

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Familiarización con la Instrumentación Nuclear

Instrumentación Nuclear

Pedro Luis Epalza Castillo
Juan David Hernández Pineda
Miguel Augusto Rojas Jiménez
Andrés Felipe Pinzón Harker

Profesor:

Luis Fernando Cristancho Mejia

Universidad Nacional de Colombia
Bogotá D.C.
Facultad de Ciencias
10 de febrero de 2025

Introducción

En esta práctica experimental, se obtuvo experiencia en el uso de instrumentación típica en materia de investigación nuclear para el estudio de diferentes materiales radiactivos según norma *Nuclear Instrumentation Module* (**NIM**), se verifica el uso de la electrónica en cada etapa de de caracterización de material. Esta práctica se encuentra enmarcada en la clase *Instrumentación Nuclear* a cargo del profesor *Fernando Cristancho* para el semestre 2024-II.

En la caracterización se utilizó principalmente un centellador de NaI de $3\text{in} \times 3\text{in}$ durante diferentes términos de tiempo Δt sobre materiales de actividad γ : ^{137}Cs , ^{60}Co y ^{22}Na . Se estudió el espectro completo identificando cada rango de radiación característica del material y detallando mediciones de interés. A continuación, se presenta el análisis elaborado en base a las mediciones obtenidas por el técnico a cargo.

1. Caracterización Espectroscópica

El espectro característico de cada pico se ajustará según la formula $f(x)$ dado en conteos/ Δt , donde x es el canal como

$$f(x) = A \exp \left\{ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} + a_0 + a_1x, \quad (1.1)$$

donde A es la amplitud en conteos/ Δt , μ la media en canales (posteriormente en eV), σ la desviación estándar en canales, a_0 y a_1 dado en cuentas y cuentas/canales es el ajuste lineal de fondo no ambiental sino dado por las diferentes formas de radiación.

1.1. Espectro ^{60}Co

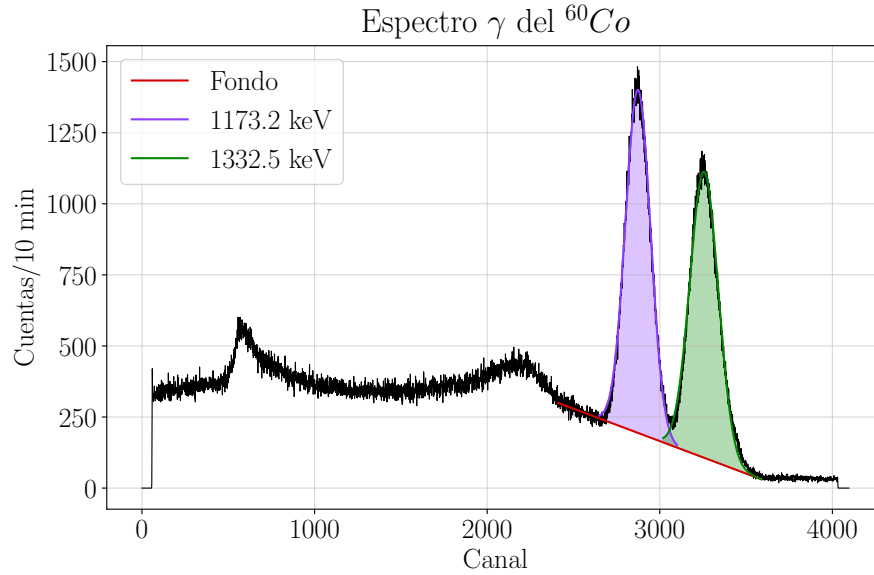


Figura 1: Espectro γ para el ^{60}Co por medición con Centelleador NaI procesada sin fondo ambiental.

A partir de la fig. 1, se identifican inmediatamente los picos de radiación característica del ^{60}Co ubicados contiguos posterior al espectro Compton [1] en las energías 1173.2 keV (pico 1) y 1332.5 keV (pico 2), las dos características de transición gamma por núcleo excitado luego del decaimiento a ^{60}Ni por radiación β^- con más del 99 % del decaimiento total. Se ajusta la distribución gaussiana a estos picos de radiación (véase fig. 2) y se obtienen los resultados dados en la tabla 1.

Parámetro	Pico 1	Pico 2	Unidad
a_0	850	850	cuentas
a_1	-0.23	-0.23	cuentas/canal
μ	2874	3257	canal
σ	72	81	canal
A	1208	1010	cuentas
FMWH	170	191	canal
I_{ajuste}	2.19×10^5	2.06×10^5	canal \times cuentas
I_{real}	2.18×10^5	2.05×10^5	canal \times cuentas

Tabla 1: Tabla de parámetros de los ajustes gaussianos para Pico 1 de 1173.2 keV y Pico 2 de 1332.5 keV.

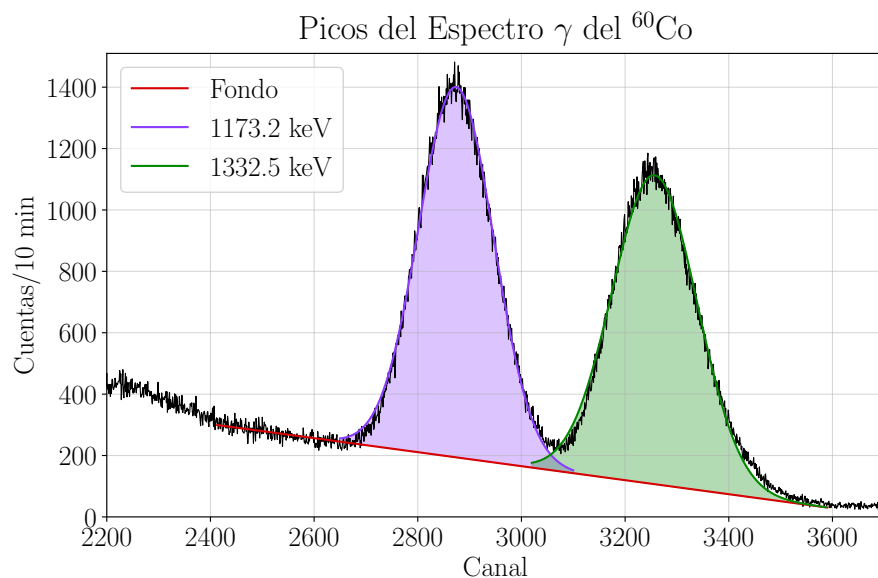


Figura 2: Picos de radiación característica del ^{60}Co ajustados según distribución gaussiana dadas por tabla

1.2. Espectro ^{137}Cs

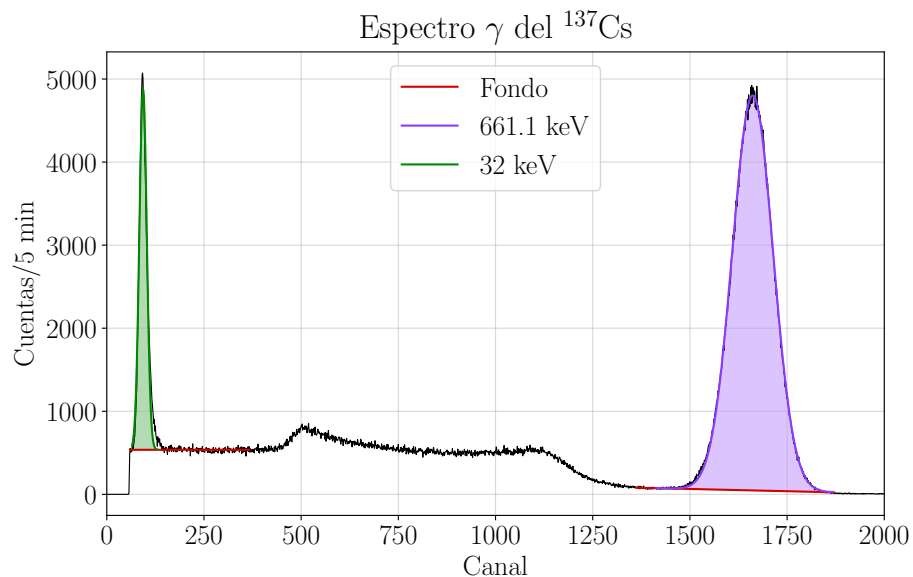


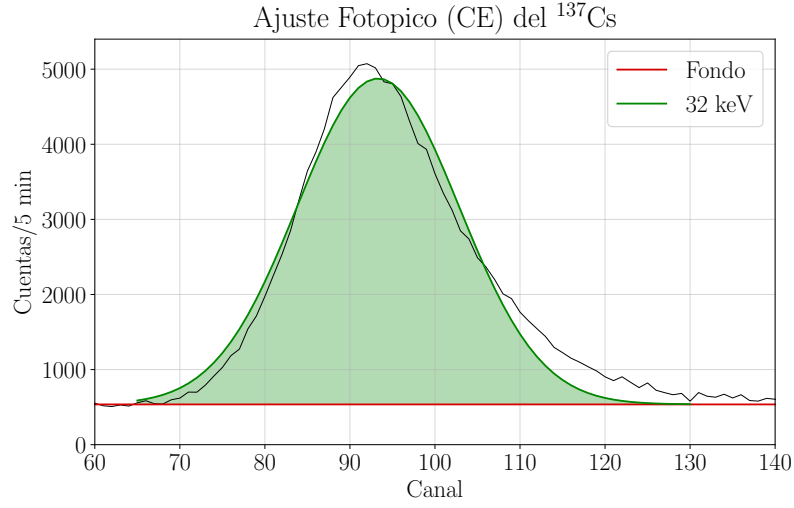
Figura 3: Espectro γ para el ^{137}Cs por medición con Centelleador NaI procesada sin fondo ambiental.

A partir de la fig. 3, se identifican 2 picos de radiación característica del ^{137}Cs ubicados: en los primeros canales, el rango de los rayos X a 32 keV, se genera por captura electrónica del ^{137}Ba metaestable; el de mayor energía, por transición gamma del decaimiento. Se ajusta la distribución gaussiana a estos picos de radiación (véase fig. 4) y se obtienen los resultados

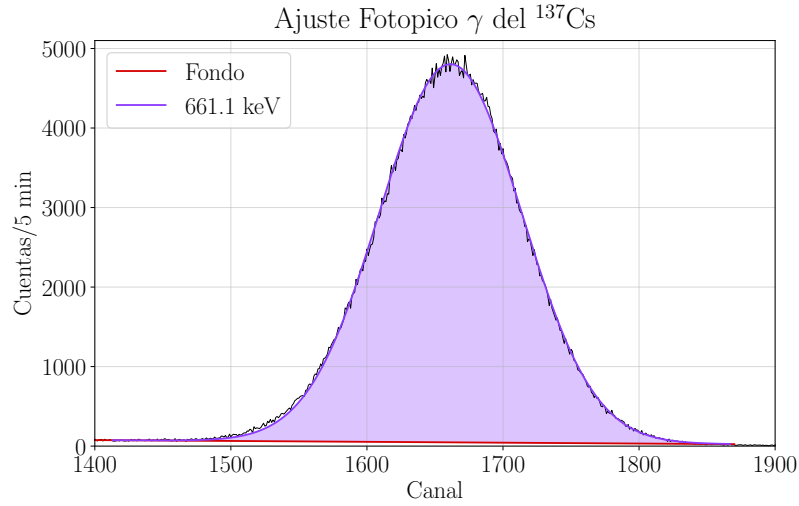
dados en la tabla 2.

Parámetro	Fotopico	Rayo X (^{137}Ba)	Unidad
a_0	227.33	536.23	cuentas
a_1	-0.11	0.00	cuentas/canal
μ	1661.50	93.40	canal
σ	52.38	10.38	canal
A	4755.99	4592.27	cuentas
FMWH	123.36	24.44	canal
I_{ajuste}	6.24×10^5	1.19×10^5	canal \times cuentas
I_{real}	6.28×10^5	1.18×10^5	canal \times cuentas

Tabla 2: Tabla de parámetros para Pico photopeak y Pico bario



(a) Fotopico de Captura Electrónica (CE) en Rayos X.



(b) Fotopico de transición γ .

Figura 4: Fotopicos del ^{137}Cs ajustados a distribución gaussiana.

1.3. Espectro ^{22}Na

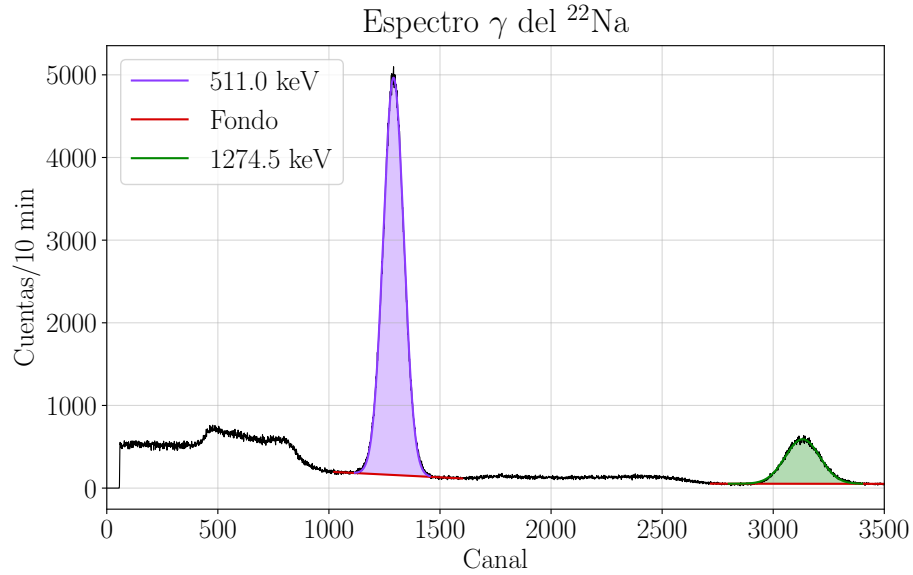
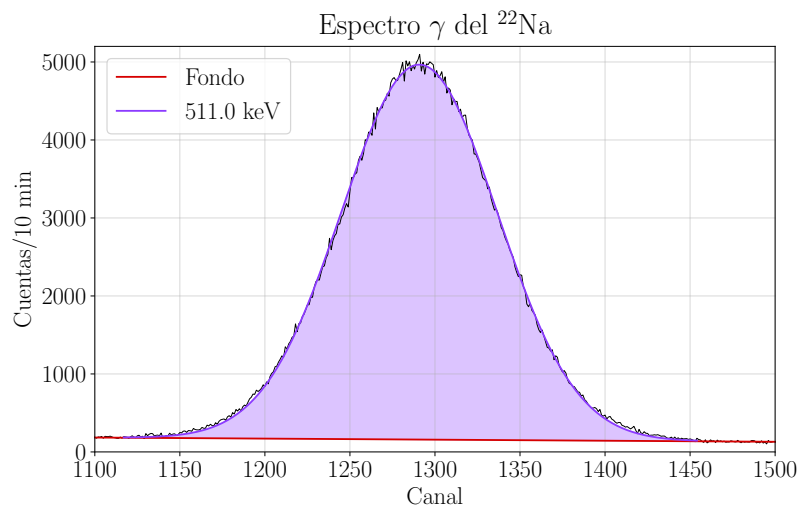


Figura 5: Espectro γ para el ^{22}Na por medición con Centelleador NaI procesada sin fondo ambiental.

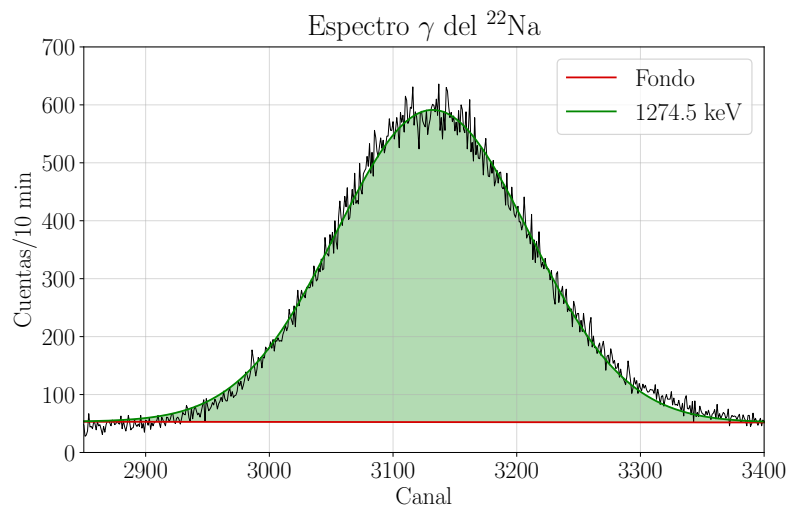
A partir de la fig. 5, se identifican 2 picos de radiación característica del ^{22}Na [1] ubicados posterior a Compton en: 511.0 keV, referentes a aniquilación de pares electro-positrón debida al decaimiento β^+ ; y en 1274.5 keV, debidos a transición γ por desexcitación. Se ajusta la distribución gaussiana a estos picos de radiación (véase fig. 6) y se obtienen los resultados dados en la tabla 3.

Parámetro	Pico 511 keV	Pico 1275 keV	Unidad
a_0	334	60	cuentas
a_1	-0.14	0	cuentas/canal
μ	1291	3132	canal
σ	45.8	78.0	canal
A	4807.44	538.84	cuentas
FMWH	108	184	canal
I_{ajuste}	5.52×10^5	1.05×10^5	canal \times cuentas
I_{real}	5.56×10^5	1.05×10^5	canal \times cuentas

Tabla 3: Tabla de parámetros para Pico 1 y Pico 2.



(a) Fotopico de Aniquilación de pares electrón-positrón en radiación γ .



(b) Fotopico de transición γ por decaimiento.

Figura 6: Fotopicos del ^{22}Na ajustados a distribución gaussiana.

2. Calibración Energía/Canal

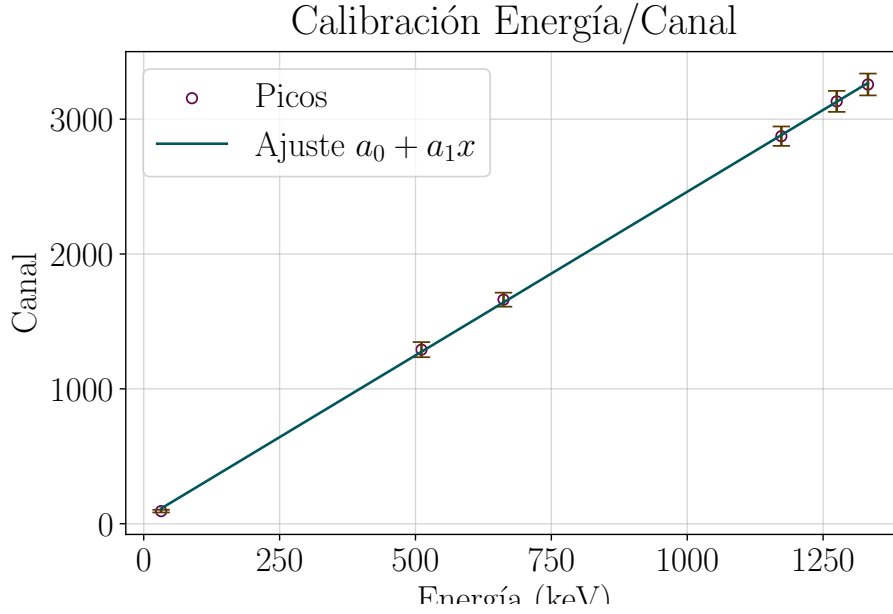


Figura 7: Calibración de los canales respecto la energía ajustada por por regresión lineal.

Parámetro	Valor Ajustado
a_0 (canales)	35(14)
a_1 (canales/keV)	2.427(15)

Tabla 4: Resultados de los Parámetros Ajustados Canal vs Energía.

Parámetro	Valor Ajustado
a_0 (keV)	-14(6)
a_1 (keV/canales)	0.4120(25)

Tabla 5: Resultados de los Parámetros Ajustados Energía vs Canal (función $E(\text{canal})$)

A partir de la tabla 4, podemos despejar los resultados 5 para obtener la función requerida E en función del canal x .

$$E(x) = 0.412(25)x - 14(6) \quad (2.1)$$

3. Error del ajuste $E(t)$

A partir del apéndice de referencia [2] de energías, se comparó con cada pico resultante del espectro (valor promedio μ_i), donde se establece una gran discrepancia con los valores más cercanos al rango de rayos X (radiación Captura Electrónica del ^{137}Cs), induciendo a pensar en un problema de medición en los valores fronterizos, además que fue esta la curva que

menos se ajustó aparentando un comportamiento diferente o corrido. En las otras distintas mediciones, los valores fueron lo suficientemente certeros como se esperaba.

E_γ (keV)	Canal	E_γ Ajuste (keV)	$\Delta = E_\gamma - E_\gamma$ Ajuste	% Error $\left(\frac{\Delta}{E_\gamma} \times 100\right)$
32.8	93.31	24.12	8.68	26.47 %
511.0	1290.83	517.54	-6.54	1.28 %
661.7	1661.50	670.27	-8.57	1.30 %
1173.2	2873.83	1169.80	3.40	0.29 %
1274.5	3132.02	1276.19	-1.69	0.13 %
1332.5	3257.15	1327.75	4.75	0.36 %

Tabla 6: Comparación entre la energía real y el ajuste de calibración.

4. Borde Compton y pico de retrodispersión

4.1. Evaluación en canales

Se distingue el borde Compton “a ojo” con certidumbre entre los canales C.2140 y C.2250 en lo que se ve existe el cambio brusco en los valores de energía (la punta), donde los valores de energía en ese rango oscilan, según ec. 2.1, entre

$$E_{C.2140} = 867(7) \text{ keV} \quad E_{C.2250} = 913(8) \text{ keV} \quad (4.1)$$

De la misma forma se detalla con cierta certidumbre que la retrodispersión de Compton se encuentra entre los canales C.540 y C.610, lo que traduce en energía por ec. 2.1 en

$$E_{C.540} = 208.1(59) \text{ keV} \quad E_{C.610} = 236.9(59) \text{ keV} \quad (4.2)$$

4.2. Valor teórico

El borde Compton es el punto de energía máxima de los electrones retrodispersados antes del pico principal, se observa como una caída brusca en la parte baja del espectro (justo antes de la meseta Compton). Para el cálculo del borde Compton se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_C = E_{\text{emax}} = E_1 \frac{2\epsilon}{1 + 2\epsilon} \quad \text{con } \epsilon = \frac{E_1}{m_e c^2} \quad (4.3)$$

Luego

$$E_C = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{511 \text{ keV}}} = \frac{1173 \text{ keV}}{1 + \frac{1173 \text{ keV}}{511 \text{ keV}}} = 356 \text{ keV} \quad (4.4)$$

Para el borde de 1332 keV se usa la ecu. 4.4 [3], dando como resultado aproximado de 369 keV. Para los picos de retrodispersión se usa:

$$E_R = E_\gamma - 180 \text{ keV} = 1173 - 180 \text{ keV} = 993 \text{ keV} \quad (4.5)$$

El valor del pico retrodispersado es de 209.8 keV, tomado de [1].

4.3. Gráfica Borde Compton

Se ilustran en

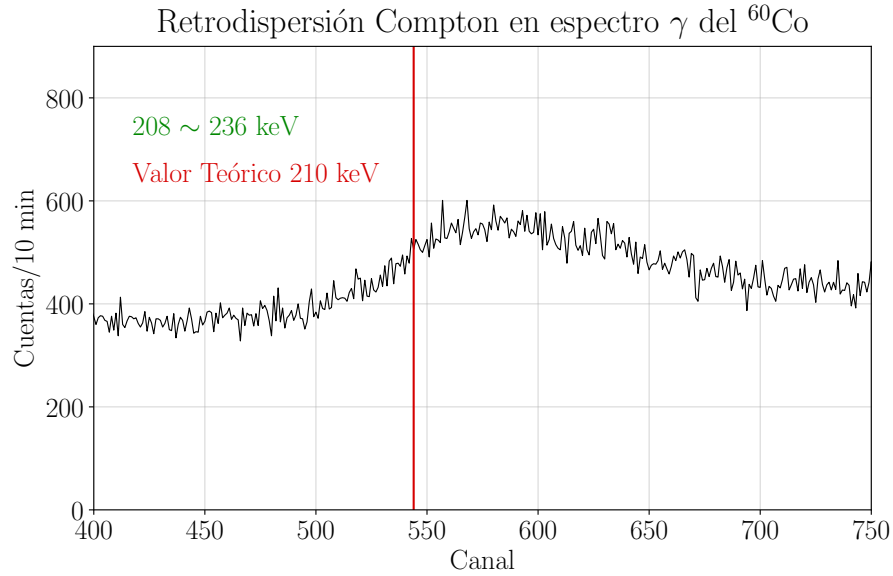


Figura 8: Retrodispersión de Compton en el ^{137}Cs ilustrado.

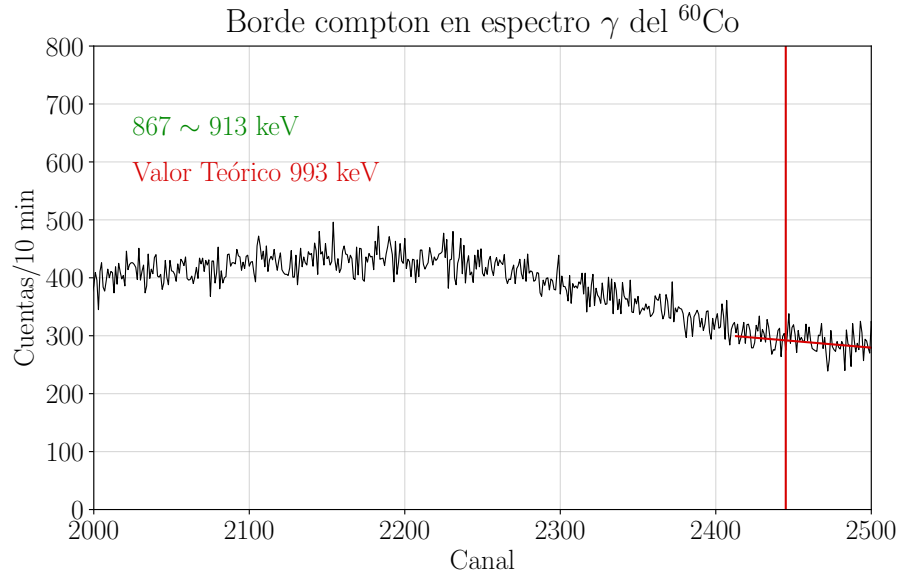


Figura 9: Borde Compton con la aproximación y lo esperado teórico.

5. Solamente para el ^{137}Cs :

Procedemos a determinar de cuentas asociadas al efecto fotoeléctrico el cual denominaremos N_f . Como sabemos que el pico debe estar alrededor de 662 keV se tomara un rango de valores de 650 a 670 canales.

En la medición anteriormente tomada se considera una distribución de Poisson la cual podemos establecer como se ve en la ecuación 5.1

$$\Delta N_f = \sqrt{N_f} \quad (5.1)$$

Este valor se ve limitado por fluctuaciones estadísticas. Cuyo valor se puede observar en la tabla 7.

Lo siguiente a considerar es el numero de cuentas en la región de Compton, la cual corresponde a la desperdicio de fotones dentro del detector antes de escapar o ser. El cual para el caso de ^{137}Cs : es de 300 a 600 canales. En este caso se llamara N_c en cual tiene un valor apreciado en la tabla 7.

En el caso de N_c es igual que en N_f en cuanto a el calculo de su incertidumbre y lo apreciamos en la ecuación 5.2.

$$\Delta N_c = \sqrt{N_c} \quad (5.2)$$

Con los anteriores valores respectivamente calculados, procedemos a hallar la razón de los valores N_c y N_f como se ve en la ecuación 5.3

$$r = \frac{N_c}{N_f} \quad (5.3)$$

Para el caso de la incertidumbre de r es mas elaborado y es como se expresa en la ecuación 5.4. Cuyo valor esta presentado en la tabla 7

$$\Delta r = \sqrt{\left(\frac{\Delta N_c}{N_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_f}{N_f}\right)^2} \quad (5.4)$$

Componente	Valor
LI Compton	300
LS Compton	600
NC (cuentas)	168675.00
Incertidumbre NC	410.70
Nf (cuentas)	11633.00
Incertidumbre Nf	168675.00
r	14.50
Incertidumbre r	0.14

Tabla 7: recolección de datos para el ^{137}Cs

6. Decaimiento del ^{22}Na y detección de 511; 1275 keV

6.1. Rayos gamma de 511 keV

Según el esquema de decaimiento del ^{22}Na , por cada rayo gamma de 1274.5 keV, ¿cuántos rayos gamma de 511 keV son emitidos?

Según el esquema mostrado en la página 15 de la guía de laboratorio [2], por cada rayo gamma de 1274.5 keV se emiten 2 rayos gamma de 511 keV, por aniquilación del positrón.

6.2. Valor de la razón teórica

El valor de la razón de:

$$R_{teo} = \frac{I_{\gamma}(511 \text{ keV})}{I_{\gamma}(1275 \text{ keV})} \quad (6.1)$$

Dado que por cada desintegración se generan dos fotones de 511 keV y un fotón de 1275 keV con una probabilidad de 90.3 %, las intensidades relativas son $I_{\gamma}(511 \text{ keV}) = 2$ y $I_{\gamma}(1275 \text{ keV}) = 0,903$. Realizando la sustitución en la ecu. 6.2 da como resultado $R_{teo} = 2.22$.

6.3. Valor de la razón experimental

Para determinar la razón experimental, R_{exp} , se usaron los datos de la tabla 3, así que:

$$R_{exp} = \frac{I_{\gamma \text{ exp}}(511 \text{ keV})}{I_{\gamma \text{ exp}}(1275 \text{ keV})} = \frac{5.56 \times 10^5}{1.05 \times 10^5} = 5.30 \quad (6.2)$$

6.4. Error experimental

Para determinar $\sigma(R_{exp})$ se calcula usando los valores de la tabla 3 y la propagación de errores:

$$\sigma(R_{exp}) = R_{exp} \sqrt{\left(\frac{\sigma(511)}{I_{\gamma \text{ exp}}(511)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(1275)}{I_{\gamma \text{ exp}}(1275)}\right)^2} \quad (6.3)$$
$$\sigma(R_{exp}) = 5.30 \sqrt{\left(\frac{45.8}{5.56 \times 10^5}\right)^2 + \left(\frac{78.0}{1.05 \times 10^5}\right)^2} = 0.0039$$

La incertidumbre es muy pequeña en comparación con el valor de R_{exp} , lo que indica que la medición es bastante precisa.

6.5. ¿Por qué la diferencia entre R_{teo} y R_{exp}

Las posibles causas del por qué la diferencia entre los valores teórico y experimental, pueden ser:

- Eficiencia del detector: No todos los fotones son detectados con la misma eficiencia, y los de mayor energía (1275 keV) pueden tener menor eficiencia de detección.
- Autoabsorción en la fuente: Parte de los fotones de 1275 keV pueden ser absorbidos antes de salir de la fuente.
- Geometría del detector: No se cubre un sólido de 4π , por lo que algunos fotones no llegan al detector. Teóricamente se supuso un detector perfecto, el cual no existe en la vida real.
- Ruido y fondo: Puede haber contribuciones de ruido en los conteos.
- Superposición de picos: Dependiendo de la resolución del detector, los picos pueden solaparse, afectando la precisión de la integración del área.

Referencias

- [1] M.-M. Bé, V. Chisté, C. Dulieu, E. Browne, C. Baglin, V. Chechev, N. Kuzmenko, R. Helmer, F. Kondev, D. MacMahon, and K. Lee, *Table of Radionuclides*, vol. 3 of *Monographie BIPM-5*. Pavillon de Breteuil, F-92310 Sèvres, France: Bureau International des Poids et Mesures, 2006.
- [2] F. C. Mejía, “Instrumentación nuclear. prácticas experimentales,” 1 2025.
- [3] F. C. Mejía, “Análisis de datos experimentales. notas de clase,” 11 2024.