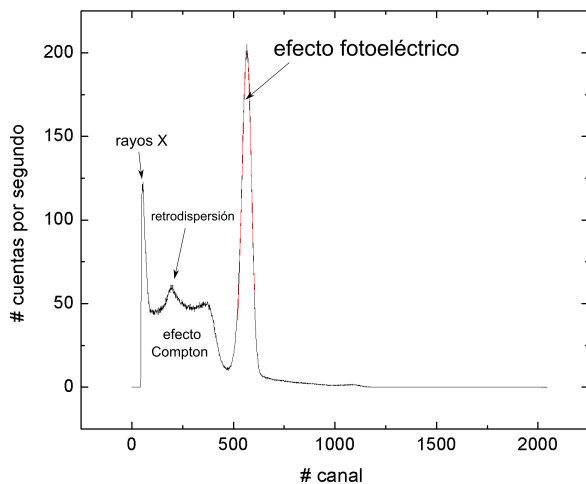
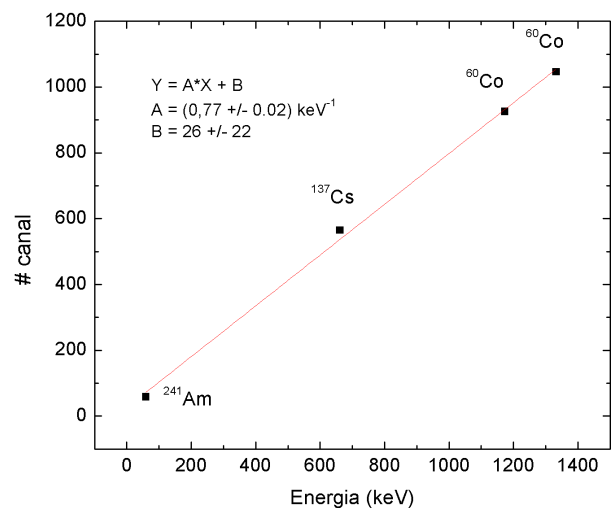
Figura 9: Espectro medido para la muestra de  $^{241}\text{Am}$ .

Figura 11: Recta de calibración del analizador multicanal.

### Calibración

A partir de las energías de la radiación gamma emitida (Tabla 10), se realizó una calibración del multicanal, a fin de relacionar el número de canal con los valores de energía.

| Muestra           | $T_{1/2}$   |
|-------------------|-------------|
| $^{241}\text{Am}$ | 432,2 años  |
| $^{57}\text{Co}$  | 271,79 días |
| $^{60}\text{Co}$  | 5,2714 años |
| $^{137}\text{Cs}$ | 30,07 años  |
| $^{203}\text{Hg}$ | 46,612 días |
| $^{54}\text{Mn}$  | 312,3 días  |
| $^{22}\text{Na}$  | 2,6019 años |
| $^{88}\text{Y}$   | 106,65 días |

Figura 10: Tiempos de semidesintegración de las muestras utilizadas.

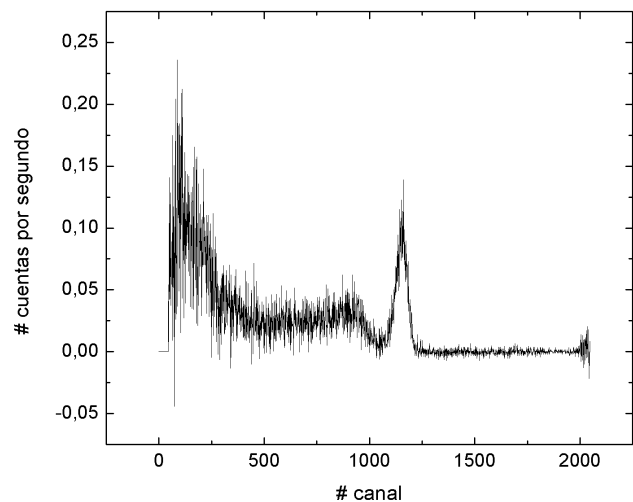
Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 11. Se observó que la relación entre la energía y el número de canal es lineal.

### Espectro de radiación gamma emitida por $^{40}\text{K}$

Se registró el espectro de radiación gamma emitido por el  $^{40}\text{K}$  presente en la sal *light* de mesa. Para ello se colocaron paquetes de esta sal alrededor del detector. El espectro se presenta en la Fig. 12. A través de la calibración obtenida en el apartado anterior y de la tabla de energías de los rayos gamma emitidos por el  $^{40}\text{K}$ , se calculó el número del canal asociado, corroborando que el pico correspondía a este isótopo.

### Retrodispersión y blindaje

Para observar el efecto de retrodispersión, se midió un espectro utilizando la muestra de  $^{137}\text{Cs}$  y colocando un

Figura 12: Espectro medido para la sal light de mesa. Alrededor del canal 1150 se observa un pico asociado al isótopo  $^{40}\text{K}$ .

ladrillo de plomo detrás de la misma, como se muestra en la Fig. 13. Para la parte de blindaje, se colocó el ladrillo de plomo entre la muestra de  $^{137}\text{Cs}$  y el detector. En la Fig. 14 se presenta el espectro registrado, donde no se le descontó el fondo utilizado en los espectros anteriores, dado que la presencia del ladrillo de plomo modificaba la contribución del ambiente.

### Conclusión

Se observó una relación lineal entre el número de canal y la energía de emisión. Se observó la emisión de la sal *light*, proveniente de la presencia del isótopo  $^{40}\text{K}$ .

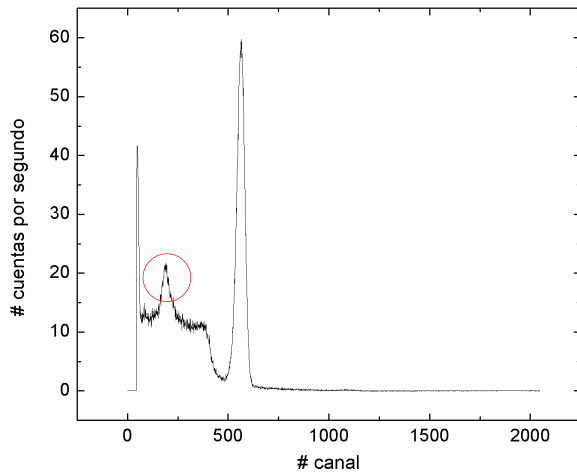


Figura 13: Espectro medido para el  $^{137}\text{Cs}$  con un ladrillo de plomo ubicado detrás de la muestra. Se observa que el pico asociado a la retrodispersión es mayor en relación a la Fig. 12.

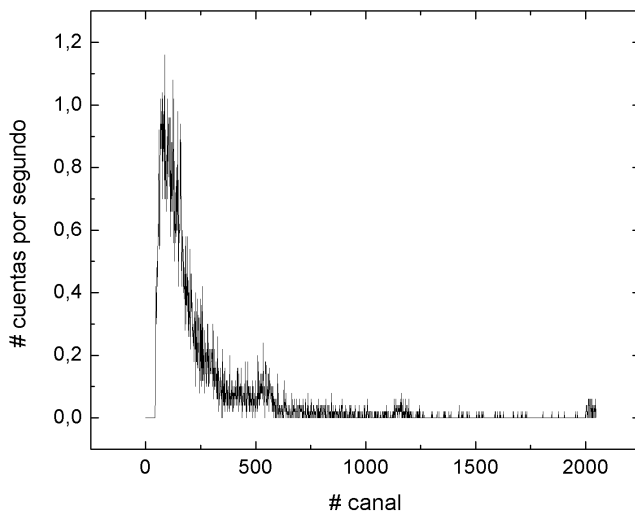


Figura 14: Blindaje. Espectro medido para el  $^{137}\text{Cs}$  con un ladrillo de plomo ubicado entre la muestra y el detector. Se observa la atenuación general en el número de cuentas por segundo en relación a la Fig. 13, con lo que el plomo resulta un buen escudo de rayos gamma.

## Referencias

- [1] Glenn F. Knoll - *Radiation Detection and Measurement*, 3rd Ed. - John Wiley & Sons, Inc.