

Técnicas Espectroscópicas para el Estudio de la Radiación Gamma

Laboratorio 5 - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA

Ramiro Severino, Joaquín de Jesús

2 de Octubre de 2015

Resumen

En este trabajo se estudió la radiación gamma emitida por distintas fuentes con actividad radiactiva: Sodio, Cobalto, Bismuto, Bario y Cesio. A partir de la medición del espectro de energía de las mismas, se pudieron encontrar los fotopicos mas importantes de cada una de las muestras y estimar un valor de energía en el cual se encuentran. Además, se determinó una aproximación de la actividad de cada una de las muestras. Por último, se realizó una caracterización de distintos instrumentos de medición y se estudió el ruido de fondo para determinar la influencia de este en las mediciones realizadas.

1. Introducción

1.1. Radiación Gamma

Algunos elementos en la naturaleza emiten por sí solos distintos tipos de radiación electromagnética, producto de procesos cuánticos en los núcleos. Uno de esos tipos es la radiación gamma. Este tipo de radiación electromagnética se produce a partir de decaimientos en los núcleos de los átomos. Los más comunes son los decaimientos de nucleones (protones y neutrones), que resultan en una variación del número atómico del elemento en algunos casos; los átomos cambian de «identidad» por un corto período de tiempo. Este nuevo átomo queda en un estado excitado que, al volver a su estado fundamental emite radiación gamma. También, se puede producir radiación gamma por aniquilación electrón-positrón, es decir, una aniquilación materia-antimateria. La radiación gamma está caracterizada principalmente por la alta energía que lleva y por el hecho de que es radiación *ionizante*, es decir que penetra los materiales profundamente. Este proceso es utilizado por los instrumentos de medición, sobre los cuales hablaremos mas adelante. En este trabajo vamos a estudiar la emisión de esta radiación por algunos elementos particulares: ^{22}Na , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{207}Bi . Como ejemplo de producción de radiación gamma, tomemos el caso del Cobalto (ver figura 1) en decaimiento β^- y la aniquilación $e^- - e^+$ (ver figura 2).

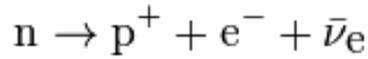


Figura 1: Proceso de decaimiento del Cobalto que produce radiación gamma. En el núcleo, se produce un decaimiento β^- , en el que un neutrón se convierte en protón y emite un electrón y un antineutrino. Notemos que esto hace que cambie la identidad del átomo (pues su número de protones es ahora 28) siendo ahora Niquel. Este Niquel queda en un estado excitado y al volver al fundamental, emite radiación gamma, básicamente fotones

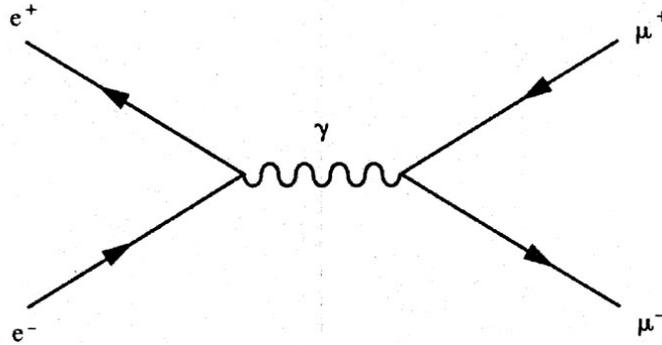


Figura 2: Proceso de aniquilación electrón-positrón, el fotón generado decae nuevamente en un par electrón positrón. Una aniquilación es una mitad del diagrama.

1.2. Procesos estocásticos, distribución de Poisson

Dado que este proceso de decaimiento es un proceso puramente cuántico, está ligado a probabilidades; es un proceso lo que se dice *estocástico* o *aleatorio*. En general, cada elemento radiactivo tiene una cierta probabilidad de decaer o no. Podemos pensar que el átomo está *decidiendo* en cada instante si va a decaer o no. En probabilidades, esto se corresponde con una distribución de tipo *binomial*. ¿Qué significa esto? Que existe una forma de calcular cuál es la probabilidad de que ocurra un cierto número de decaimientos, considerando éxitos (decaimientos) y fracasos (no decaimientos) y cuál es la probabilidad de cada uno de esos sucesos. Obviamente, conocer esas probabilidades individualmente es muy trabajoso y prácticamente incalculable (e incluso, innecesario). Una forma de pensar el problema mejor, es considerar que, para cada átomo del elemento, la probabilidad de decaer es muy chica, pero dado el número de átomos en un trozo de material radiactivo, los eventos son mucho más apreciables. Según la teoría de las distribuciones de probabilidad, en el límite de muchos eventos con probabilidad baja estamos ante una distribución de Poisson, que sigue la ecuación

$$P(\mu t, k) = \frac{(\mu t)^k e^{-\mu t}}{k!} \quad (1)$$

donde t es el tiempo en segundos, k es el número de éxitos (decaimientos) en un segundo y μ es la *actividad* de la muestra, medida en Becquerel o $\frac{\text{decaimientos}}{\text{segundo}}$. Es decir, tenemos una forma cerrada de conocer la probabilidad de un dado número de decaimientos. Contando la cantidad de fotones en

un segundo y realizando un histograma de los datos, podríamos en teoría reconstruir la actividad de la muestra.

1.3. Interacción de la radiación gamma con los materiales: centelladores y fotomultiplicadores

Como ya expusimos anteriormente, la radiación emitida por las muestras radiactivas es del tipo gamma que es altamente ionizante. En la medición, vamos a aprovechar esta propiedad resultando en que mediremos pulsos de voltaje. Los *centelladores* son materiales que exhiben luminiscencia cuando pasa radiación ionizante por ellos. Esto sucede porque el material absorbe parte de la energía que recibe, excitando los átomos y éstos al decaer al estado fundamental emiten fotones. En la práctica, utilizamos un centellador de Ioduro de Sodio dopado con Talio. Con la energía proporcionada por el fotón incidente, a través los efectos fotoeléctrico y Compton, se genera una lluvia de fotones ópticos que son luego captados por otros instrumentos como el fotomultiplicador. Es decir, que la *energía* de los fotones incidentes queda directamente relacionada con el *número* de fotones que salen del centellador. Recordemos los efectos fotoeléctrico y Compton:

- Efecto Compton: consideremos un fotón que incide sobre un material. Parte de la energía que lleva se utiliza en mover un electrón del mismo. En el estado final tras la interacción, tenemos un electrón con momento no nulo y un fotón que se desvía de su trayectoria original, pues pierde momento al interactuar con el electrón. En el centellador, este electrón excita la red cristalina, dando un numero nuevo de fotones ópticos. Además, el fotón con menos energía sigue interactuando Compton/fotoeléctricamente con el resto del material.
- Efecto Fotoeléctrico: en este efecto, se utiliza toda la energía de un fotón incidente para arrancar electrones del material y generar un electrón, que lleva todo el momento del fotón. Esto nuevamente excita la red, generando nuevos fotones ópticos.

Estos fotones generados por el cenetellador son recolectados por un *fotomultiplicador* (PMT). La función de este es emitir electrones a partir de la incidencia de cada fotón (entre 5 Y 10 en la mayoría de los PMT, aunque depende de forma no lineal con el voltaje). Estos luego son acelerados por una diferencia de potencial y chocan contra electrodos, generando nuevos electrones por emisión secundaria. Estos secundarios, mayor en cantidad por cada electrón primario, son nuevamente acelerados y así sucesivamente generando una cascada. Esto se traduce en un pulso de tensión que es proporcional a la energía del fotón incidente. Recolectando ese pulso de tensión para cada fotón incidente se obtiene el espectro deseado.

1.4. Espectroscopía: fotopicos y barrera Compton

Es importante saber cómo interpretar un espectro de rayos gamma. En general, se presenta lo que se dice un *fotopico* que corresponde a que TODA la energía del fotón incidente queda en el detector y una *barrera Compton*, que se da porque cuando se produce esta interacción el electrón deja toda su energía en el detector y el fotón desviado puede escapar del material. Esta barrera se produce a energías mucho menores que el fotopico. Obviamente, la relación entre las alturas relativas del fotopico y la barrera Compton estan directamente relacionadas con el tamaño del detector. Si este es muy grande, el fotón tiene menos probabilidad de escapar, reduciendo el tamaño de la barrera. Además, otros factores que influyen en la medición son la probabilidad de descargas secundarias por fotones Compton, el material que estamos usando y su capacidad de ionización, etcétera. En la figura 3 observamos un espectro típico de rayos gamma con un fotopico y barrera Compton.

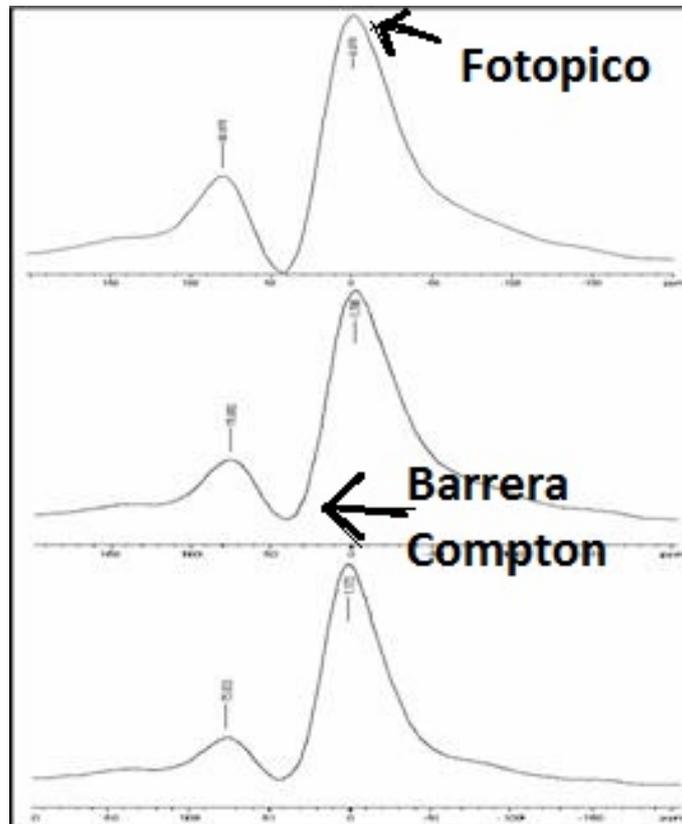


Figura 3: *Espectro gamma esperado. Notemos que previo al fotopico, se ve una bajada notable: la barrera Compton. Vamos a identificar un pico sólo cuando sea visible la barrera Compton.*

2. Desarrollo Experimental

La electrónica utilizada durante el experimento se muestra en la figura 4

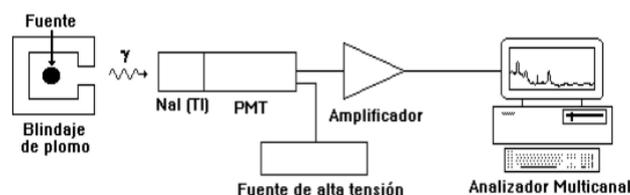


Figura 4: *Diagrama ilustrativo de los materiales y su disposición*

La fuente se encontraba rodeada de una caja de plomo (ver figura 5), para evitar cualquier escape de radiación, que dadas las altas energías, pueden ser dañinas. En las muestras que utilizamos, la radiación no es altamente nociva pero sí lo es bajo exposición prolongada.

Antes de empezar a discutir las conexiones, introducimos el RACK (ver figura 6), una serie de aparatos electrónicos dispuestos en fila. Las señales que vamos a captar del PMT son pulsos de voltaje muy bajos. Por eso, fue necesario pasarlos por un sistema de amplificación. En el rack también se encuentran varias fuentes de alta tensión para alimentar el PMT, nosotros utilizamos la fuente HV Power Supply Canberra 3102D. Usamos dos centelladores Harshaw NaI(Tl). El amplificador usado fue el 2022 también de Canberra. Es importante destacar que la configuración de amplificación es lo más importante del trabajo, tomándose un tiempo para encontrar la calidad óptima de parámetros que permitieran minimizar el ruido y al mismo tiempo amplificar la señal de manera apreciable. Los parámetros utilizados fueron:

- Coarse Gain(ganancia gruesa)=1 K

- Fine Gain(ganancia fina)=0,59
- Shaping time(tiempo de integración)= $8 \mu s$



Figura 5: Vista trasera del PMT. Se observan los cables de alta tensión y la salida al amplificador. Además, se ve el blindaje de plomo donde se incluyó la muestra.



Figura 6: El rack, donde están los aparatos de amplificación y las fuentes de alta tensión.

La fuente de alta tensión se conecta directamente al PMT y, con cables BNC, se conecta una salida al amplificador. De este amplificador se conecta directamente a la PC donde se realizó la adquisición de datos con una placa National Instruments 6210 y se controló la misma utilizando una rutina de MatLab. Una vez realizada la conexión, se prendió la fuente a 1,4 kV, se colocaron las muestras en el blindaje y se procedió a medir las distintas muestras. Es muy importante destacar que una vez que se configuró el experimento, se debe medir siempre de la misma forma, sin cambiar ninguno de los parámetros de amplificación. Esto puede llevar a conclusiones erróneas, especialmente a la hora de la calibración voltaje-energía, sobre la cual hablaremos más en detalle luego.

Una segunda parte del experimento consistió en la medición del ruido de fondo para poder comparar distintos centelladores. La conexión que se realizó fue exactamente igual, sólo que sin muestra en el blindaje.

3. Resultados y Análisis

3.1. Análisis de la señal de ruido

Pusimos a medir los centelladores en ausencia de muestras radiactivas para poder analizar la señal de ruido de fondo de los mismos. A los dos se los dejó midiendo 5 minutos, manteniendo los parámetros de amplificación y alimentación de alta tensión siempre iguales, siendo estos *Coarse Gain*=1k, *Fine Gain*= 590, *Shaping*= $8\mu seg$ y la alimentación de 1,43kV. Dichos parámetros fueron

los mismos que utilizamos para medir los espectros de las muestras. Los resultados se ven en la figura 7.

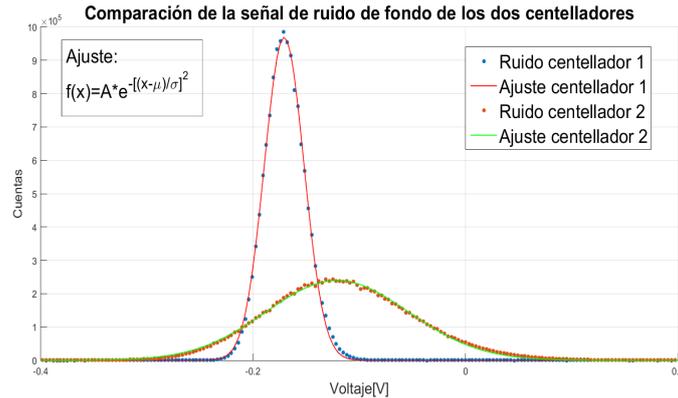


Figura 7: Comparación de la señal de ruido de los centelladores 1 y 2. Los puntos azules representan la señal del 1 y los naranjas la señal del 2. La línea roja representa el ajuste gaussiano hecho sobre la campana del centellador 1 y la línea verde el ajuste hecho sobre el centellador 2. Es fácil ver que la señal del centellador 2 es mas dispersa que la del centellador 1

Observando la figura 7 se puede ver a simple vista que la señal de ruido del centellador 1 es mas acotada, o menos dispersa, que la señal de ruido del centellador 2. Esto nos dice que es conveniente utilizar el centellador 1 para realizar las mediciones ya que la influencia de su señal de fondo sobre las mediciones es menor que la del centellador 2.

Para realizar una comparación cuantitativa, realizamos un ajuste gaussiano del tipo

$$f(x) = Ae^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2)$$

sobre las campanas de ambos dispositivos, como se aprecia en la figura 7. El resultado del ajuste arrojó $\sigma_1 = 0,0264 \pm 0,0002$ para el centellador 1 y $\sigma_2 = 0,0950 \pm 0,0007$ para el 2. Haciendo $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 3,6$ vemos que la dispersión del centellador 2 es 3,6 veces la del centellador 1, reforzando la conclusión del párrafo anterior sobre la conveniencia de usar el centellador 1 para medir.

3.2. Espectros de energía

Colocamos muestras de distintos elementos radiactivos con el fin de poder medir sus espectros de emisión de energía. Con el centellador 2 medimos los espectros del ^{133}Ba , ^{207}Bi , ^{137}Cs , y ^{22}Na , mientras que con el centellador 1 medimos el del ^{207}Bi y ^{137}Cs .

Lo que obtuvimos como datos, para cada muestra, fue un espectro en voltaje, que es lo que mide la placa de adquisición utilizada. Lo que hicimos para cada elemento fue aislar cada pico del espectro en voltaje, realizar un ajuste gaussiano como el de la ecuación (2) y utilizar al parámetro μ del ajuste como la posición del pico de voltaje. En la figura 8 pueden verse los espectros de las muestras radiactivas que medimos con los distintos centelladores, y los correspondientes ajustes gaussianos en cada pico. Usando los valores de energía tabulados, podemos corresponder cada pico de voltaje con un valor de energía, y poder realizar así un gráfico *Energía de los picos vs. Voltajes de los picos* y posteriormente, un ajuste lineal. De esta manera, podemos obtener una relación $E = a + bF$, donde E es energía, F es el voltaje del fotopico, a es la ordenada y b la pendiente del ajuste. Este proceso de calibración energía-voltaje lo hicimos para los dos centelladores, como se ve en la figura 9.

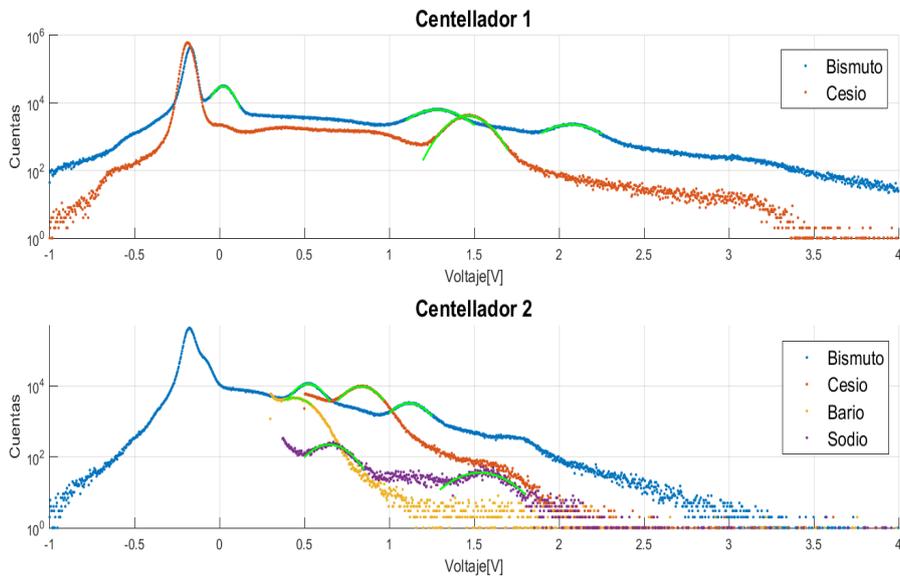


Figura 8: Espectros en voltaje de los distintos elementos medidos con los centelladores. Las líneas verdes corresponden a los ajustes gaussianos hechos sobre las campanas de cada pico para poder obtener así su posición.

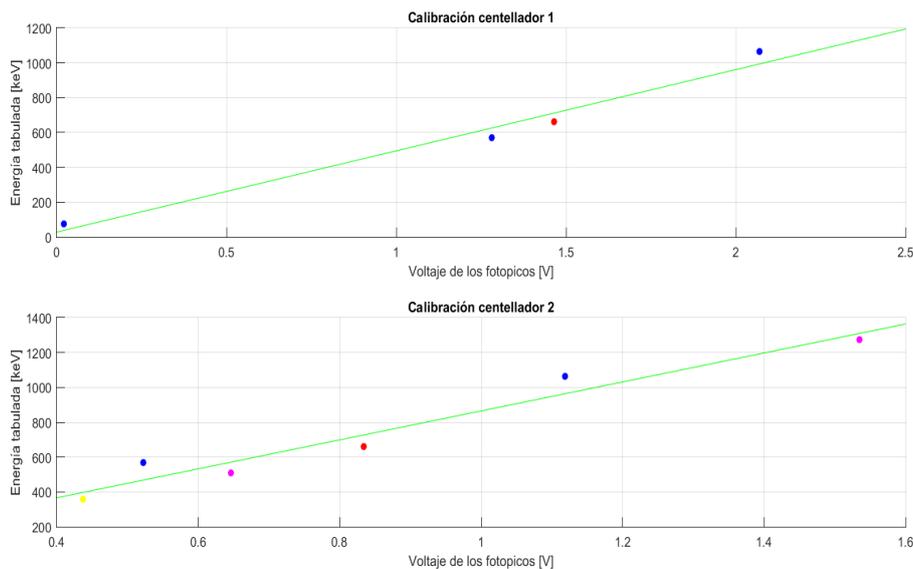


Figura 9: Calibraciones voltaje-energía para los dos centelladores. Los puntos azules representan los valores del ^{207}Bi , el rojo el del ^{137}Cs , los violetas el del ^{22}Na y el amarillo el del ^{133}Ba . Se dibuja en verde el ajuste lineal.

Una vez realizadas las conversiones a energía, pudimos obtener los espectros de emisión. Aprovechando que los espectros del ^{207}Bi y del ^{137}Cs fueron medidos con ambos centelladores, podemos comparar la medición de los mismos y ver si el hecho de medir con distintos centelladores afecta el espectro. Los resultados se ven en las figuras 10 y 11.

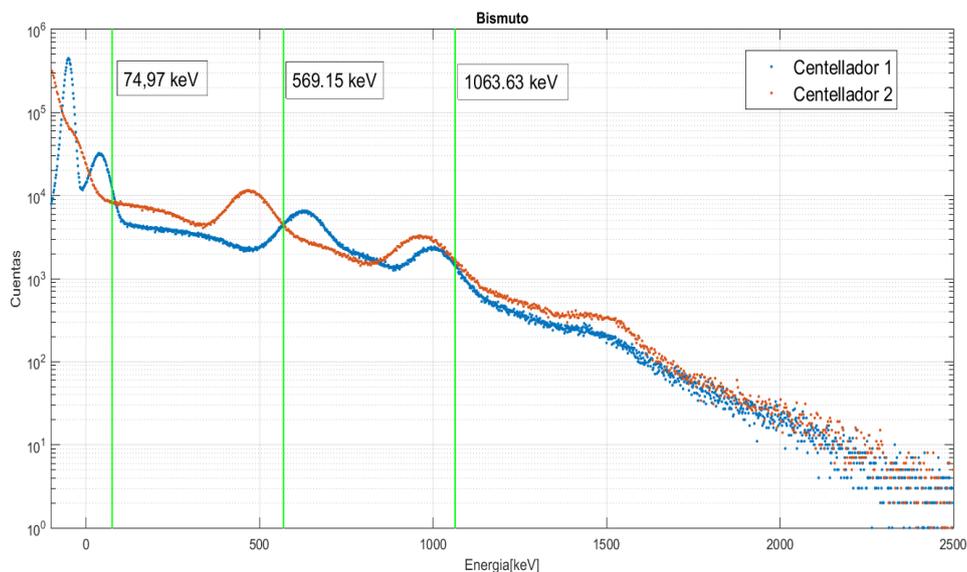


Figura 10: Espectro del ^{207}Bi medidos con los dos centelladores. En azul se grafica el espectro medido con el centellador 1 y en naranja con el centellador 2. Las líneas verticales verdes son los valores tabulados de los picos de energía.

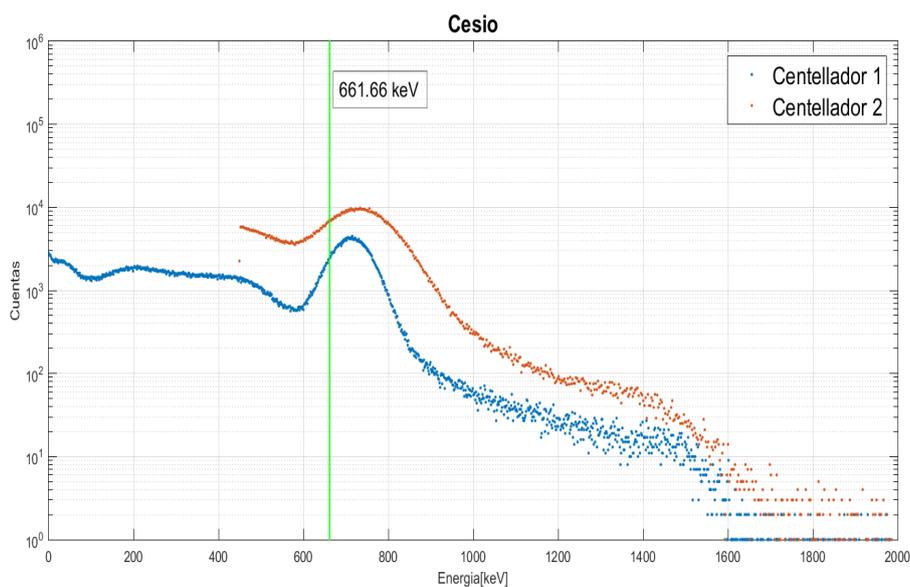


Figura 11: Espectros del ^{137}Cs medidos con dos centelladores distintos. En azul se grafica el espectro medido con el centellador 1 y en naranja con el centellador 2. La línea vertical verde es el valor tabulado del pico de energía.

Lo primero que uno puede decir observando la figura 11 es que las posiciones de los picos de energía están relativamente próximas cuando se miden los espectros con distintos centelladores, pero no coinciden con los valores tabulados. Para el caso del Bismuto (fig. 10), hay dos cuestiones para remarcar. La primera es que las posiciones de los picos de energía no coinciden entre sí, y tampoco con los valores tabulados. En el caso del pico de $569,15\text{eV}$ esto se hace más evidente, ya que el valor de energía del centellador 1 es más grande que el tabulado (está a la derecha de la línea verde), mientras que el del centellador 2 es más chico (está a la izquierda de la línea verde). Para hacer un análisis cuantitativo se puede ver la tabla de la figura 12. Allí se ve que las mayores diferencias entre los valores tabulados y los ajustados son los del centellador 2, aunque es posible explicar esto teniendo en cuenta que, a diferencia del centellador 1, para la calibración del 2 se tuvieron en cuenta

mas muestras (la de Bario y Sodio) que las del Cesio y el Bismuto. En segundo lugar, en el caso del Bismuto (figura 10), hay un hecho que llama todavía mas la atención, y es que el centellador 1 parece poder captar un fotopico de baja energía que el centellador 2 no (el pico de $74,97keV$). Creemos poder explicar este hecho observando la figura 13, que muestra la influencia del ruido en la medición del pico de bajo voltaje. Se decidió graficar el eje horizontal en voltaje, que es la medición directa, para evitar cualquier influencia o distorsión que una eventual mala calibración de energía-voltaje pudiera ocasionar.

Muestra	Voltaje fotopico [V]	Energía tabulada[keV]		Energía ajustada [keV]		Diferencia energía [keV]	
		Cent 1	Cent 2	Cent 1	Cent 2	Cent 1	Cent 2
Bi	Pico 1	0.02	-	74.97	38.4	-	36.57
	Pico 2	1.28	0.52	569.15	625.9	467.9	56.75
	Pico 3	2.07	1.11	1063.63	993.6	963.2	70.03
Cs		1.46	0.83	661.66	711.5	726.9	49.84

Figura 12: Tabla para analizar las diferencias entre los picos de energía tabulados y los obtenidos mediante el ajuste para ambos centelladores. La última columna es la diferencia de energía entre el valor tabulado y el valor ajustado.

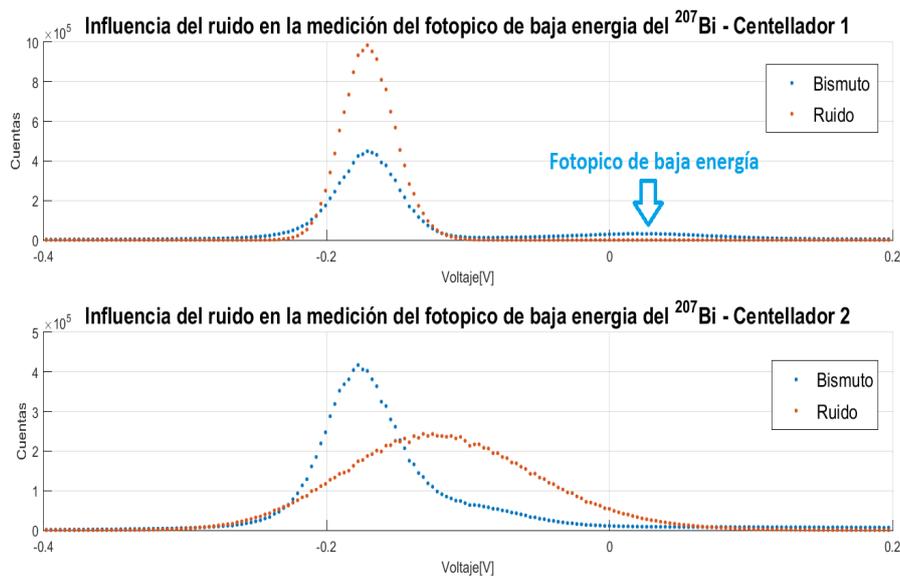


Figura 13: Influencia del ruido en la medición del fotopico de baja energía del ^{207}Bi . En azul se grafica la medición del bismuto y en naranja la señal de ruido de fondo, es decir, la señal del centellador en ausencia de muestras radiactivas. Arriba: centellador 1. Abajo: centellador 2

Es posible apreciar en la figura 13 que en el centellador 1 las campanas de ruido tanto en ausencia de muestras como en presencia de la muestra de Bismuto parecen coincidir en valor medio y en ancho, aunque no coinciden en altura, ya que la campana naranja es mas alta, lo cual es esperable ya que la placa de adquisición adquiere un número fijo de muestras por segundo (250000 por segundo), y en el caso del bismuto ese número fijo debe dividirse no solo en picos de ruido sino también en pulsos que contribuyen a los fotopicos característicos del elemento.

Sin embargo, algo distinto sucede con el centellador 2 (figura 13 - gráfico de abajo). La campana naranja (ausencia de muestras) es mas baja que la azul (muestra de Bismuto), y sus valores medios

son claramente distintos. A esto se le suma una deformación en la bajada derecha de la campana azul. Lo que creemos que está pasando aquí es que la campana de la señal de ruido de fondo (señal naranja) es tan ancha, que se está superponiendo con el fotopico de baja energía, lo que hace por un lado que la campana azul sea mas alta que la naranja, pues tanto la señal de ruido como el fotopico de baja energía contribuyen a su altura, y por el otro, que se distorsione la bajada derecha de la campana azul.

3.3. Análisis de la actividad temporal del ^{137}Cs y ^{207}Bi

La idea es, para cada uno de los fotopicos del Bismuto (3 fotopicos) y el Cesio (1 fotopico) ver cuántas veces por ventana temporal (en nuestro caso, por medio segundo) el centellador nos envía una señal que se corresponda con el fotopico en estudio. Esto nos dará una idea de cuántas veces por medio segundo la muestra emite fotones de esa energía. Como dijimos anteriormente, el criterio utilizado para identificar la posición de cada fotopico del espectro fue aislar cada campana y ajustarla con una función gaussiana, de manera que el parámetro μ nos da la posición del pico. Lo que buscamos en esta instancia es poder discriminar de la señal de voltaje, en cada medio segundo de medición, cuántas veces nos llega un pulso que podamos identificar como una contribución al fotopico. El criterio que usamos para hacer esa identificación fue ver, para cada medio segundo de medición, cuántos picos del voltaje cumplen $\mu - \sigma < V < \mu + \sigma$, donde μ y σ son los parámetros del ajuste del fotopico, y V es el voltaje de la señal del centellador. Los resultados se ven en las figuras 14 y 15.

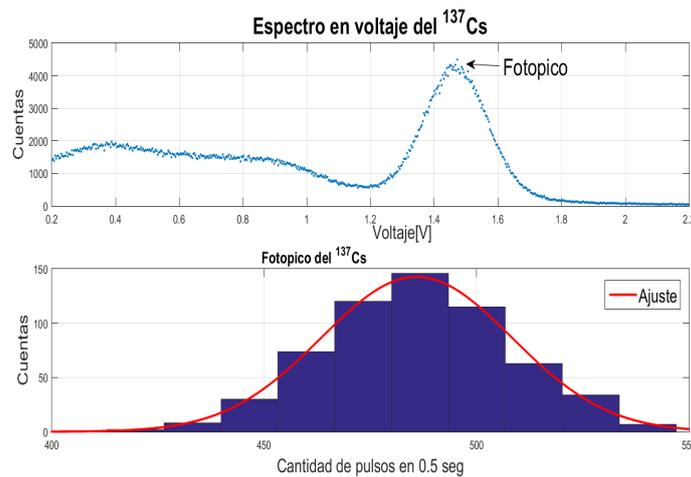


Figura 14: Arriba: Espectro en voltaje del ^{137}Cs . Abajo: Histograma del fotopico del Cesio. El eje horizontal es la cantidad de pulsos de voltaje recibidos en medio segundo de medición que podemos identificar como contribuciones a la altura del fotopico. En rojo se dibuja el ajuste gaussiano.

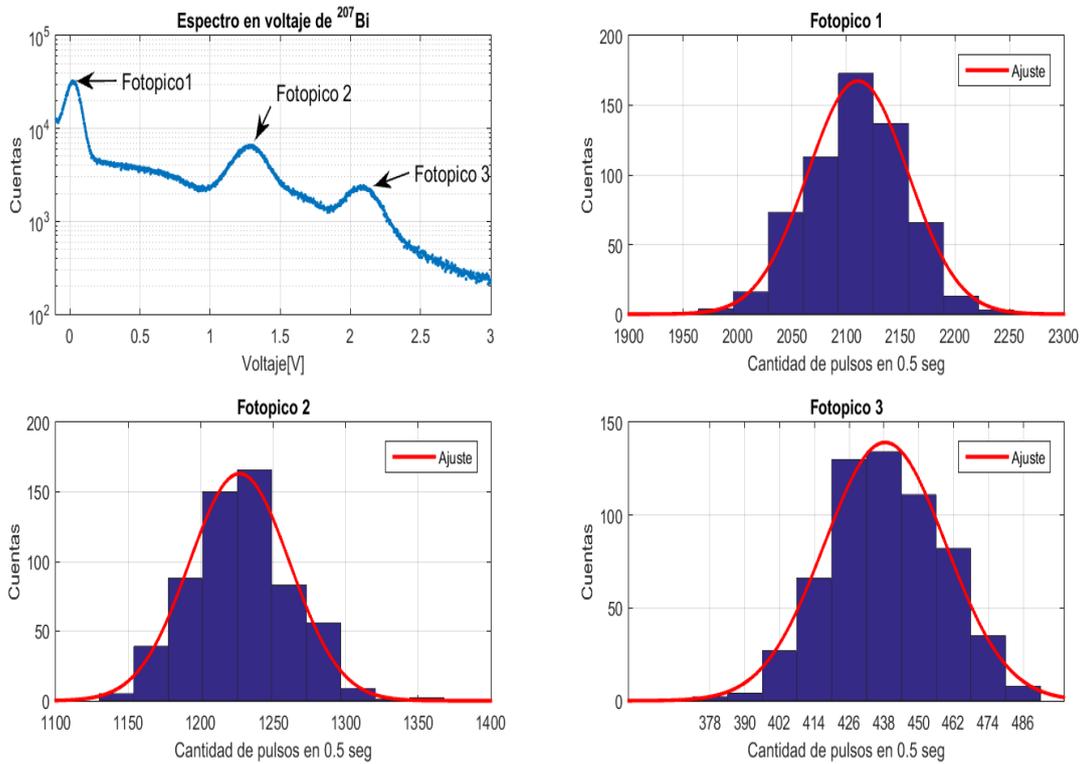


Figura 15: El espectro en voltaje del ^{207}Bi es el medido con el centellador 1 y su eje vertical está en escala logarítmica. Histogramas de los fotopicos del Bismuto. En rojo se dibuja el ajuste gaussiano hecho sobre los histogramas.

Para poder estimar las actividades temporales de las muestras se decidió realizar un ajuste gaussiano (ecuación (2)) sobre los histogramas de las figuras 14 y 15, asumiendo que estamos en el régimen en el que la distribución de Poisson es aproximable por una gaussiana. El ajuste sobre el histograma de la figura 14 arrojó $\mu = 485,9 \pm 1,1$ y $\sigma = 31,79 \pm 1,53$. Haciendo $\frac{485,9}{0,5\text{seg}} = \frac{971,8}{\text{seg}}$ y $\frac{31,79}{0,5\text{seg}} = 63,58$, podemos decir que la actividad estimada de fotones de energía asociada a ese fotopico de la muestra es de $(971,8 \pm 63,58) \frac{1}{\text{seg}}$ ¹. Repetimos lo mismo para los 3 fotopicos del Bismuto, arrojando una actividad de $(4222 \pm 130,34) \frac{1}{\text{seg}}$ para el fotopico 1; de $(2454 \pm 98,16) \frac{1}{\text{seg}}$ para el fotopico 2 y de $(876,8 \pm 63,58) \frac{1}{\text{seg}}$ para el fotopico 3.

4. Conclusiones

Del análisis de las señales de ruido de fondo, podemos concluir que es conveniente utilizar el centellador 1 para medir los espectros de energía ya que la campana de ruido del centellador 2 es 3,6 veces mas ancha que la del centellador 1, influyendo así en las mediciones de los fotopicos de baja energía. Esto último se pone de manifiesto en el hecho de que el centellador 1 es capaz de resolver un pico de baja energía del Bismuto que el centellador 2 no puede, como se deduce de las figuras 10 y 13.

Por otra parte, un hecho importante de remarcar es que las posiciones de los fotopicos del Cesio y el Bismuto son diferentes dependiendo de si se mide el espectro con uno u otro centellador, como se evidencia en las figuras 11 y 10. Observando la tabla de la figura 12 vemos que las mayores diferencias entre valores tabulados y ajustados de energía se dan para el centellador 2, aunque esto es explicable sabiendo que para la calibración del centellador 2 se tuvieron en cuenta más muestras que para el centellador 1.

¹Hay que ser cuidadoso aquí: no estamos en realidad contando la cantidad de fotones con determinada energía que llegan al centellador, sino la cantidad de veces por segundo (por medio segundo en realidad) que el centellador nos envía un pulso de voltaje que podemos identificar como una contribución a la campana del fotopico en cuestión.

Por último, para el caso del Cesio y el Bismuto pudimos calcular de forma estimada la actividad de la muestra que contribuye a cada fotopico. Obtuvimos que la actividad de la muestra de Cesio que contribuye al fotopico es de $(971,8 \pm 63,58) \frac{1}{seg}$, mientras que para el Bismuto es de $(4222 \pm 130,34) \frac{1}{seg}$ para el primer fotopico (el de mas baja energía que pudimos captar), de $(2454 \pm 98,16) \frac{1}{seg}$ para el segundo y de $(876,8 \pm 63,58) \frac{1}{seg}$ para el tercero (el de mas alta energía que pudimos captar).

Referencias

APUNTE TEÓRICO - <http://materias.df.uba.ar/labo5ba2015c2/guias-2/>