



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



---

# **Análisis de un Espectrómetro de Rayos Gamma utilizando Detectores de Germanio de Alta Pureza**

---

**Isaí Raya Farías**

Universidad Michoacana de San Nicolás de  
Hidalgo

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas  
Posgrado en Ciencias en Ingeniería Física

Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en  
Ingeniería Física

Morelia, Mich. Noviembre 2021

## Asesora

**Dra. Nabanita Dasgupta Schubert**

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UMSHN

## Co-Asesor

**Dr. Vijay Raj Sharma**

Instituto de Física, UNAM

## Colaborador del Proyecto

**Dr. Luis Armando Acosta Sánchez**

Instituto de Física, UNAM

# Carta de Responsabilidades

---

## Declaración de Responsabilidad

- Declaro que mi tesis titulada “Análisis de Eficiencia de un Espectrómetro de Rayos Gamma usando Detectores de Germanio de Alta Pureza” es un trabajo original de mi investigación y ha sido escrita completamente por mí.
- Declaro que este trabajo de tesis de investigación no constituye en ninguna de sus partes un plagio del trabajo material o intelectual de ningún otro autor
- Declaro que esta tesis de investigación es prácticamente en su totalidad producto de mi trabajo, la contribución colaborativa ha sido indicada claramente y reconocida
- Declaro que este trabajo de tesis no contiene material que haya sido aceptado o presentado para obtener cualquier otro grado académico, otro título o diploma en una universidad o cualquier otra institución educativa superior distinta a la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo
- Declaro que se han proporcionado las debidas referencias sobre toda la literatura y los recursos de apoyo, respetando íntegramente el contenido científico de los trabajos aquí citados y que la presente tesis es original en su totalidad y no se deriva de ningún otro trabajo citado

Autor



Isai Raya Farias

Asesora



Nabanita Dasgupta – Schubert

Co-Asesor



Vijay Raj Sharma



# Carta de Responsabilidades social

---

A quien corresponda;

Por medio de la presente comunico que yo; Isáí Raya Farias con matrícula 0651624b perteneciente a la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Posgrado en Ingeniería Física de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, manifiesto mi compromiso y actividad social derivada de la obtención de mi grado de maestría en modalidad de tesis titulada; Análisis de un Espectrómetro de Rayos Gamma utilizando Detectores de Germanio de Alta Pureza, hago notar que este trabajo de investigación es muy importante para la física nuclear en particular la espectroscopia nuclear ya que permite calibrar un aparato sofisticado de detección de radiación que se utiliza en el análisis de muestras biológicas, secciones eficaces absolutas para residuos nucleares obtenidos por cualquier reacción nuclear y sirve para tener una caracterización de la radiación que el cuerpo humano puede absorber al estar expuesto a una fuente radioactiva.

Sin otro asunto que tratar quedo a sus apreciables ordenes

Atentamente

*Isáí Raya Farias*



Nombre y Firma



# Abstract

---

Modern gamma ray spectrometry systems include high-resolution, high-purity germanium (HPGe) detectors; in addition, electronic components are connected to a computer system with data acquisition system to process gamma ray spectra. With a gamma-ray spectrometer, the determination of efficiency is very important for the analysis of nuclear reactions and decay analysis as well as the analysis of biological and environmental samples of target nuclear material. My project concerns how to calibrate spectra and calculate gamma-ray spectrometer efficiency with known standard sources. Gamma Ray spectrometers installed with single-crystal HPGe detectors were tested in two different laboratories, at the Inter University Accelerator Centre (IUAC), India and at the Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), Mexico. Data from known standard sources ( $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , etc.) were recorded used the CANDLE software developed by IUAC, New Delhi, India, calibrate the spectra and measure the area under the gamma peaks of known standard sources, in addition, the area under the peak was incorporated to determine the efficiency of the spectrometer. Calculations will be presented in Chapter 3, Chapter 4, Appendix A.4, and A.10.

**Keywords:** Absolute Efficiency, Intrinsic Efficiency, HPGe detectors, Energy Calibration, FWHM.



# Resumen

---

Los sistemas modernos de espectrometría de rayos gamma incluyen detectores de germanio de alta resolución y pureza (HPGe). Los componentes electrónicos están conectados a un sistema informático con un sistema de adquisición de datos para procesar los espectros de rayos gamma. En un espectrómetro de rayos gamma, la determinación de la eficiencia es muy importante para el análisis de reacciones nucleares y muestras biológicas.

Este proyecto se refiere cómo calibrar la energía de un detector y calcular las eficiencias (absoluta e intrínseca) de espectrómetros con fuentes estándares conocidas. Estos espectrómetros de rayos gamma instalados con detectores HPGe mono-cristalinos se probaron en dos laboratorios diferentes, en el Inter University Accelerator Centre (IUAC), Nueva Delhi, India y en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), Toluca, México. Los datos de las fuentes estándares conocidas ( $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , etc.) se registraron utilizando el software CANDLE desarrollado por IUAC, se calibraron los espectros y se midió el área bajo los picos gamma de fuentes estándares conocidas, además, se incorporó el área bajo el pico de energía para determinar la eficiencia del espectrómetro. Los cálculos se presentarán en el capítulo 3, 4, y apéndice A.4 y A.10.

**Palabras claves:** Eficiencia absoluta, Eficiencia intrínseca, Detectores HPGe, Calibración de energía FWHM.



# Agradecimientos

---

Quiero agradecer de una manera muy especial:

- A mis padres; Héctor y Paulina, por su apoyo, cariño y comprensión el cual me han brindado en todo momento.
- Al Dr. Héctor Raya Ruiz, por la revisión de la estructura y gramática de este trabajo.
- A mi familia: Paulina, Andrés, Paulet, Elena, Itzel, Héctor, Lupita y Lis, los cuales fueron mi motivación para terminar esta etapa de mi formación.
- A Conacyt por apoyo mediante su beca.
- Al instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) Toluca, Mexico y al Inter University Accelerator Centre (IUAC) Nueva Delhi, India por los datos que se me proporcionaron para poder realizar este trabajo.
- Al Dr. Rakesh Kumar del Inter University Accelerator Centre (IUAC) por facilitarme el software CANDLE para los detalles y datos experimentales.
- A mis asesores Dr. Vijay Raj Sharma y Dra. Nabanita Dasgupta-Schubert por darme la confianza de realizar este trabajo, por la paciencia, motivación y aprecio que tuvieron hacia mi durante este tiempo.
- A todos mis maestros del posgrado en Ingeniería Física, en especial al Dr. Gonzalo Viramontes y la Dra. Mary Carmen Peña los cuales han tenido un favorable impacto en mi formación académica.

- Al grupo del laboratorio de Biofísico-química y Radiación,
- A los Doctores, miembros de mi mesa de grado por tomarse el tiempo de revisar y hacerme sugerencias valiosas para entregar un producto de buena calidad.

# Índice general

---

<b>Carta de Responsabilidades</b>	<b>III</b>
<b>Carta de Responsabilidades social</b>	<b>V</b>
<b>Abstract</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>XI</b>
<b>Índice general</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Detección de Rayos Gamma . . . . .	4
1.2 Interacciones de Rayos Gamma con la Materia . . . . .	5
1.2.1 Absorción Fotoeléctrica . . . . .	5
1.2.2 Dispersión Compton . . . . .	7
1.2.3 Producción de Pares . . . . .	10
<b>2 Características de los Detectores</b>	<b>15</b>
2.1 Eficiencia de los Detectores . . . . .	15
2.2 Resolución de Energía . . . . .	17
2.3 Análisis de la señal de un Detector . . . . .	18
2.3.1 Pre-Amplificador . . . . .	19
2.3.2 Amplificador . . . . .	20
2.3.3 Convertidor de señal Análoga a Digital . . . . .	21
2.3.4 Analizador MultiCanal . . . . .	21
2.4 Cancelación de polo-cero y restauración de la línea base	22
2.5 Walk y Jitter . . . . .	22

2.6	Discriminador (método de selección de tiempo) . . . . .	23
2.7	Breve información de detectores HPGe . . . . .	24
2.7.1	Detector de Diodos de Silicio . . . . .	26
2.7.2	Detectores de Germanio . . . . .	28
2.8	Montaje experimental . . . . .	30
2.9	Incertidumbres experimentales . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Calibración de Energía</b>	<b>33</b>
3.1	Calibración de Energía . . . . .	35
3.2	Calibración: Detector de Silicio . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Eficiencia Absoluta e Intrínseca de los Detectores</b>	<b>51</b>
4.1	Eficiencia Absoluta . . . . .	51
4.2	Eficiencia Intrínseca . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Conclusiones &amp; Trabajos a Futuro</b>	<b>71</b>
<b>A</b>	<b>Apéndice</b>	<b>75</b>
A.1	Tablas de Calibración de Energía . . . . .	75
A.2	Tablas de calibración Eficiencia Absoluta . . . . .	75
A.2.1	Eficiencia Absoluta para el HPGe1 . . . . .	75
A.2.2	Eficiencia Absoluta HPGe 2 . . . . .	84
A.3	Tablas de la Eficiencia Intrínseca . . . . .	87
A.3.1	Eficiencia Intrínseca HPGe1 . . . . .	87
A.3.2	Eficiencia Intrínseca del HPGe2 . . . . .	95
A.4	Tablas de valores de los ajustes . . . . .	95
A.5	Radioactividad . . . . .	99
A.5.1	Ley de constante radioactivo . . . . .	101
A.6	Vida media y principal . . . . .	105
A.6.1	Vida media . . . . .	105
A.6.2	Actividad Radioactiva . . . . .	109
A.7	Cálculo de la Eficiencia Absoluta . . . . .	111
A.8	Distribución Gaussiana . . . . .	112
A.9	Origen y CANDLE . . . . .	115
A.10	Detectores de Silicio . . . . .	116

**Bibliography**

**117**



Las fuentes radiactivas proporcionan un medio conveniente para probar y calibrar detectores que son herramientas esenciales tanto en el laboratorio de física nuclear como en el de altas energías. Por tanto, es necesario conocer los procesos nucleares básicos en fuentes radiactivas antes de empezar a trabajar en el laboratorio. Los núcleos pueden sufrir una variedad de procesos que resultan en la emisión de radiación de alguna forma. Podemos dividir los procesos en dos categorías: radioactividad y reacciones nucleares. En una transformación radioactiva, el núcleo se desintegra espontáneamente en una especie diferente de núcleo o en un estado de energía menor del mismo núcleo o con la emisión de radiaciones de algún tipo. La mayoría de las fuentes de radiaciones encontradas en el laboratorio son de este tipo. En una reacción nuclear, el núcleo interactúa con otra partícula o núcleo con la subsiguiente emisión de radiación como uno de sus productos finales. En muchos casos. Además, algunos de los productos son núcleos que se someten aún más a la desintegración radiactiva. La radiación emitida en ambos procesos puede ser electromagnética o corpuscular. La radiación electromagnética consiste en rayos X y rayos gamma, mientras que la emisión corpuscular incluye partículas alfa, partículas beta y positrones. Cada tipo de radiación se caracteriza por un espectro de energía que es indicativo del proceso nuclear que proviene. Además, una fuente radiactiva puede emitir varios tipos diferentes de radiación al mismo tiempo. Esto puede deberse al hecho de que el isótopo nuclear en cuestión sufre varios modos diferentes de desintegración. La física nuclear experimental es un campo en crecimiento marcado por múltiples avances (propiedades, interacciones, formaciones de estructuras nucleares etc.). A medida que aumenta el interés por estudiar las diversas propiedades de los estados de los núcleos, se requiere herramientas de mejor resolución y eficiencia, por ejemplo; si analizamos el resultado de

una reacción nuclear, este puede ser la emisión de rayos gamma (dependiendo del rango de energía), estos rayos son un tipo de energía ionizante, y los más energéticos dentro del espectro electromagnético, con energías que van de los cientos de keV a unos pocos MeV, para medir estos rayos ocupamos un detector de radiación gamma, que puede medir los rayos gamma característicos de estas reacciones nucleares de manera eficiente y además que sea capaz de resolver picos de energía cercanos (con muy buena resolución).

El aumento en la demanda de detectores de alta resolución y mejor eficiencia dio paso a los detectores de semiconductores, seguido de los de germanio de alta resolución (HPGe), como el que utilizamos en este trabajo y más recientemente los detectores clover (es un detector de rayos gamma que consta de cuatro cristales coaxiales de Germanio (Ge) de alta pureza).

Los detectores de semiconductores tienen una alta resolución de energía en comparación con los detectores de centelleo, siendo la razón principal que el número de portadores de carga formados es mayor en muchos órdenes de magnitud que en los semiconductores de centelleo. La resolución de energía del detector de centelleo es pobre, ya que el número de portadores de carga creados por el en una interacción de radiación típica no es tan grande. Un número pequeño de fluctuaciones estadísticas impone una limitación inherente a la resolución de energía que se puede lograr, con las mejoras en las circunstancias y no se puede hacer nada para mejorar la resolución energética más allá de este punto. Debido a la gran cantidad de portadores de carga generados por los detectores de semiconductores, esto provoca una reducción en las fluctuaciones inherentes del número de portadores de carga, que finalmente son la fuente de información de contenido energético en las radiaciones. Otra ventaja de los detectores de semiconductores sobre los de centelleo es que no se adaptan fácilmente a aplicaciones que implican radiaciones más penetrantes, por otro lado, los detectores HPGe son de fácil adaptación ya que tienen una región de volumen activo mucho más grande la cual resulta del alto grado de pureza de estos y el alto número atómico ( $Z=32$ ) del germanio (Ge).

El siguiente avance en este proceso son los detectores clover (trébol), para



(a) Detector HPGe



(b) Detector clover

**Figura 1.1:** Muestran dos tipos de detectores de radiación gamma de alta resolución de lado izquierdo (a) y del lado derecho (b).

superar las diversas limitaciones asociadas con los HPGe como una menor eficiencia de foto-pico, ensanchamiento Doppler de los picos, y daño por neutrones. El detector clover consta de cuatro detectores de Ge de tipo n-coaxiales dispuestos como cuatro hojas de trébol. Cada cristal puede considerarse como un detector independiente con una salida independiente. Una fotografía típica de los detectores HPGe y Clover se muestran en la figura 1.1.

En el presente trabajo se realizó un estudio adecuado sobre la calibración y eficiencia (absoluta, geométrica e intrínseca) de los detectores HPGe y clover (solo un cristal) de las fuentes conocidas ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  y  $^{241}\text{Am}$ ). Además, incorporamos el detector de silicio para la detección de partículas que fueron calibradas con una fuente conocida triple alfa con las fuentes de ( $^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Am}/^{244}\text{Cm}$ ). Vale la pena comprender cómo se pueden detectar los rayos gamma e interactuar con el material que se presenta en la siguiente sección.

## 1.1. Detección de Rayos Gamma

como en la estructura de la capa de electrones del átomo, el núcleo también se caracteriza por niveles de energía discretos. La transición entre estos niveles se puede realizar mediante la emisión o absorción de radiación electromagnética de la energía correcta, es decir, con una energía igual a la diferencia de energía entre los niveles que participan en la transición. Las energías de estos fotones, que van desde unos pocos cientos de keV hasta unos pocos MeV, caracterizan la alta energía de unión de los núcleos. Estos fotones de alta energía se han denominado históricamente rayos gamma, y átomos similares, muestran líneas espectrales características del núcleo emisor. La mayoría de las fuentes gamma se colocan en estados excitados como resultado de la desintegración beta, aunque los estados nucleares excitados a menudo también se crean en las reacciones nucleares. Dado a que los electrones y el positrones se absorben más fácilmente en la materia, las partículas beta en dicha fuente se pueden filtrar envolviéndolas con suficiente material absorbente dejando solo los rayos gamma más penetrantes.

La detección de rayos X y gamma no es un proceso directo, los fotones de rayos X y gammas no tienen carga intrínseca, por lo tanto, no crean ionización o excitación directa en el medio, por el que pasan directamente, la manera de medir estos fotones es críticamente dependiente de hacer que el fotón experimente una interacción donde transfiere todo o parte de su energía a un electrón en el material absorbente. Los fotones incidentes crean primero electrones rápidos estos tendrán una energía máxima igual a la energía del fotón incidente, este electrón, se ralentizará y perderá su energía de la misma manera que cualquier otro electrón rápido. Debido al hecho de que los fotones son invisibles para el detector; un detector debe tener un par de funciones específicas, la primera es actuar como un medio en el que se tendrá un alta probabilidad de que un rayo gamma incidente interactúe dentro de ese medio, la segunda función es para detectar con precisión los electrones rápidos que se crean.

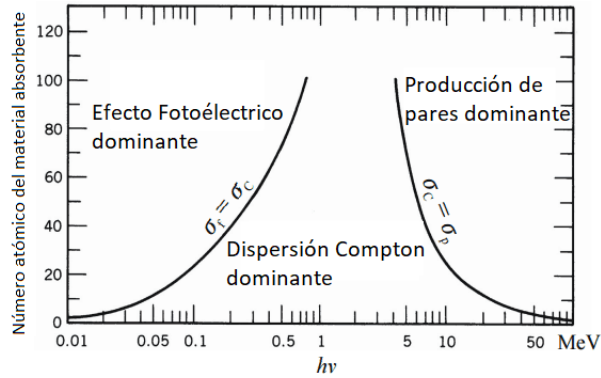
## 1.2. Interacciones de Rayos Gamma con la Materia

Un rayo gamma puede interactuar con su medio material en una de las siguientes tres formas diferentes: Absorción Fotoeléctrica, Dispersión Compton y Producción de Pares. Estas diferentes interacciones cambian su probabilidad de ocurrencia dependiendo de la energía del rayo gamma y el número atómico del material.

Estas reacciones explican las dos principales características cualitativas de los rayos gamma; 1.- los rayos gamma son mucho más penetrantes en la materia que las partículas cargadas y 2.- Un haz de fotones no se degrada su energía al atravesar un espesor de materia solo atenúa su intensidad. Como puede verse en la figura 1.2, la línea de la izquierda representa la energía en la que la Absorción Fotoeléctrica y la Dispersión de Compton son igualmente probables en función del número atómico del material con el que interactúan, la línea en la derecha representa la energía en la que la Dispersión de Compton y la Producción de Pares son igualmente probables. Aquí se ofrece una breve descripción de estos procesos mediante los cuales la radiación gamma pierde energía y en los apéndices se mostraran con más detalles algunos los cálculos.

### 1.2.1. Absorción Fotoeléctrica

La absorción fotoeléctrica o el efecto fotoeléctrico implica la absorción de un fotón por un electrón atómico con la subsecuente expulsión del electrón del átomo. Esto ocurre cuando un fotón experimenta una interacción con un átomo absorbente en el cual, el fotón desaparece por completo, en su lugar, un electrón energético es expulsado de una de las capas del átomo, la interacción es con el átomo en conjunto y no puede tener lugar con electrones libres, por eso a veces se le denomina fenómeno de estado ligado, a este proceso se le conoce como efecto Fotoeléctrico o Absorción Fotoeléctrica., Para los rayos gamma de suficiente energía, el origen más probable del foto-electrón es el electrón de capa K del átomo



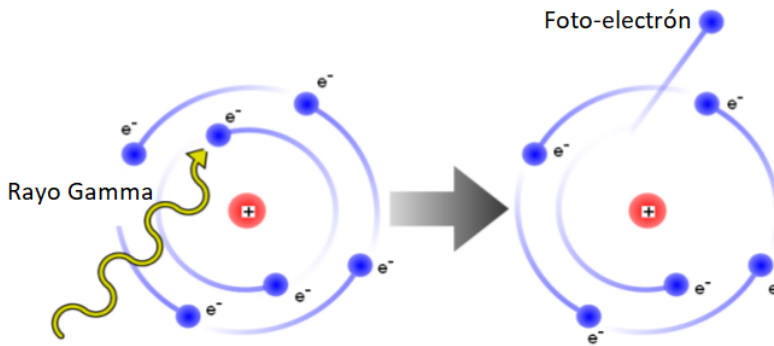
**Figura 1.2:** Muestra la importancia relativa del efecto fotoeléctrico, dispersión de Compton y producción de pares. Las líneas muestran el valor del número atómico  $Z$  y la energía  $h\nu$  para los cuales dos efectos vecinos son simplemente iguales.

más estrechamente unido al núcleo.  
El foto-electrón aparece con una energía dada por,

$$E_{e^-} = h\nu - E_b - E_R \tag{1.1}$$

Donde,  $E_b$  es la energía de enlace del foto-electrón en su capa original y  $E_R$  es la energía de retroceso del átomo que puede despreciarse. Tan pronto como se emite el foto-electrón, la interacción crea un átomo absorbente ionizado con una vacante en una de sus capas. Esta vacante se llena rápidamente mediante la captura de un electrón libre del medio y/o la reordenación de electrones de las capas externas del átomo, Por lo tanto, también se pueden generar fotones de rayos X característicos, en algunos casos, la emisión de un electrón Auger puede sustituir a los rayos X característicos al llevarse la energía de des-excitación atómica. En la figura 1.3 se muestra una ejemplificación de este proceso.

El efecto fotoeléctrico es el modo de interacción predominante para los rayos de energía relativamente bajos, el proceso también se mejora para materiales absorbentes de alto número atómico " $Z$ ". La probabilidad de



**Figura 1.3:** Muestra un diagrama esquemático del efecto fotoeléctrico, en el que un rayo gamma incide un electrón del átomo y da como resultado un electrón energético el cual es expulsado de una de las capas del átomo.

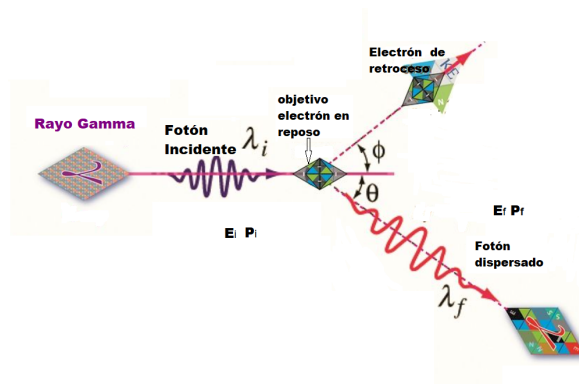
absorción fotoeléctrica  $\zeta$  (sección eficaz) para los rangos de energía  $E_\gamma$  y del número atómico  $Z$ , se puede dar como;

$$\zeta = X \left( Z^n / E_\gamma^3 \right) \quad (1.2)$$

Donde  $X$  es una constante y  $n$  es un número entre 4 y 5, como puede verse en la expresión anterior, esta absorción fotoeléctrica es dominante para materiales con números atómicos  $Z$  grandes y energías relativamente más bajas. Una representación esquemática se presenta en la figura 1.3 y para una explicación más detallada se puede consultar el libro, (Kenneth S Krane [Ken88] en el capítulo 2).

### 1.2.2. Dispersión Compton

En la figura 1.4 se muestra el proceso de dispersión Compton en el que un fotón de rayo gamma  $\gamma$  entrante se dispersa en un ángulo  $\theta$  con respecto a su dirección original, el fotón transfiere una fracción de su energía al electrón (se supone que este es libre e inicialmente en reposo), lo que se conoce como electrón de retroceso. Debido a que todos los ángulos de



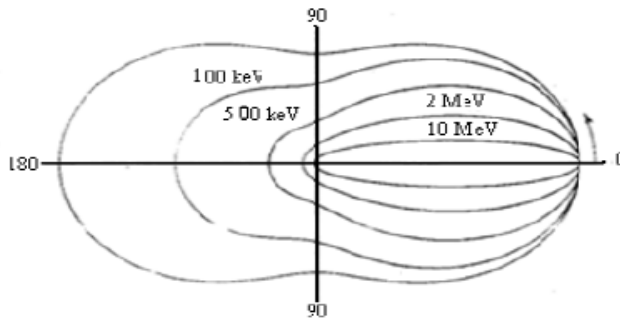
**Figura 1.4:** Muestra el proceso para la dispersión de Compton, donde un fotón de rayos gamma golpea un electrón en reposo.

dispersión son posibles, la energía transferida al electrón puede variar desde cero hasta una gran fracción de energía del rayo gamma  $\gamma$ .

La expresión que relaciona la transferencia de energía y el ángulo de dispersión  $\theta$  para cualquier interacción dada puede simplemente derivarse escribiendo las ecuaciones simultáneas para la conservación de la energía y del momento. Por lo tanto, la energía del fotón disperso viene dada por:

$$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) \quad (1.3)$$

De donde  $\lambda_f$ , es la longitud de onda final  $\lambda_i$ , es la longitud de onda inicial,  $h$  es la constante de planck,  $c$  es la constante de la velocidad de la luz,  $m_0$  es la masa en reposo del electrón y  $\theta$  es el ángulo entre los fotones incidentes y dispersados. Si consideramos al electrón como libre y en reposo (una buena aproximación, dado que la energía del fotón es normalmente mucho mayor que las de bajas energías de ligadura de los electrones de las capas externas), entonces por la conservación del momento lineal y la energía (usando dinámica relativista) podemos escribir la ecuación anterior de la



**Figura 1.5:** Muestra una gráfica en coordenadas polares, donde el número de fotones (incidente desde la izquierda) Compton se dispersan en un ángulo sólido unitario de dispersión  $\theta$ . Se muestran las curvas para las energías iniciales indicadas.

siguiente manera :

$$E_i = \frac{E_f}{1 + \left(\frac{E_f}{m_0c^2}\right)(1 - \cos \theta)} \quad (1.4)$$

donde los términos utilizados tienen su significado habitual. Estas ecuaciones nos dicen que los fotones dispersados varían en su energía dependiendo del ángulo  $\theta$  de dispersión desde el caso  $\theta \sim 0$ ,  $E_i \gg E_f$  hasta  $\theta \sim \pi$ . La distribución angular de los rayos gamma dispersados para un ángulo  $\theta$  se puede obtener mediante la mecánica cuántica empleando la fórmula de Klein-Nishina para la sección eficaz de dispersión diferencial  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  para mayores detalles se puede consultar el libro, [Leo [Leo94] ], y la ilustración de esto se explica en la figura 1.5. Puede observarse la fuerte tendencia a la dispersión hacia adelante a los valores altos de energía de los rayos gamma.

Si estamos interesados en la absorción de fotones (es decir, como van siendo absorbidos los fotones de un haz incidente), debemos integrar la

ecuación sobre todos los ángulos (Kenneth S Krane [Ken88] capítulo 2).

### 1.2.3. Producción de Pares

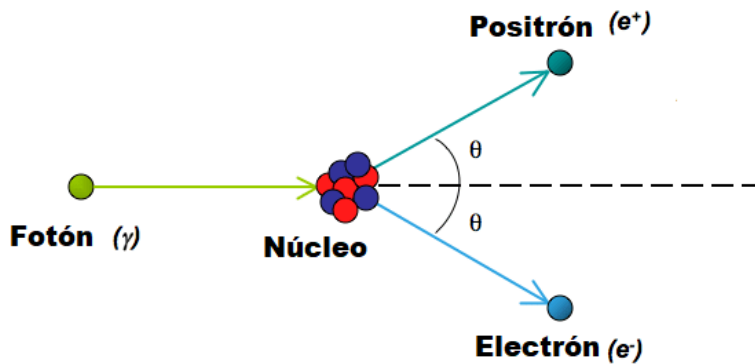
La producción de pares es un proceso de interacción de un fotón energético con la materia, en el que el fotón en presencia de un átomo (Para conservar el momento) puede desaparecer creando un par electrón-positrón:  $\gamma \implies e^- e^+$ , si la energía del rayo gamma  $\gamma$  excede el doble de la energía de la masa en reposo de un electrón como se aprecia en la ecuación siguiente 1.5, este proceso se vuelve energicamente posible y es un modo importante de interacción en la física nuclear para altas energías,

$$E_{min} = 2m_0c^2 = 1.022MeV \quad (1.5)$$

Donde  $E_{min}$  es la energía mínima para que sea posible este proceso,  $m_0$  es la masa en reposo del electrón.

Sin embargo la probabilidad de esta interacción sigue siendo muy baja hasta que la energía del rayo gamma se acerca a varios MeV y, por lo tanto, la producción de pares se limita predominantemente a los rayos gamma de alta energía superiores a los 5 MeV. En la interacción (que debe tener lugar en el campo Coulombino del núcleo), el fotón de rayos desaparece y es reemplazado por un par de positrones-electrones. Debido a que el positrón se aniquilará posteriormente después se desacelera en el medio absorbente, normalmente se producen dos fotones de aniquilación como productos secundarios de la interacción. La importancia de la producción de pares aumenta drásticamente con la energía y el número atómico  $Z$  del material absorbente. Una representación esquemática del proceso de producción de pares es mostrada en la figura 1.6 y para mayor información de este proceso se puede consultar el libro (Kenneth S Krane [Ken88] capítulo 2).

Los detectores de Germanio Ge se desarrollaron en la década de lo 60s y hasta ahora ofrecen la mejor relación entre resolución de energía y



**Figura 1.6:** Muestra el fenómeno de producción de pares en el que un fotón energético en presencia del núcleo crea un par electrón-positrón.

eficiencia. En la década de 1970 y 1980 los principales avances se dieron en la pureza y el volumen de los cristales de Ge. El diseño del detector debe tomar en cuenta los procesos que experimentan los rayos gamma al interactuar con la materia los tres procesos principales como vimos en el capítulo anterior son absorción fotoeléctrica, dispersión Compton y producción de pares. Esto para energías que van desde unos pocos 100keV hasta unos cuantos MeV. El proceso de dispersión Compton es el más probable, la sección eficaz del efecto Compton varía linealmente con el número atómico  $Z$ , el efecto fotoeléctrico con  $Z^{4-5}$  y para la producción de pares  $Z^2$ . Por lo tanto el número más alto  $Z$  del material aumentará la eficiencia del detector y reducirá el ruido de fondo. Además, la probabilidad de absorción de energía total aumentará con el volumen del detector y su densidad. Partiendo de que se debe encontrar una buena relación entre la eficiencia y la resolución.

- Los detectores de cristal tienen una magnífica resolución de  $10^{-5}$  pero una eficiencia extremadamente pobre.
- Los detectores de gas tienen una pobre resolución de energía y una pequeña densidad.
- Los detectores de centelleo como ioduro de sodio dopado de talio

Nal(Tl) tiene un gran volumen y un alto número atómico  $Z$  pero su resolución está limitada a un porcentaje muy bajo.

- Los semiconductores tienen propiedades interesantes que benefician la detección de los rayos gamma.

Por ejemplo, la energía necesaria para crear un par electrón-hueco es de unos cuantos electronvolts, lo que nos lleva a una excelente resolución de energía y poseen un alto número atómico  $Z$  los detectores más usados son los detectores de silicio y germanio. El silicio tiene un número atómico  $Z$ , bajo  $Z=14$  y es una muy buena opción para la espectroscopia de rayos X y partículas cargadas, pero para las líneas gamma correspondientes a algunos cientos de keV desaparecerán en el fondo de Compton. La mejor opción de material para la espectroscopia de rayos gamma es el Germanio, Ge tiene una banda prohibida de 0.7 eV lo que da como resultado la creación de una enorme cantidad de electrones huecos, lo que a su vez genera una pequeña cantidad de fluctuaciones estadísticas y por lo tanto conduce a una buena resolución de energía.

El FWHM que veremos más adelante, para valores de energía de hasta 1.4 MeV es de  $\Delta E = 2\text{keV}$ . El número atómico  $Z$  del germanio = 32 hace que el efecto dominante sea el Compton para energías mayores a los 180keV incluso con cristales de gran tamaño la absorción total del pico fotoeléctrico solo será del 25 % y el restante 75 % serán eventos de ruido de fondo en el continuo de Compton.

La pequeña banda prohibida de Ge favorece la excitación térmica de los electrones a través de la zona prohibida. Este proceso solo puede suprimirse lo suficiente enfriando el detector a una temperatura menor a los -165 grados centígrados. El nitrógeno líquido se utiliza para enfriar con su temperatura de -196 centígrados.

Los primeros detectores de Ge producidos tenían volúmenes activos muy pequeños. La razón fue que la concentración de impurezas de los cristales de Ge más puros que se podían cultivar era demasiado alta para lograr incluso un 1mm de espesor de la capa de agotamiento. Sin embargo, en 1960 un proceso muy interesante se desarrolló, a saber, la compensación del exceso de impurezas de tipo p que se producen de forma natural en Ge

mediante la introducción de litio (Li) A temperatura ambiente, la mayoría de los electrones de valencia de Li se excitan a la banda de conducción, es decir, el átomo de litio está ionizado. Li es un átomo muy pequeño, que tiene una alta movilidad en el Ge incluso a temperatura ambiente estos detectores deben mantenerse a temperaturas del nitrógeno líquido todo el tiempo. A estos detectores se les llamaos detectores GeLi. 1970 los primeros detectores de Germanio hiperpuro estuvieron disponible comercialmente con cristales con una concentración neta de impurezas de  $5 \times 10^9$  a  $2 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ . Estos detectores tienen muchas ventajas sobre los detectores de GeLi;

- El proceso de detección es mucho más rápido debido a que no hay pérdida de tiempo en el dopaje de litio.
- A pesar de seguir trabajando a temperaturas del nitrógeno líquido, operan a esta temperatura al momento de su funcionamiento.
- Los detectores de Germanio hiperpuro de tipo n son menos sensibles al daño por la radiación de neutrones.

De manera comercial los detectores HPGe se volvieron competitivos cuando el volumen activo fue similar a los detectores GeLi.

Este trabajo se centro principalmente en la calibración de energía de los detectores y en como deducir la eficiencias tanto, intrínsecas y absolutas de los detectores HPGe que utilizan diferentes fuentes radioactivas conocidas. Al analizar cualquier espectro los procesos mencionados anteriormente juegan un papel clave, una breve descripción de las características del detector, p. ej. eficiencia, resolución de energía junto con el análisis de la señal utilizada en el presente trabajo en Capítulo se realiza un breve explicación 2. En el mismo, se especifican los detalles de la configuración experimental y los errores, también son incluidos. La calibración del detector HPGe principalmente la región de energía del espectro de las fuentes radioactivas es descrito en el Capítulo 3. El Capítulo 4 trata del estudio de la eficiencia de los detectores. Los datos experimentales e información sobre, los parámetros de ajuste, junto con una breve nota sobre el detector de silicio se presentan en la referencia A.10 (M. Kramer [M K11]). Se

## Capítulo 1    Introducción

presentan, conclusiones y trabajos presentados y a futuro en un capítulo diferente, en el siguiente capítulo se presentan las referencias y por último se muestra la bibliografía utilizada en este proyecto.

## 2.1. Eficiencia de los Detectores

Durante un experimento de radiación gamma, se produce un gran flujo de fotones de rayos gamma incidentes en un detector particular y no se puede garantizar que este mida todos los fotones gamma. La eficiencia de un detector da una estimación de la capacidad para detectar los fotones de rayos gammas incidentes sobre él, una eficiencia de 100 % implica que todas las radiaciones que llegan son detectadas. En cambio una eficiencia de 1 %, por ejemplo, significa que de cada 100 radiaciones que recibe, cuenta sólo una. Generalmente se refieren dos tipos de eficiencia en caso de la detección de radiación: eficiencia absoluta e intrínseca.

La eficiencia absoluta esta dada por :

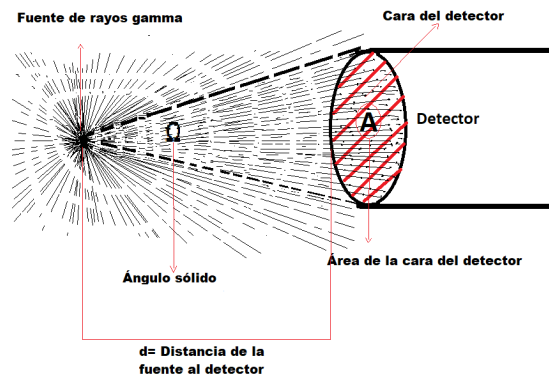
$$A_{\epsilon} = \frac{\text{número de pulsos registrados}}{\text{número de conteos de radiación emitidos por la fuente}} \quad (2.1)$$

No solo depende de las propiedades del detector sino también de los detalles de la geometría (la distancia desde la fuente al detector y área de la cara de este), y la naturaleza de la radiación que se mide.

La eficiencia intrínseca es definida como:

$$I_{\epsilon} = \frac{\text{número de pulsos registrados}}{\text{número de conteos de radiación incidente por la fuente}} \quad (2.2)$$

No incluye el ángulo sólido subtendido por el detector como factor implí-



**Figura 2.1:** Muestra la emisión de rayos gamma de una fuente puntal a una distancia  $d$  a la cara del detector, de área  $A$  y con un ángulo sólido  $\Omega$

cito. A medida que se avanza en lo que respecta al análisis, el área debajo de cada foto-pico se estima y luego se divide por la intensidad absoluta de ese pico.

Para la detección de rayos gamma o X por parte del detector el ángulo sólido es una parte importante parte, este controla la capacidad para medir la señal generada después de la interacción de la radiación con el cristal del detector, este se define con la ecuación siguiente y una representación esquemática, es mostrada en la figura 2.1.

$$\Omega = \frac{A}{d^2} \quad (2.3)$$

Donde  $\Omega$  es el ángulo sólido,  $A$  es el área de la cara del detector y  $d$  es la distancia de la fuente al detector.

En este trabajo el área de la cara del detector esta dada por  $22.06 \text{ cm}^2$  y se colocaron las fuentes a varias distancias (p. ej, 1cm, 2cm ... 10cm). Para detallar esta ecuación, calculamos el ángulo sólido para la distancia de 2 cm desde la fuente a la cara del detector, y obtenemos un ángulo sólido

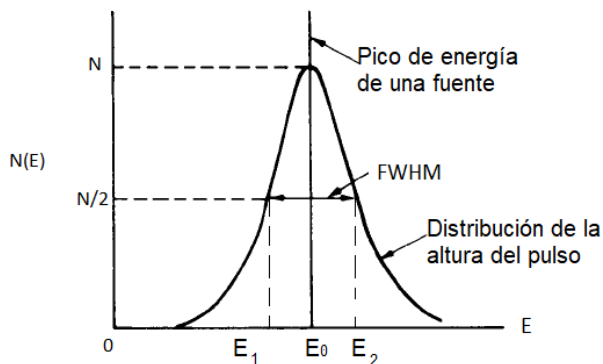
5.52 sr, simplemente de sustituir el valor del área en la ecuación anterior, donde sr, son estereoradianes, el ángulo sólido decrece con mayores distancias de la fuente al detector.

## 2.2. Resolución de Energía

La resolución de energía de un sistema de detección de radiación es una propiedad muy importante cuando se trabaja con espectroscopia en general. Una representación esquemática de la resolución de energía y la anchura a media altura, abreviada FWHM (del inglés Full Width at Half Maximum) se muestra en figura 2.2. La resolución de un detector, en este caso de rayos gamma se define como su capacidad para diferenciar entre energías gammas cercanas o diferenciar entre dos picos cercanos, cuando se mide una fuente multi-energética, un sistema con una buena resolución proporciona un ancho de pico más estrecho, lo que es bueno para separar picos cercanos localizados. La resolución de energía depende del tipo de detector y de la configuración del ruido filtrado en el procesamiento de pulsos, suele expresarse en términos del FWHM. Suponga que hay  $N$  números de portadores de carga producidos en una interacción particular de una radiación de energía fija con el material del detector, este número no será constante para la misma energía de otra radiación ya que tenemos que la anchura del espectro que se mide es debida, a fluctuaciones estadísticas debido a que el número de fotones generados en el detector no es continuo. Como las desexcitaciones son discretas, están sujetas a fluctuaciones aleatorias que siguen una distribución de Poisson o Gaussiana. El FWHM se puede definir como (apéndice A.10);

$$FWHM = 2.35\sigma \quad (2.4)$$

Donde la desviación estándar esta dada por  $\sigma = k\sqrt{N}$ ,  $k$  es una, constante de proporcionalidad y  $E$  es la energía de radiación incidente entonces podemos escribir la energía como:  $E = kN$ , de donde  $k$  es el promedio de la cantidad de energía, requerida para producir un par electrón-ion,



**Figura 2.2:** Muestra una representación de como se mide el FWHM en una distribución Gaussiana, en donde en el eje x tenemos la energía y en el eje y el número de conteos.

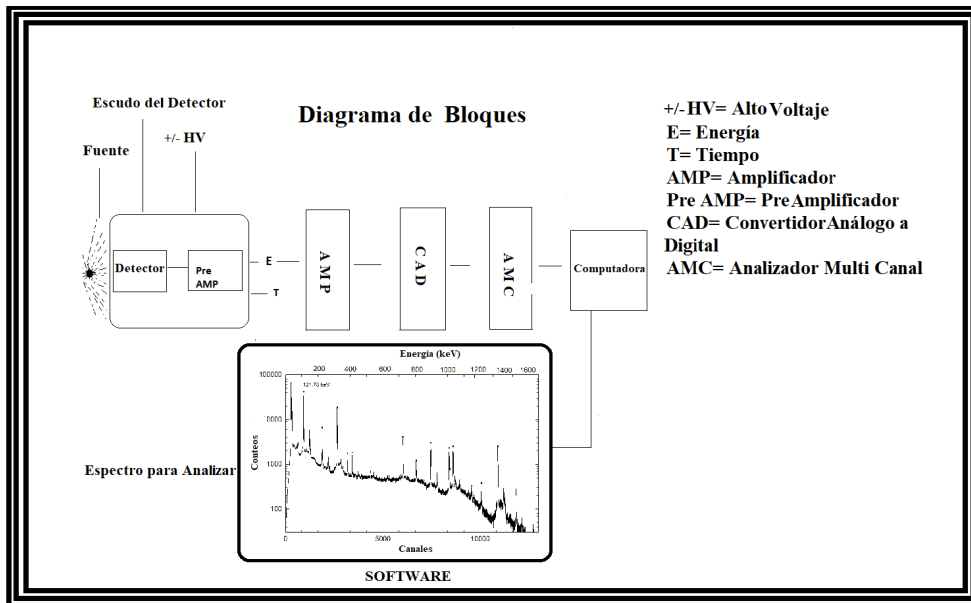
N es número de cargas electrónicas, entonces la resolución de energía la podemos escribir como;

$$R = \frac{FWHM}{\text{Posición del pico}} = \frac{FWHM}{E_0} = \frac{2.35k\sqrt{N}}{kN} = \frac{2.35}{\sqrt{N}} \quad (2.5)$$

Donde  $E_0$  es el punto en el cual el número de cuentas es máximo. R indica el número de resolución, valores pequeños es mejor la resolución del detector.

### 2.3. Análisis de la señal de un Detector

Para extraer información de energía y tiempo del detector, la señal debe ser procesada adicionalmente por un sistema electrónico. Este sistema puede diseñarse para extraer información energética, para determinar el tiempo relativo entre dos señales, etc., y basándose en esta información



**Figura 2.3:** Muestra un diagrama de bloques de la electrónica de un detector de HPGe o Módulo de Instrumentación Nuclear, el voltaje negativo se utiliza para un detector de tipo n mono-cristalino y el voltaje positivo se utiliza para un detector de tipo p mono-cristalino.

se puede hacer un análisis adecuado del evento, la señal pasa por los siguiente sistemas electrónicos como se describe a continuación;

### 2.3.1. Pre-Amplificador

El detector se coloca en un área con forma de caja de protección de plomo para evitar picos de fondo, en seguida está conectado internamente al pre-amplificador. La función básica de un pre-amplificador es aumentar las señales débiles de un detector y controlarlas, a través del cable que conecta el pre-amplificador con el resto del equipo, como la señal de entrada en el pre-amplificador es generalmente débil, estos normalmente se montan lo más cerca posible del detector para minimizar la longitud del cable, de esta manera, se reducen los campos electromagnéticos y la

capacitancia del cable, lo que disminuye la relación señal-ruido, a una relación, minimizada.

El tiempo de subida de la señal de salida del pre-amplificador a un voltaje de polarización de  $2 \text{ kV} = 300 \text{ ns}$ . El tiempo de caída de la señal de salida del pre-amplificador con un voltaje de polarización de  $2 \text{ kV} = 120 \mu\text{s}$ .

### 2.3.2. Amplificador

El amplificador está conectado generalmente después del pre amplificador tiene dos propósitos principales;

1. Aumentar (amplificar) la señal del pre-amplificador.
2. Darle una forma conveniente a la señal para su procesamiento posterior.

Para los amplificadores de espectroscopia, uno de los factores más importantes es la forma del pulso característico, en general, el pulso precedente del pre-amplificador se puede caracterizar como un exponencial con una cola larga, con un tiempo  $t = \text{pocos ns hasta unos } 100 \text{ ns}$ . La amplitud de este el pulso es proporcional a la energía, si llega una segunda señal dentro de este período, se monta sobre la cola del primero y su amplitud aumentará, el contenido de información energética en este segundo pulso estará distorsionado, esto se conoce como pile-up, para evitar este efecto, uno debe restringir la tasa de conteo o acortar la cola por medio de una remodelación.

La constante de tiempo de formación del amplificador utilizado es  $=3\mu\text{seg}$ .

### 2.3.3. Convertidor de señal Análoga a Digital

Un Convertidor de señal Análoga a Digital (CAD), es un aparato el cual convierte la información de la señal analógica a su equivalente forma digital. Este instrumento es el lazo fundamental entre la electrónica digital y analógica. Para dar un ejemplo de su función supongamos que el CAD acepta los datos de entrada como pulsos en los rangos de 0 a 10 V y tiene la capacidad de sacar números de 0 a un máximo de 1000 (por simplicidad hemos escogido números decimales, a pesar que la mayoría de los CADs expresan esto en su forma binaria), una señal de entrada con una amplitud de 2.5V convertirá a un número digital 250, similarmente para 150mV encontramos el número 15 y así sucesivamente. La resolución del CAD depende del rango de digitalización sí los números entre 0 y 10000 fueran generados en lugar de 0 a 1000, obtendríamos una mejor y mayor digitalización.

### 2.3.4. Analizador MultiCanal

Los Analizadores MultiCanales (AMC) son dispositivos sofisticados que clasifican los pulsos entrantes de acuerdo con la altura del pulso y mantienen el número de conteos para cada altura en una memoria multi-canal. Los contenidos de cada canal pueden mostrarse en una pantalla o imprimirse para dar un espectro de altura de pulso.

El AMC funciona digitalizando la amplitud del pulso entrante con un convertidor de análogo a digital (CAD). Luego, el AMC toma este número e incrementa un canal de memoria cuya dirección es proporcional al valor digitalizado, de esta manera, los pulsos entrantes se clasifican de acuerdo con la altura de los pulsos y el número en cada altura de pulso almacenado en ubicaciones de memoria correspondientes a estas amplitudes. El número total de canales en los que se digitaliza el rango de voltaje se conoce como ganancia de conversión, esto determina la resolución del AMC, las ganancias de conversión van de 128 Mb hasta 8 o 16 K.

## 2.4. Cancelación de polo-cero y restauración de la línea base

Uno de los efectos secundarios de la formación de pulsos RC (es un circuito eléctrico compuesto de resistencias y condensadores) es la presencia de un sub-pulso en la forma de pulso, este sub-pulso regresa muy lentamente a cero, es un problema para el análisis de la altura del pulso, ya que si un segundo pulso se desplaza por debajo de este, un defecto de amplitud surgirá con una subsiguiente distorsión de la información de altura del pulso en la segunda señal, la causa principal del sub-pulso de CR-RC es la diferenciación de longitudes exponenciales finitas o los pulsos de cola que provienen del pre-amplificador. Este sub-pulso, puede ser corregido por un llamado circuito de cancelación de polo-cero, esto implica agregar una resistencia variable simple en paralelo con el condensador en la etapa CR. Este circuito se ajusta observando la señal en el osciloscopio y se varia la resistencia hasta que el sub-pulso desaparezca o sea mínimo.

## 2.5. Walk y Jitter

La operación más fundamental en las mediciones de tiempo, es la generación de un pulso lógico, cuyo borde delantero indica el tiempo de ocurrencia de un pulso lineal de entrada. Los dispositivos electrónicos que llevan a cabo esta función, se denominan activadores o unidades recolectoras de tiempo.

Es posible, que haya cierto grado de incertidumbre en la derivación de las señales de tiempo que siempre están presentes. Las fuentes de tiempo inexactas se dividen convenientemente en dos categorías: caminar y tambalear (del inglés walk and jitter).

El efecto de caminar, es causado por variaciones en la amplitud y/o tiempo de subida de las señales entrantes. Una segunda fuente de caminata, aunque mucho más pequeña en efecto, es una cantidad finita de carga

necesaria para activar el discriminador. En general, después de alcanzar el umbral del discriminador, se debe integrar una cierta cantidad de carga en un condensador antes de que se emite una señal lógica, debido al tiempo de subida y la diferencia de amplitud, esto también da como resultado un efecto de caminata.

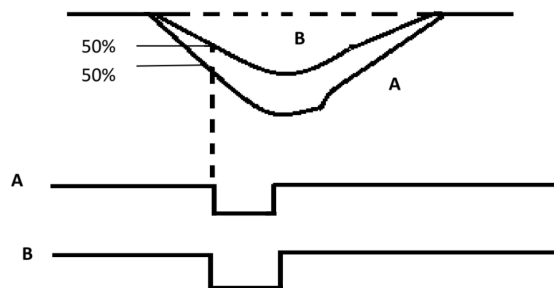
Las fluctuaciones de tiempo también son causadas por ruido y fluctuaciones estadísticas en la señal del detector original, debido a estas fluctuaciones aleatorias, dos señales idénticas no siempre se activan en el mismo punto, dando en cambio una variación de tiempo que depende de la amplitud de la fluctuaciones, este efecto generalmente se conoce como jitter de tiempo.

## 2.6. Discriminador (método de selección de tiempo)

La unidad de selección de tiempo, es aquella que genera un pulso siempre que la salida del amplificador lineal alcanza algún valor predefinido. Hay varios métodos para eliminar el tiempo a continuación mostraremos algunos.

### Discriminador de Fracción Constante (DFC)

En este método, la señal lógica es generada en una fracción constante de la altura del pico, que produce una señal de temporización esencialmente libre de "walk". Dependiendo del tipo de señal, este nivel de activación se produce a una cierta fracción de la altura del pulso, independientemente de la amplitud, la figura 2.4 muestra cómo funciona esto a una fracción constante del 50 %.



**Figura 2.4:** Muestra el discriminador de fracción constante al 50 % para la señal A y B.

## 2.7. Breve información de detectores HPGe

Para una buena resolución de energía, se prefieren los detectores de semiconductores a los de centelleo y gas (Leo [Leo94]).

Uno puede diferenciar entre semiconductores, aislantes y conductores basándose en su estructura de banda. El valor típico del espacio prohibido es de unos pocos eV para semiconductores, la radiación entrante debe tener esta cantidad mínima de energía, para excitar un electrón de la banda de valencia a la de conducción. El pequeño valle con una brecha de energía, da como resultado la formación de un gran número de portadores de carga, esto reduce la fluctuación estadística en el número de portadores de carga, ya que el número de resolución es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del número total de portadores de carga. Sin embargo, la eficiencia del detector de semiconductores, es mucho menor debido al bajo número atómico del material, como resultado de la cual la probabilidad de interacción fotoeléctrica disminuye. La interacción a través del efecto Compton, es más dominante ( $\sim Z^2$ ) que da como resultado la pérdida total de eventos energéticos, dado que los fotones dispersados de Compton depositan menos energía, conduce a un fondo grande a baja energía conocido como Fondo Compton (Compton Background). Para reducir

este centelleo, se utilizan alrededor de los detectores un escudo conocido como Anti-Compton Shield (ACS). Los fotones entonces, que escapan del detector a través de la dispersión de Compton son detectados por ACS y debido a la configuración de anti-coincidencia tales eventos son rechazados.

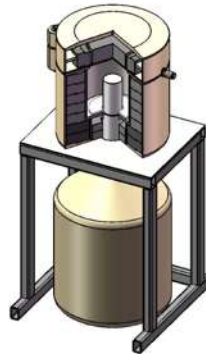
Para aumentar la eficiencia, la opción posible es permitir más tiempo de interacción del fotón aumentando la dimensión del detector, la interacción de la radiación es sólo eficaz cuando se forman pares de huecos-electrones en la región activa. En semiconductores la región activa es la región agotamiento (depleted region), donde el grosor de la misma viene dado por la siguiente expresión:

$$d = (2\varepsilon V/eN)^{1/2} \quad (2.6)$$

donde  $V$  es el voltaje de polarización inversa y  $N$  es la concentración neta de impurezas en el volumen del material semiconductor, ( $\varepsilon$  es la constante dieléctrica y  $e$  la carga electrónica). A un cierto voltaje aplicado, mayores profundidades de agotamiento, solo se pueden lograr reduciendo el valor de  $N$  a través de nuevas reducciones en la concentración neta en las impurezas. Este criterio lo cumplen los detectores HPGe que consisten en cristales de germanio de alta pureza, con una gran área activa, aumenta el tiempo de interacción de fotones y, por lo tanto, aumenta la eficiencia del detector. Hay dos enfoques generales para lograr esto: Primero es buscar más técnicas de refinación de zonas capaces de reducir la concentración de impurezas a casi  $10^9$  átomos/cm<sup>3</sup>. El segundo es reducir la concentración neta de impurezas creando un material compensado en cuyas impurezas residuales se equilibran con una concentración igual a la de un tipo de átomo opuesto.

Los detectores HPGe tienen una buena resolución pero tienen algunos inconvenientes:

1. Limitación de la eficiencia.
2. Susceptible de sufrir daño por la radiación incidente debido, a su gran volumen y largo camino de recolección de carga.



**Figura 2.5:** Muestra un detector de germanio de alta pureza o hiper-puro (HP-Ge), en la parte de abajo tenemos el contenedor de nitrógeno líquido a  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximadamente en la parte superior se observa que el cristal del detector esta cubierto por un blindaje generalmente de plomo para minimizar la radiación externa.

La figura 2.5 muestra un detector HPGe, en la parte inferior se puede ver su almacenamiento de nitrógeno líquido  $LN_2$  a  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximadamente.

### 2.7.1. Detector de Diodos de Silicio

Para la detección de partículas cargadas, el silicio es el material semiconductor más utilizado, tiene la ventaja de funcionar a temperatura ambiente y una amplia disponibilidad, una de las desventajas de los detectores de silicio es su tamaño relativamente pequeño. Los dispositivos actuales se limitan a superficies de unas pocas decenas de centímetros cuadrados, aunque se están realizando algunos desarrollos para aumentar este límite.

Los diodos de silicio se pueden fabricar de varias formas que dan como resultado varios tipos diferentes de detectores, algunos de estos se descri-

ben a continuación.

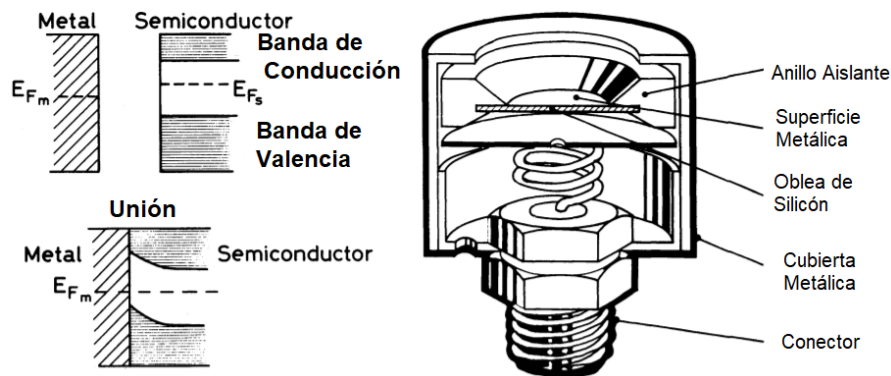
### **Diodos de uniones difusas**

Los diodos de unión difusa estuvieron entre los primeros dispositivos fabricados para detectores de radiación, estos diodos generalmente se producen mediante la difusión de impurezas de tipo n, como el fósforo, en un extremo de un semiconductor de tipo p homogéneo a altas temperaturas. Al ajustar las concentraciones y el tiempo de difusión, se pueden producir uniones que se encuentran a profundidades de unas pocas décimas de micra a dos micras en el semiconductor.

La ventaja de las uniones de difusión es su robustez en relación con otros detectores de semiconductores y su mayor resistencia a la contaminación en la superficie del detector. Sin embargo, debido a las ventanas relativamente delgadas que se pueden obtener con otros tipos de detectores, las uniones difusas no se utilizan a menudo.

### **Detectores de barrera de superficie**

Con mucho, los detectores de silicio más utilizados para mediciones de partículas cargadas son los tipo barrera de superficie. Estos detectores se basan en la unión formada entre un semiconductor y ciertos metales, generalmente silicio de tipo n con oro o silicio de tipo p con aluminio, debido a los diferentes niveles de Fermi en estos materiales, surge una fem de contacto cuando los dos se juntan, esto provoca una disminución de los niveles de banda en el semiconductor, como se ilustra en la siguiente figura 2.6, esta situación, por supuesto, es similar a la unión n-p y una zona de agotamiento que se extiende por completo en el semiconductor es formado, tales uniones también se conocen como barreras de Schottky y poseen muchos de las características de las uniones p-n.



**Figura 2.6:** Muestra en el lado izquierdo se ve la formación de una unión de barrera de Schottky (Leo [Leo94]), y en lado derecho vemos un diagrama esquemático de un detector de superficie de barrera.

La profundidad de agotamiento en un detector de barrera de superficie se puede calcular usando la ecuación 2.6.

Con el silicio de alta resistividad, profundidades de 5mm se pueden alcanzar. En un detector completamente agotado, la zona de agotamiento se extiende por todo el espesor de la placa de silicio, tales detectores son útiles como transmisión para medir la deposición de energía del paso partículas cargadas, es decir,  $dE/dx$ . Además, al aumentar el sesgo en los detectores completamente agotados, se puede obtener una ganancia en el tiempo de recolección de las cargas, lo que da como resultado un aumento de la señal más rápido.

### 2.7.2. Detectores de Germanio

Para la detección de rayos gamma, se prefiere el germanio al silicio debido a su número atómico mucho más alto ( $Z_{Si}=14$ ,  $Z_{Ge}=32$ ). La sección transversal fotoeléctrica es aproximadamente 60 veces mayor en el Germanio (Ge) que en Silicio (Si). El germanio, sin embargo, debe operarse a bajas temperaturas debido a su menor banda prohibida, sin embargo, este

inconveniente se compensa con su mayor eficiencia.

También puede usarse para la detección de partículas cargadas, sin embargo, aparte de su mayor poder de detención, no ofrece ninguna ventaja sobre el silicio y, de hecho, se vuelve desventajoso debido a su necesidad de enfriamiento.

### **Germanio derivado de Litio**

Con el fin de obtener un espesor sensible suficiente para la detección de rayos gamma, el primer detector se fabricó con Germanio compensado con litio. Dado que los espesores máximos que se pueden obtener para el Germanio compensado son de unos 15 o 20 mm, generalmente se utiliza una geometría coaxial para maximizar el volumen sensible, en esta configuración, el litio se deriva de la superficie exterior de un cristal cilíndrico de Germanio tipo p para formar una capa cilíndrica de material compensado, a continuación, se deja un núcleo central de material p insensible, si este núcleo se extiende a lo largo de toda la longitud del eje, la configuración se conoce como detector coaxial o coaxial de extremo abierto. Para aumentar aún más el volumen sensible, el litio también se puede derivar desde la cara frontal del cilindro. La extensión del núcleo insensible es reducida, este se conoce como detector coaxial de extremo cerrado. Para una alta eficiencia de conteo, el núcleo central también se puede quitar de un detector de barrera. Para energías más bajas, los detectores de Ge(Li) también se pueden fabricar con la geometría plana convencional. Debido a la alta movilidad de los iones de litio en el germanio, incluso a temperatura ambiente, los detectores de Ge(Li) deben mantenerse a temperaturas de nitrógeno líquido en todo momento, esto requiere montar el cristal en un criostato mecánicamente rígido con un dewar (contenedor) con nitrógeno líquido.

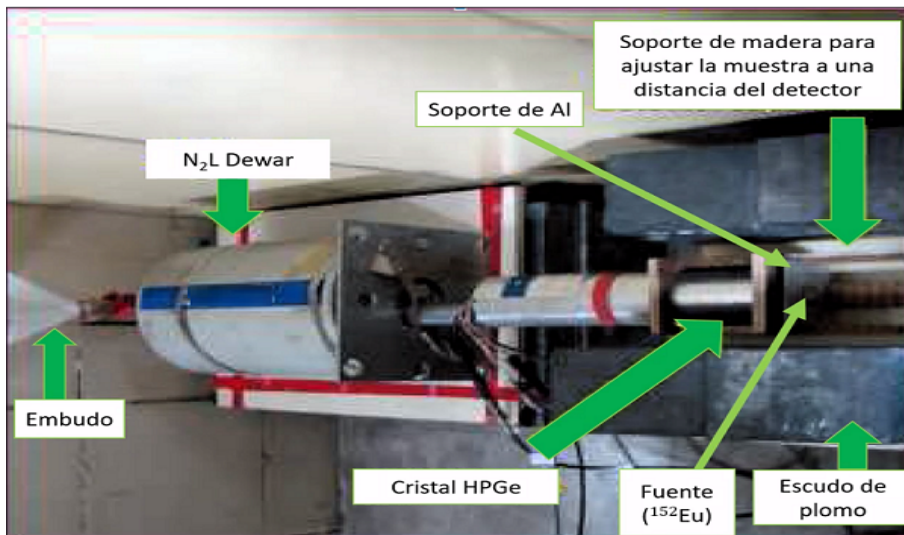
### Germanio de alta pureza

En años más recientes, los avances en la tecnología han permitido la fabricación de semiconductores germanio de muy alta pureza. Los detectores de este tipo tienen la ventaja de no tener que mantenerse a bajas temperaturas en todo momento, el enfriamiento solo es necesario cuando se aplica un alto voltaje. Los detectores de Germanio intrínseco (también llamado HPGE Germanio de alta pureza) se construyen y operan de la misma manera que los detectores de Ge(Li). Una ventaja de los detectores intrínsecos es la posibilidad de utilizar semiconductores de tipo n en lugar del tipo p para el proceso de deriva de litio, estos también son algo más resistentes al daño por radiación. La principal aplicación de los detectores de Germanio, es la espectroscopia de rayos gamma. En la actualidad, los detectores de Germanio ofrecen una muy buena resolución de energías de rayos gamma desde un par de keV hasta unos 10 MeV.

En el siguiente capítulo, describiremos calibraciones de espectros de los detectores y más adelante la eficiencia de estos para diferentes fuentes. Hemos usado diferentes fuentes, para la eficiencia de los detectores, la calculamos para diferentes distancias de la fuente al detector y también para las diferentes fechas.

## 2.8. Montaje experimental

A continuación se muestra una fotografía típica (vista superior) de la configuración experimental de un detector de HPGe. El cristal se coloca dentro de la pared de plomo para evitar picos de fondo. Un soporte de madera para ajustar la separación del detector de fuente, en este caso  $^{152}\text{Eu}$  se coloca justo enfrente del cristal, este soporte de madera tiene canales a diferentes distancias. La fuente se monta sobre una placa de aluminio y se inserta a la separación deseada del detector a la fuente. Se puede mencionar que hay un embudo en la parte de atrás del detector que es la entrada de  $\text{LN}_2$  (Nitrógeno Líquido) al deware, oportuna después de 24 horas aproximadamente.



**Figura 2.7:** Muestra una fotografía típica de una configuración experimental para una fuente de  $^{152}\text{Eu}$ .

## 2.9. Incertidumbres experimentales

La evaluación crítica de incertidumbres en diversas cantidades que pueden introducir errores en la eficiencia medida, refleja la calidad de las mediciones. Los factores importantes, los cuales, pueden introducir errores posiblemente, debido al tiempo muerto del sistema de adquisición, se ha tenido el cuidado adecuado para mantener este tiempo muerto del detector  $<10\%$  por un ajuste adecuado en la separación fuente-detector. El error estadístico en el conteo de las fuentes estándares, también introducen errores en la medición de la eficiencia que han sido disminuidos al aumentar el tiempo de conteo. Los datos experimentales en la eficiencia de la dependencia geométrica, con energías de rayos gamma a un punto fijo de separación ha sido ajustado, con una curva de ley de potencia (ver Capí-

tulo 4 para mas detalles). La incertidumbre debida al ajuste de la eficiencia es estimada para que sea  $<5\%$ . En los errores estadísticos en la evaluación de las intensidades de del rayo gama y del ruido fondo su sustracción fue diferente y se evaluó por separado para emplear el mejor ajuste del pico con el software CANDLER. Además, las incertidumbres de los datos nucleares como relación de ramificación, constante de desintegración, etc., que se han tomado de la tabla de isótopos [Sonzogni [Son21]] y no se han tenido en cuenta. Se puede mencionar que los errores asociados con la medición de FWHM y la resolución son errores estándares y se presentan, dado que el valor de los errores estándares es muy inferior, es  $<2\%$ , por lo tanto, los errores que se muestran en las figuras se encuentran dentro del símbolo. Considerando todas las posibles fuentes de errores como se describe arriba, la incertidumbre en los valores absolutos de la eficiencia se estima en menos del  $11\%$ , incluidos los errores estadísticos. Para generar un mayor conocimiento de estos temas vistos en este capítulo puede consultar (Leo [Leo94] capitulo 10).

# 3

## Calibración de Energía

---

Como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores, los rayos gamma/X emitidos por diversas fuentes radioactivas tienen un gran poder de penetración, por lo que, para su detección se requiere un detector de muy buena resolución. En general, se puede usar el de centelleo (NaI) para la detección de rayos gamma energéticos, sin embargo, si la emisión de rayos gamma cae cerca y en una región de energía amplia, entonces los de mejor resolución como los detectores de germanio de alta pureza (HPGe) son mejores opciones. Hoy en día, hay disponibles detectores muy avanzados como lo de clover (trébol) que pueden detectar rayos gamma de baja intensidad, a través del aumento estadístico de los eventos. Este tipo de detectores tienen 4 cristales coaxiales de Germanio (Ge) de alta pureza tipo N, cada uno mecanizado para dar forma y montados en un cristal común, para formar una estructura que se asemeja a un trébol de cuatro hojas (U. Rizwan [UR17]). En la figura 1.1 se muestra una fotografía típica de los detectores HPGe y clover (trébol) para una mejor imaginación. En el presente trabajo, hemos utilizado detectores HPGe para registrar los espectros de fuentes conocidas y se le ha agregado ruido de fondo de la sala experimental. Los datos de calidad se toman prestados de dos laboratorios nacionales ubicados en India y México, es decir en el, Inter University Accelerator Center, Nueva Delhi (IUAC) y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Toluca (ININ). Para tener conocimiento de los detectores de partículas, los datos de la fuente triple alfa del detector de silicio se toman prestados del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México. Los detalles sobre la marca de los detectores y sus correspondientes voltajes de operación se presentan en la siguiente tabla 3.1.

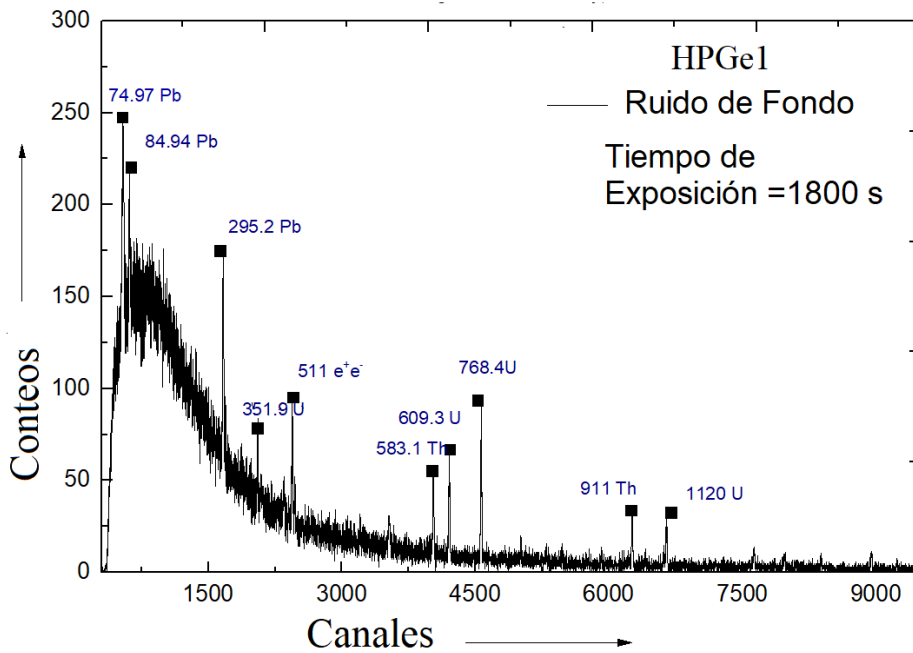
- a 1- Inter University Accelerator Centre (IUAC)  
2- Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ)

Detector	Modelo	Voltaje
HPGe 1	Ortec	-3500V
HPGe 2	Ortec	-3500V
Si	Photonics	50V

**Cuadro 3.1:** Muestra detalles de los dos detectores utilizados, en donde indicamos HPGe1 para el detector ubicado en el ININ y HPGe2 para el detector ubicado en la IUAC. <sup>a</sup>

Al inicio, analizamos los espectros de fondo para descubrir cualquier presencia de picos de ruido de fondo intensos, dentro del salón experimental. En las figura 3.1 y 3.2 se presentan los correspondiente espectros de ruido fondo para los dos detectores, el primer detector, tuvo un registro durante 1,800 segundos para el HPGe1<sup>a</sup>, el segundo con una exposición mas larga de 56,123 segundos para el HPGe2<sup>a</sup>, después de un análisis detallado, se asignan los picos gamma correspondientes a una cierta emisión de fuentes conocidas para el ruido de fondo. Como se puede ver en las figuras; 3.2 y 3.3, los picos más altos generalmente se originan en las series Plomo, Uranio, Torio y Potasio.

Es importante mencionar que comprender, los espectros de fondo, es muy importante y es el paso previo a la realización de cualquier experimento de espectroscopia nuclear, porque, se pueden eliminar las líneas gamma no deseadas del espectro que se, pueden originar si alguna fuente, se coloca cerca del área experimental o no. La figura 3.3 es un ejemplo típico, que explica los espectros de fondo, los datos experimentales registrados de la fuente conocida de <sup>152</sup>Eu y los espectros sustraídos del ruido de fondo de la misma fuente conocida de <sup>152</sup>Eu. En el recuadro se muestra el zoom de 2100 a 3300 canales, para una visualización mas clara. Los picos de ruido de fondo se compararon con los espectros de ruido fondo estándares (Arti Gupta [Art08]) como mostramos en la figura 3.1 y figura 3.2.

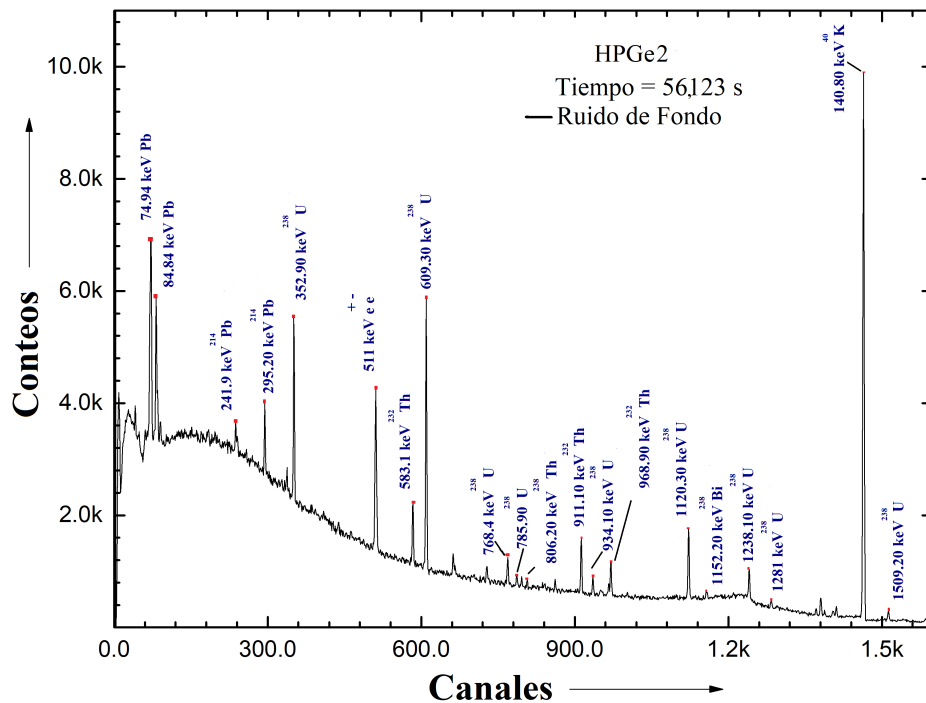


**Figura 3.1:** Muestra un espectro típico de ruido de fondo registrado para una exposición de 1,800 segundos para el detector HPGe1<sup>a</sup>, en donde se indican los picos más energéticos.

En el presente trabajo, el análisis se realizó después de eliminar los picos de fondo de las fuentes conocidas como  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{241}\text{Am}$ . En la siguiente sección podemos ver cómo, se puede calibrar un espectro sin procesar incluso, si es solo ruido de fondo para mayor información se puede consultar el libro (Kenneth S Krane [Ken88]).

### 3.1. Calibración de Energía

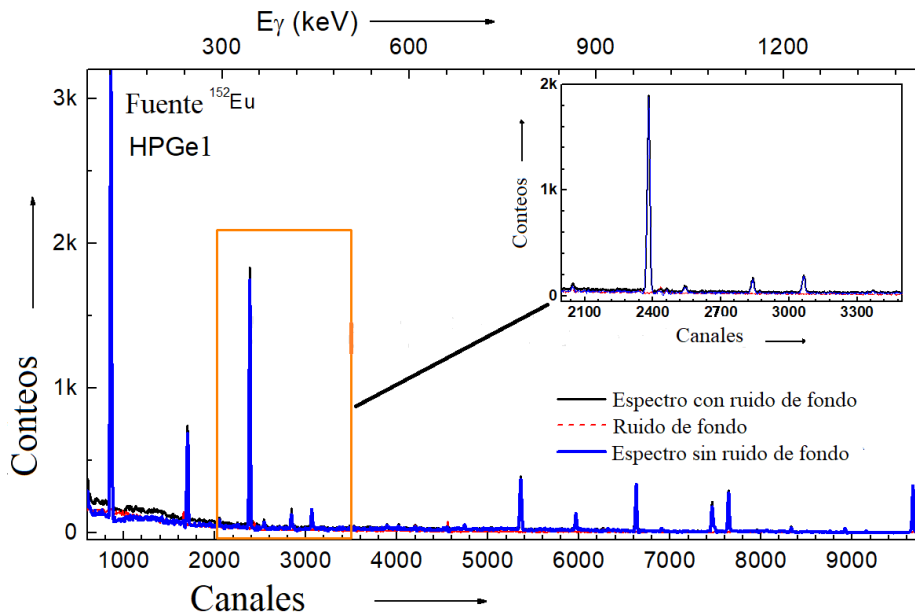
El objetivo de esta calibración, es poder cambiar los números de canal en la energía correspondiente a los picos de alguna fuente estándar, se



**Figura 3.2:** Muestra un espectro típico de ruido de fondo registrado para una exposición de 56,123 segundos para el detector HPGe2<sup>a</sup>, en donde se indican los picos más energéticos.

deben utilizar una o más fuentes estándares, las cuales tienen energías características que cubren todos los canales de 4k, 8 k, 16 k o 32 k dependiendo de la conversión de ganancia de CAD, en la tabla 3.2 se pueden ver estos valores de energía correspondientes para los picos correspondientes a las fuentes estándares (<sup>152</sup>Eu, <sup>133</sup>Ba, <sup>60</sup>Co, <sup>137</sup>Cs y <sup>241</sup>Am), las cuales utilizaremos para esta calibración, si asumimos una relación lineal exacta entre el número de canal y la energía, tenemos

$$E = m C - b \tag{3.1}$$



**Figura 3.3:** Muestra un espectro gamma de  $^{152}\text{Eu}$ . Para obtener más detalles, consulte el texto.

donde  $E$  es la energía del pico de rayos gamma en unidades de keV,  $C$  es el número de canal del centro del foto-pico en unidades de número de canal. La constante  $m$  es el factor de escala o pendiente, con unidades de energía/números de canal, para producir este factor de escala necesitamos una fuente que produzca rayos gamma con una energía conocida, y  $b$  es la intersección con las unidades keV. Para medir el número de canal de un pico de rayos gamma particular, se puede determinar la constante  $m$ , y una vez que se conoce la energía gamma, se puede determinar a partir del número de canal correspondiente (ver ecuación 3.1).

La pendiente  $m$  es realmente proporcional a la ganancia del amplificador. Si la ganancia es alta, el espectro de energía puede ocupar todos los canales (8k, 16k o según sea el caso). Es aconsejable no mantener la ganancia en el valor más alto para suprimir el ruido electrónico, que puede traer esta ganancia más alta. Además, el amplificador permite configurar un

discriminador de nivel superior (ULD) y uno de nivel inferior (LLD) a través de los medidores ULD y LLD, de modo, que se puedan cortar del espectro energías muy altas o muy bajas. La mayoría, de los rayos gamma de muy altas energías provienen de la radiación de fondo (rayos cósmicos y radioactividad natural), y los rayos gamma de muy baja energía son, en realidad rayos X de alta energía que provienen del material de protección (como los rayos X de plomo (Pb)) como consecuencia de la fluorescencia, cuando los rayos gamma los atraviesan. El uso de LLD y ULD no elimina la interacción de estos rayos gamma dentro del detector, pero elimina sus líneas gamma de huellas dactilares del espectro. Sin embargo, el fondo continuo de Compton permanecerá en el espectro. La intersección  $b$  es proporcional al valor de compensación o LLD del amplificador.

En el presente trabajo, los espectros de rayos gamma se registraron utilizando fuentes radioactivas conocidas, colocadas a varias distancias a partir de 1 a 10 cm de la fuente a la cara del detector HPGe. Cabe mencionar que todos los datos se registraron sin blindaje anti-Compton. Los datos en línea se registraron utilizando CANDLE y software GAMMA. La parte importante del proyecto fue analizar los datos utilizando el software y la lógica física adecuados. Este análisis se realizó completamente fuera de línea utilizando el software CANDLE. Como ya se mencionó, la primera parte del análisis en cualquier experimento de espectroscopia nuclear, es la calibración de los datos utilizando algunas fuentes de laboratorio estándar (por ejemplo,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ). Se calibró un gran número de datos, evento por evento, es decir, un número de canal particular asociado con una energía particular, para ambos detectores HPGe1,2<sup>a</sup>. La calibración se realizó utilizando fuentes estándares de  $^{152}\text{Eu}$  y  $^{133}\text{Ba}$  para el detector HPGe1<sup>a</sup> y  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  para el detector HPGe2<sup>a</sup>. Estas fuentes, se utilizan en experimentos de espectroscopia de rayos gamma debido al amplio rango de energías gamma que ofrecen estos núcleos. Algunas de las principales líneas gamma de  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  junto con sus relaciones de ramificación (intensidades de rayo gamma) se encuentran tabuladas en la tabla 3.2.

El primer paso para analizar los espectros es realizar la calibración, el software CANDLE desarrollado por IUAC, Nueva Delhi sigue la siguiente

ecuación la cual proviene de los métodos Monte Carlo:

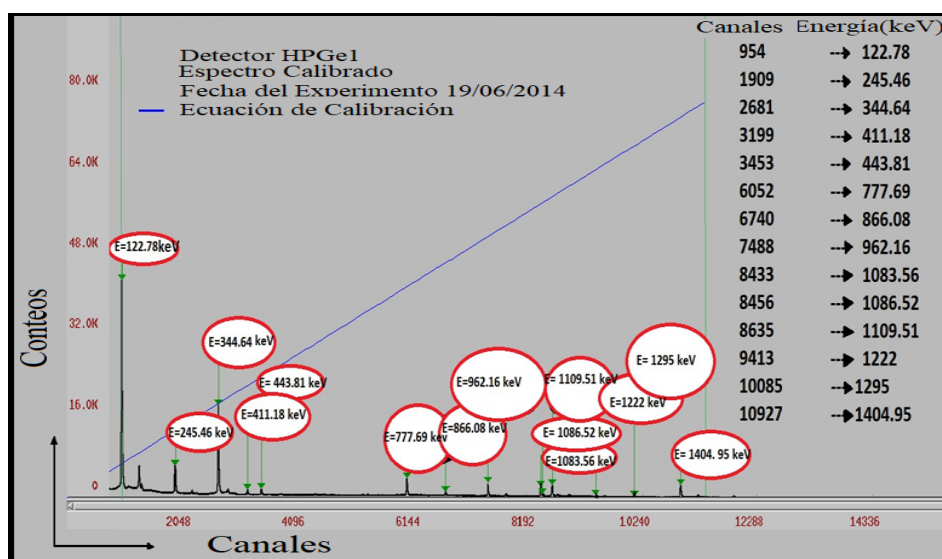
$$E = a + b \times (\text{número de canal}) + c \times (\text{número de canal})^2 \quad (3.2)$$

Donde E es la energía del foto-pico y, a y b son las constantes. La calibración de energía se realiza de manera sencilla con la opción incorporada denominada “calibrar” en el software CANDLE.

Es pertinente mencionar que el emparejamiento de ganancia es una técnica que se requiere para tener una relación definida de energía con el número de canal. Se asigna una ganancia fija durante el registro del espectro de HPGe<sup>1,2<sup>a</sup></sup>. En la figura 3.5 (a) y 3.5 (b), se presenta una esquematización de la ecuación 3.2 anterior.

Como se puede ver en estas figuras, la línea roja sólida es un ajuste lineal entre el número de canal y la energía depositada en un detector HPGe dentro de una amplia región de energía. Los valores del ajuste obtenidos son los que se pueden utilizar para calibrar el espectro correspondiente. Para obtener detalles sobre los valores de ajuste, consulte el apéndice A.1. En el software CANDLE, hay una opción para calibrar el espectro sin dar números externos. Este software se basa en métodos de Monte Carlo, por lo tanto, selecciona automáticamente los parámetros de calibración, sin embargo, es necesario definir al menos dos picos en el espectro deseado para calibrarlo. En el presente trabajo, utilizamos las fuentes conocidas y tomamos datos teóricos del sitio web NNDC Sonzogni [Son21]. Comenzamos marcando todos los picos conocidos en el espectro que define el número de canal y luego con la opción “Calibración”, reemplazamos el número de canal con las energías correspondientes. Una representación de un espectro calibrado directamente en el software CANDLE es mostrado en la figura 3.4. La información sobre los parámetros de calibración obtenidos del software CANDLE son tabulados en la tabla A.4. Una de las características del detector HPGe, es obtener espectros con muy buena resolución. En el Capítulo 2 presentamos los detalles del FWHM y la Resolución. Los valores de FWHM para los picos marcados son medidos, con el software CANDLE y se representan en las figuras 3.6 (a) y 3.6 (b).

Una representación de la medida del FWHM, con respecto a la distancia se muestra en la figura 3.7. Como puede verse en esta el FWHM no varía mucho ( 1 %) a medida, que aumenta la distancia, explica que el espectro puede ser registrado a distancias más grandes sin tener mucho cambio en el FWHM. Para tener una comparación de dos detectores los datos del FWHM, se extraen a una distancia 7.5 cm y se muestran con cuadrados negros en la figura 3.7.



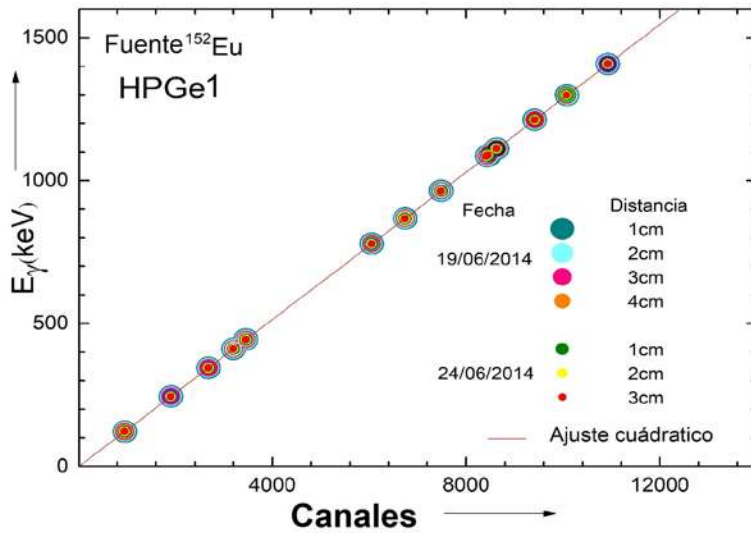
**Figura 3.4:** Muestra una captura de pantalla de un espectro calibrado en CANDLE. Los picos se asignan a los rayos gammas intensos de  $^{152}\text{Eu}$ . También se muestra el número de canal correspondiente a las energías con la que se realizara la calibración.

Para conocer la diferencia de la resolución para dos detectores diferentes, hemos medido FWHM (resolución) del software CANDLE para HPGe1,2<sup>a</sup> y se presento en una sola gráfica (ver figura 3.9). Como se puede ver en la figura mencionada, la resolución de ambos detectores es la misma y aumenta a medida, que aumenta la energía del foto-pico o gamma. Además, todos los valores FWHM calculados se convierten a

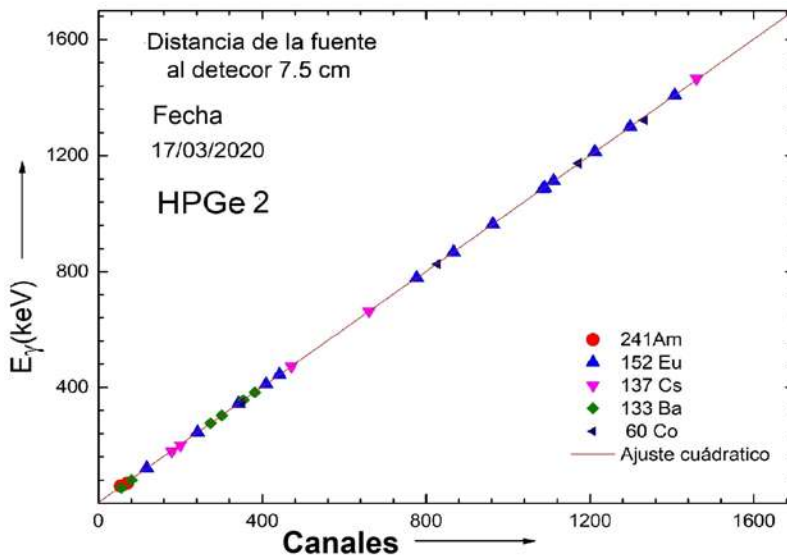
resolución utilizando la ecuación 2.5 y se grafican en la figura 3.9 (a) y 3.9 (b). Se puede observar que las gráficas de resolución en la energía varían de 50 a 500 keV, tiene disminuciones exponenciales y después la curva se comienza a saturar, es decir, la resolución es menor al aumentar la energía. En figura 3.10, se presenta una comparación de la resolución de los dos detectores a una distancia fija. Como se puede ver que ambas curvas siguen tendencias similares y no tienen diferencia significativa. Los datos de los ajustes de las gráficas vienen detallados en el apéndice A.4.

Fuente	Energía(keV)	Intensidad de rayos gamma (%)
<sup>241</sup> Am	26.3445	2.400
<sup>133</sup> Ba	59.541	35.900
	79.614	2.620
	80.997	34.060
	276.389	7.1640
	302.853	18.330
	356.017	62.050
<sup>152</sup> Eu	383.851	8.940
	121.782	28.580
	244.698	7.580
	344.698	26.540
	411.116	2.234
	443.965	2.821
	778.904	12.940
	867.378	4.245
	964.079	14.605
	1085.869	10.200
	1089.737	1.727
1112.074	13.644	
1212.948	1.422	
1299.140	1.6235	
1408.006	21.005	
<sup>137</sup> Cs	661.657	85.120
<sup>60</sup> Co	1173.237	99.974
	1332.501	99.9857

**Cuadro 3.2:** Muestra los valores espectroscópicos y las intensidades mayores al 1 % de las fuentes estándares <sup>152</sup>Eu, <sup>133</sup>Ba, <sup>60</sup>Co, <sup>137</sup>Cs, <sup>241</sup>Am. Los datos se toman de la tabla de isótopos (Sonzogni [Son21])

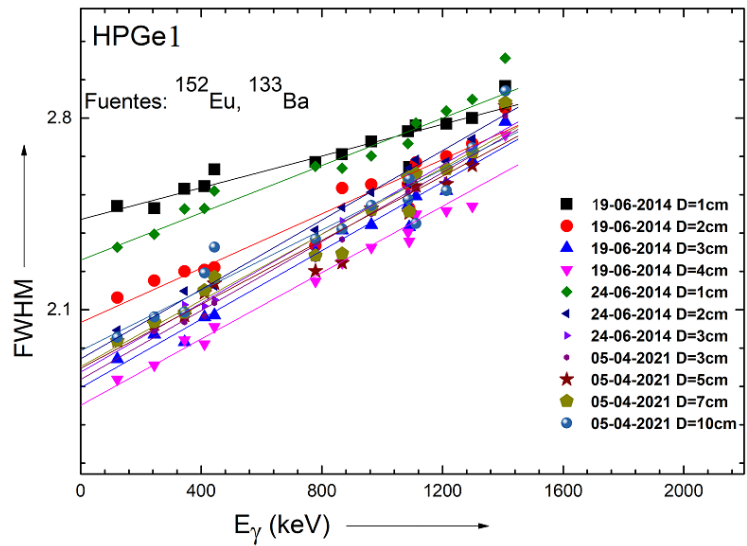


(a)

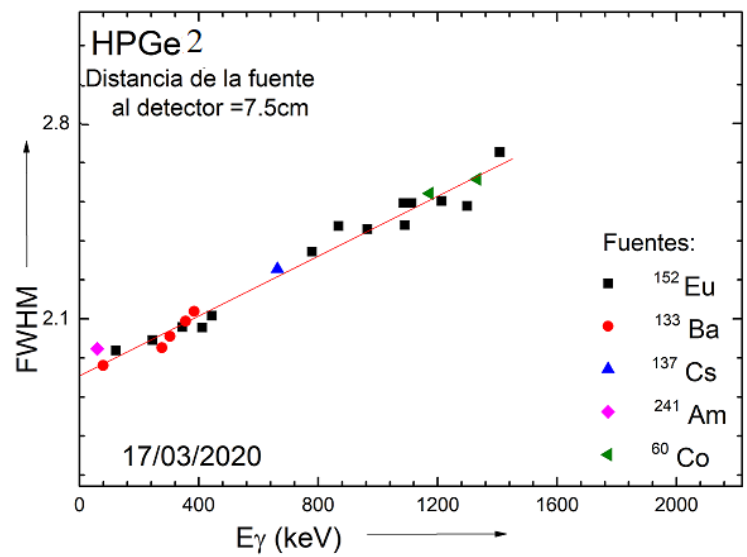


(b)

**Figura 3.5:** Presentación de las gráficas de energía vs el número de canal para los dos detectores HPGe (a) Se muestra una gráfica para la energía ( $E_\gamma$ ) vs el número de canal para el detector HPGe1<sup>a</sup> para diferentes fechas y distancias, en el cual se puede observar la tendencia lineal de los datos y (b) Se muestra la energía ( $E_\gamma$ ) vs el número de canal para el detector HPGe2<sup>a</sup>, para diferentes fuentes y una sola distancia. Los errores son <1 % y se encuentran dentro de los símbolos.

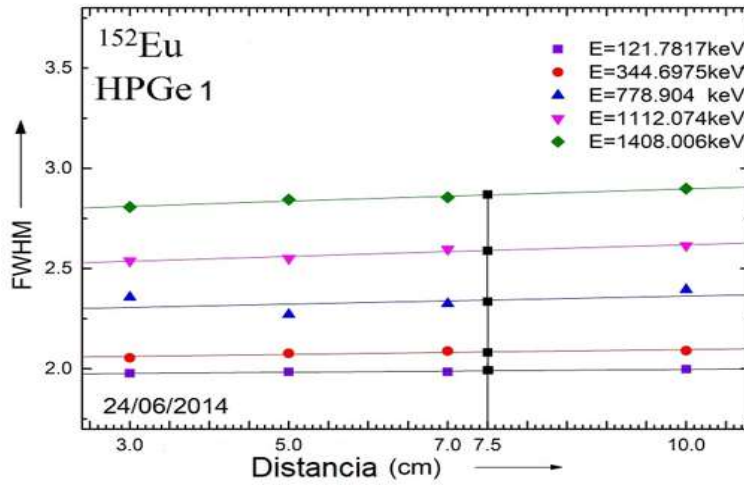


(a)

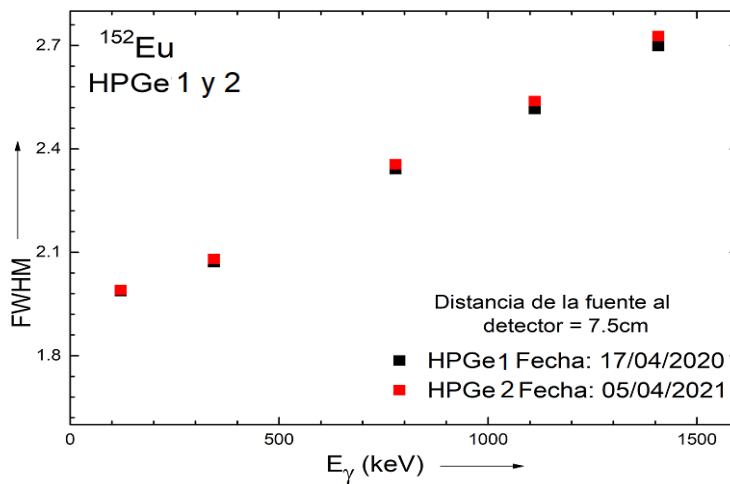


(b)

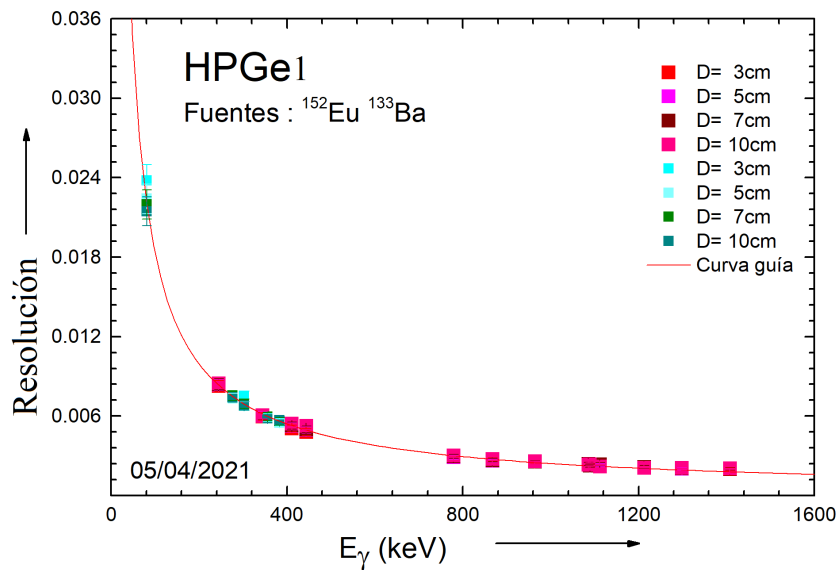
**Figura 3.6:** Presenta las gráficas para el FWHM vs energía para el detector HPGe1<sup>a</sup> en la figura (a), donde se muestra la gráfica para dos fuentes  $^{152}\text{Eu}$  y  $^{133}\text{Ba}$ , además de mostrar varias distancias de la fuente a la cara del detector y varias fechas en el que se realiza el experimento. Y para el detector HPGe2<sup>a</sup> en la figura (b) donde se muestran una sola distancias de la fuente a la cara del detector y diferentes fuentes estándares.



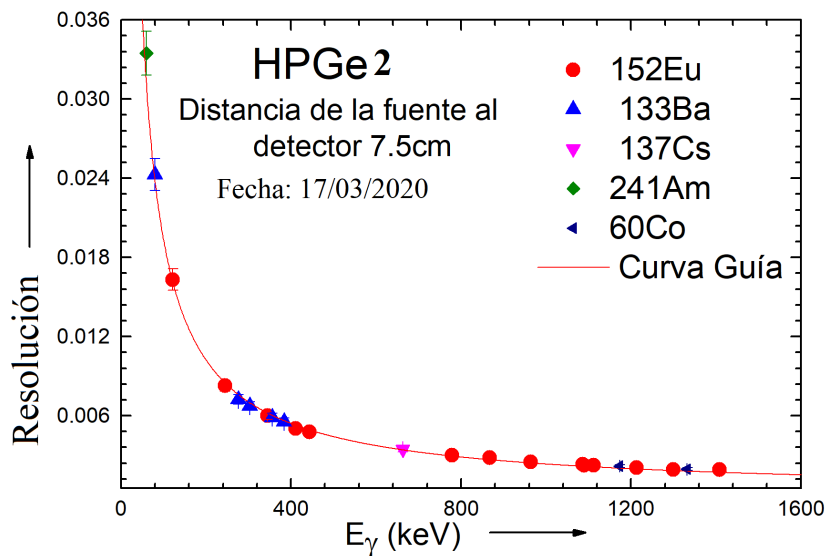
**Figura 3.7:** Muestra una gráfica del FWHM vs distancia para cinco de los picos mas intensos, y los recuadros negros indican el FWHM para las las cinco energías correspondientes, para la distancia de 7.5cm.



**Figura 3.8:** Muestra la comparación del FWHM para los dos detectores donde los cuadros rojos son para el detector HPGe1<sup>a</sup>, y los cuadros negros son para el detector HPGe2<sup>a</sup>.

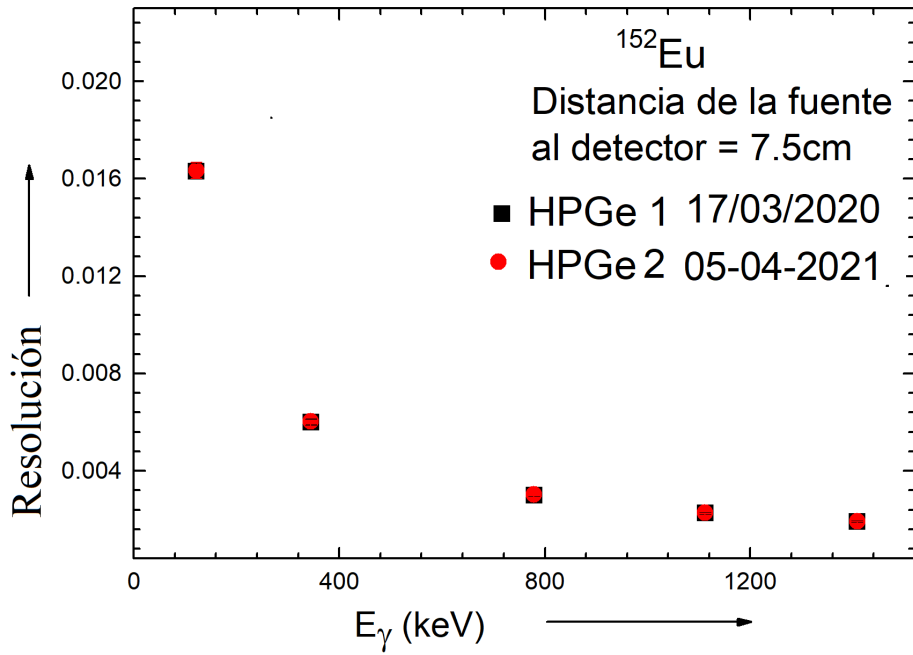


(a)



(b)

**Figura 3.9:** Presenta dos gráficas de resolución en función de la energía para los dos detectores HPGe1<sup>a</sup> (a) se muestra la resolución para dos fuentes  $^{133}\text{Ba}$  y  $^{152}\text{Eu}$  y para una fecha, se eligió la mas cercana a a la fecha del detector HPGe2<sup>a</sup>, y para el detector HPGe2<sup>a</sup> (b) se muestra la gráfica para la resolución para diferentes fuentes, solo una distancia y una fecha.



**Figura 3.10:** Muestra la comparación de resoluciones de los dos detectores HPGe $1,2^a$ , el cuadro negro es para los datos del detector HPGe $1^a$  y los cuadros rojos son para los datos del detector HPGe $2^a$ .



**Figura 3.11:** Muestra una fotografía típica del amplificador 572 usado para la calibración del detector de silicio.

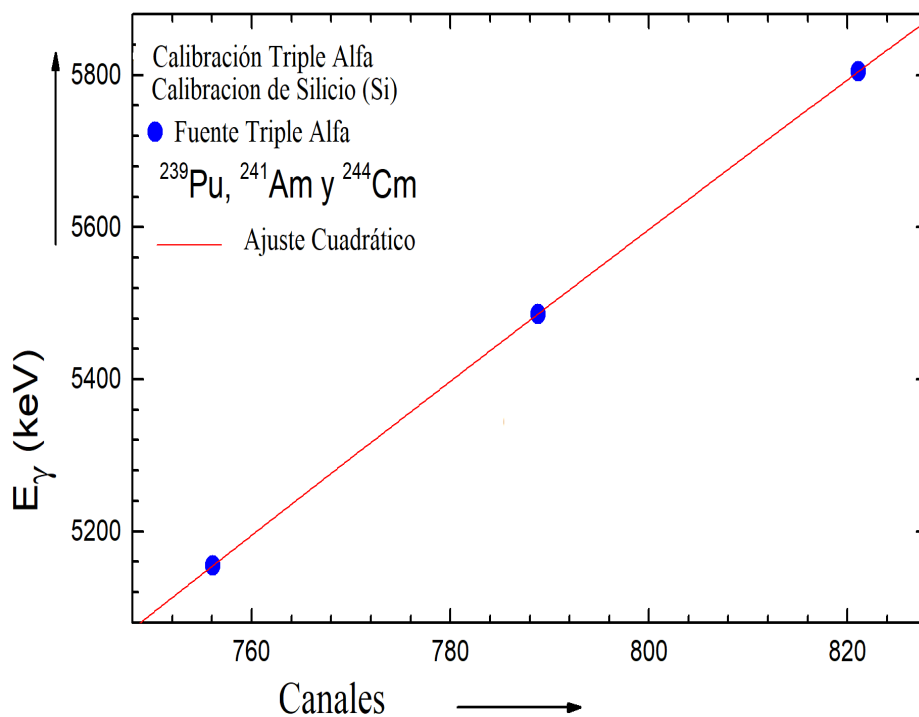
## 3.2. Calibración: Detector de Silicio

Se ha intentado calibrar el detector de silicio utilizando una fuente alfa triple ( $^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Am}/^{244}\text{Cm}$ ). Se eligió la fuente triple alfa para calibrar el espectro en el software CANDLE. Para lograr el espectro por debajo de 2K, establecemos la dependencia en 20 usando la perilla de ganancia gruesa en el amplificador 572. En la figura 3.11 muestra una fotografía típica del amplificador 572. Podemos Ajustar más finamente la ganancia, pero no fue necesario ya que no estábamos interesados en calibrar directamente desde el hardware. Sin embargo, para una sola fuente de energía alfa, podemos calibrar directamente el espectro desde el propio hardware. La energía alfa de la fuente triple alfa está tabulada en la tabla 3.3.

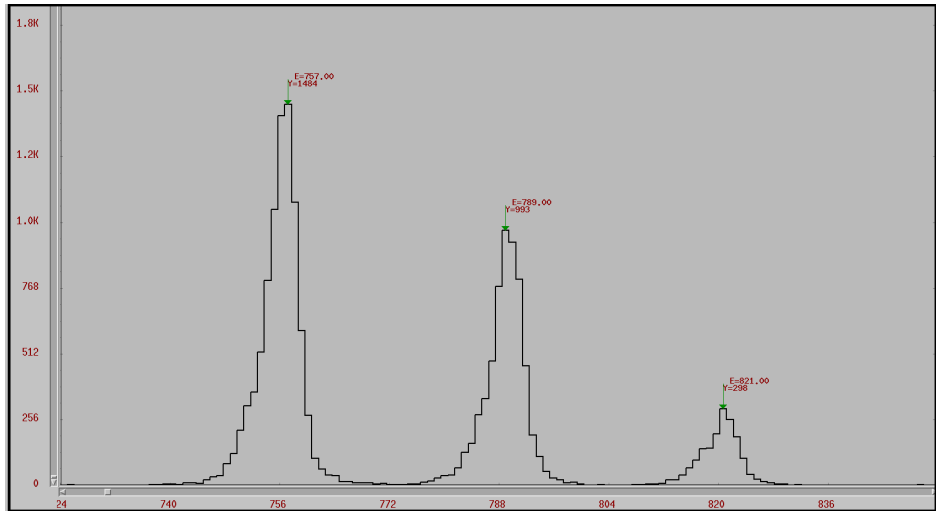
En esta configuración experimental, la fuente se fijó a 7.5 cm a la cara del detector. La calibración se realizó utilizando la ecuación 3.2 y se presenta en la gráfica 3.12. La calibración se realizó en el software CANDLE y se presenta en la figura 3.13. Como puede verse en esta figura 3.14, los picos de la fuente triple alfa se distinguen bien, los parámetros de calibración están tabulados en las tablas A.4 del apéndice.

Radioisótopo	Energía(Kev)
$^{239}\text{Pu}$	5155
$^{241}\text{Am}$	5486
$^{244}\text{Cm}$	5805

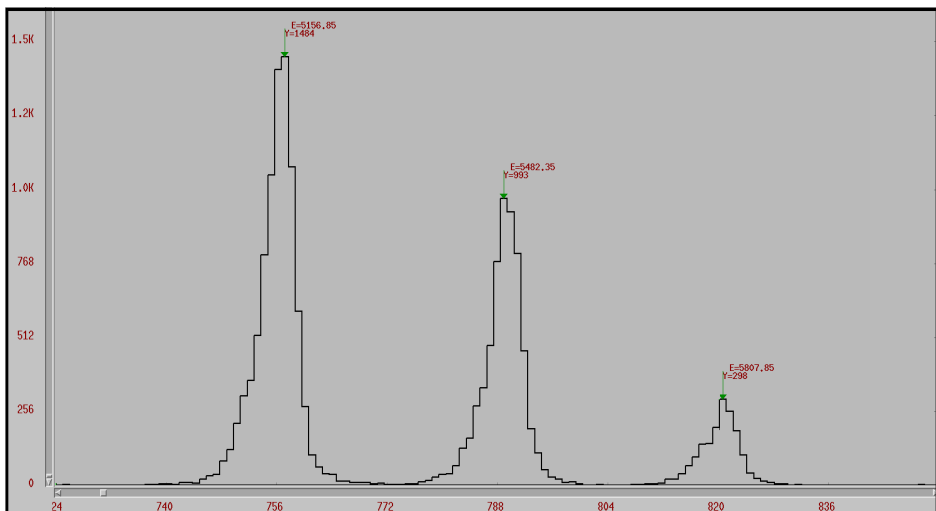
**Cuadro 3.3:** Presenta una tabla con el radioisótopo y su energía correspondiente para la calibración de la fuente triple alfa.



**Figura 3.12:** Presenta la gráfica de calibración de energía vs número de canal para detector de silicio a una distancia de 7.5cm.



**Figura 3.13:** presenta una captura de pantalla tomada del software CANDLE esto para el espectro sin calibrar, los picos de energía marcado están en unidades de keV.



**Figura 3.14:** Presenta una captura de pantalla tomada del software CANDLE para un espectro calibrado, los picos marcados están en unidades de keV.

# 4

## Eficiencia Absoluta e Intrínseca de los Detectores

---

La calibración de eficiencia es de considerable importancia en estudios fundamentalmente de espectroscopia nuclear y en muchas aplicaciones de espectrometría de rayos gamma, por ejemplo ambiental, biológica y monitoreo de efluentes líquidos, en esta sección presentaremos la eficiencia absoluta, geométrica e intrínseca de los detectores HPGe<sup>1,2</sup>.

### 4.1. Eficiencia Absoluta

En general, la eficiencia absoluta ( $A_\epsilon$ ) es la relación entre los valores corregidos del número total de pulsos registrados en el pico de absorción de energía y el número total de fotones emitidos por la muestra. Esta eficiencia tiene en cuenta la absorción y factores de atenuación que intervienen en la detección de rayos gamma para una muestra con una geometría determinada.

De forma numérica, la eficiencia absoluta ( $A_\epsilon$ ) es la relación entre el número total de fotones detectados ( $N_{med}$ ) y el número total de fotones emitidos por la fuente ( $N_{em}$ )

$$A_\epsilon = N_{med}/N_{em} \quad (4.1)$$

El número de fotones emitidos por la fuente ( $N_{em}$ ) se puede definir como la actividad del fuente ( $A_T$ ) que emite fotones de energía ( $E_\gamma$ ) multiplicada por la intensidad de los rayos gamma ( $I_\gamma$ ):

$$N_{em} = A_T \cdot I(E_\gamma) \quad (4.2)$$

La actividad de la fuente ( $A_T$ ) puede ser definida mediante la siguiente relación:

$$A_T = A_0 \cdot \exp[-\lambda(t - t_0)] \quad (4.3)$$

Donde,  $A_0$  es la actividad de la fuente estándar en el momento de su fabricación en ( $t_0$ ),  $t$  es el tiempo en el que se llevó a cabo el experimento,  $\lambda$  es la constante de desintegración radioactiva que esta relacionada con la vida media ( $t_{1/2}$ ) de la fuente radioactiva por medio de la siguiente expresión; ( $t_{1/2} = 0.693/\lambda$ ).

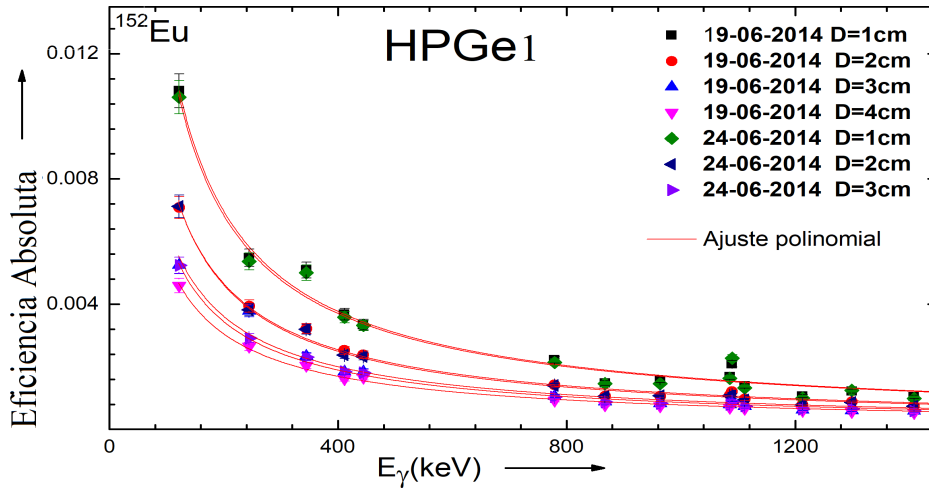
El número total de fotones detectados por el detector  $N_{med}$ , se puede expresar como el número total de eventos ( $N_P$ ), en función de la energía de rayos gammas ( $E_\gamma$ ) registrados para un cierto tiempo de conteo ( $t_c$ )

$$N_{med} = N_P(E_\gamma)/t_c \quad (4.4)$$

Usando las ecuaciones anteriores para presentar la eficiencia absoluta, en función de parámetros experimentales, obtenidos por el software CANDLE y datos iniciales dados por el fabricante podemos presentar la ecuación 4.1, de la siguiente forma:

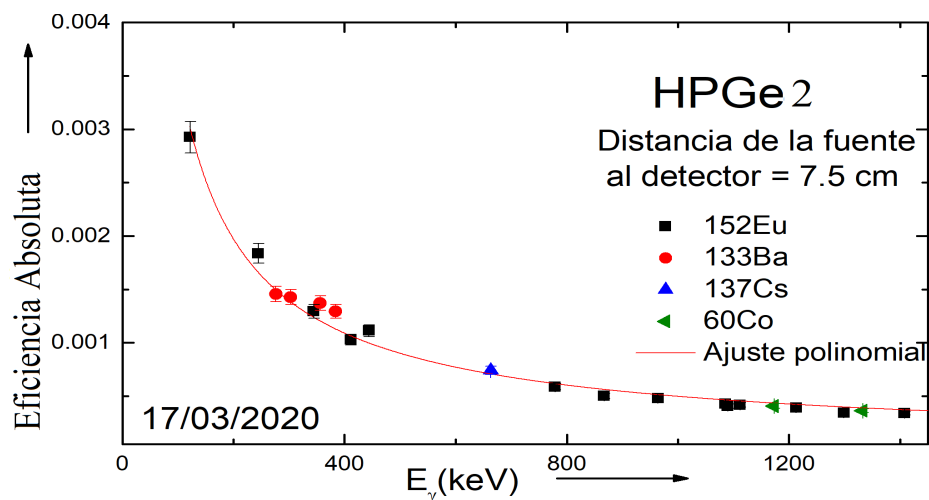
$$A_\epsilon = \frac{1}{A_0 \exp(-\lambda(t - t_0))t_c} \frac{N_P(E)}{I_\gamma} \quad (4.5)$$

Los datos experimentales para la calibración de la eficiencia se obtienen midiendo de las fuentes radioactivas conocidas previamente calibradas en el capítulo 2 ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  y  $^{241}\text{Am}$ ) y se presentan en la figura 4.1 y 4.2. Como se puede apreciar en estas figuras, que para los rayos gamma alrededor de 121keV la eficiencia alcanza el máximo y luego disminuye exponencialmente con el aumento de la energía. La región de energía muestra el camino medio de los fotones en el detector, el volumen activo y la auto-absorción que determinan la eficiencia de los detectores en otra palabras; las figuras muestran que para el valor de energía en la que se obtiene un máximo alrededor de 121keV, el factor de absorción de las partes del detector entre la fuente y el volumen activo disminuye resultando en este máximo en la eficiencia, por otro lado a mayores energías los fotones energéticos pueden cruzar el volumen activo sin interactuar con la región activa del detector, este proceso se hace cada



**Figura 4.1:** Muestra la eficiencia absoluta calculada usando la ecuación 4.5 para el detector HPGe1<sup>a</sup> y la fuente de  $^{152}\text{Eu}$  en diferentes fechas. la línea de ajuste polinomial se hizo para ver el comportamiento de los datos.

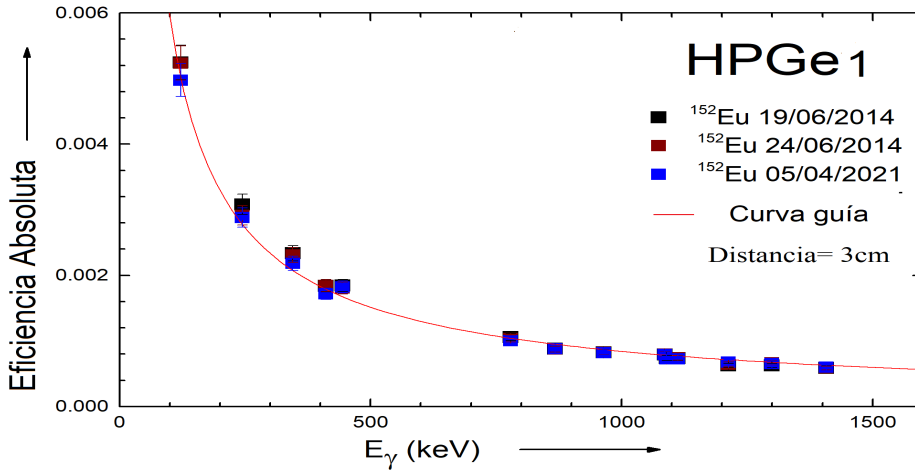
vez mas probable a medida que aumenta la energía, dando como resultado la paulatina disminución de la eficiencia absoluta. Las líneas en las figuras 4.1 y 4.2, están dibujadas con objetivo únicamente de ser una guía visual de cómo los datos experimentales se están comportando. La figura 4.1 es una comparación de las eficiencias en diferentes distancias de la fuente de  $^{152}\text{Eu}$  a la cara del detector y diferentes fechas experimentales, esto se ha realizado para comprobar la posible buena dependencia en la eficiencia del detector a diferentes distancias de la fuente y dos fechas diferentes. Cuando la fuente se mantiene a 1 cm de distancia, el detector HPGe1<sup>a</sup> es más eficiente y disminuye gradualmente a medida que aumenta la distancia. Además, la eficiencia es calculada en diferentes fechas con la misma fuente a la distancia del detector y se observa que no hubo mucho efecto. Como ejemplo típico, en la figura 4.1, cuadrado negro (19/06/2014) y diamante verde (24/06/2014) superpuestos sobre el. Esto refleja claramente que el detector se mantuvo en casi la misma posición.



**Figura 4.2:** Muestra una gráfica de eficiencia absoluta calculada, usando la ecuación 4.5 para HPGe2<sup>a</sup> para 4 diferentes fuentes conocidas, una sola distancia y fecha. El ajuste polinomial se hizo para ver el comportamiento de los datos

El análisis de la variación de la eficiencia absoluta con la distancia en el mismo detector, es válido únicamente si no hay variación en el tiempo en la gráfica 4.1 se puede ver, que no hay cambios en la eficiencia absoluta, con el tiempo (es decir fechas diferentes), pero una, respuesta concluyente requiere una prueba, la manera en que probamos esto es que para cada uno de los rayos gamma de <sup>152</sup>Eu. Una manera de saber la precisión de datos, es mediante la desviación relativa, la cual es una medida estadística que describe la propagación de los datos con respecto a la media y el resultado se expresa en términos de porcentajes, en fórmulas es; la desviación estándar dividida por la media. Se calcularon las desviaciones estándares relativas para los valores correspondientes a las tres fechas diferentes, esta comparación solo se puede hacer para estas fechas diferentes y con la distancia de 3cm que es común para estas, como se muestra en la figura 4.3, y los datos de la gráfica se encuentran en la tabla 4.1

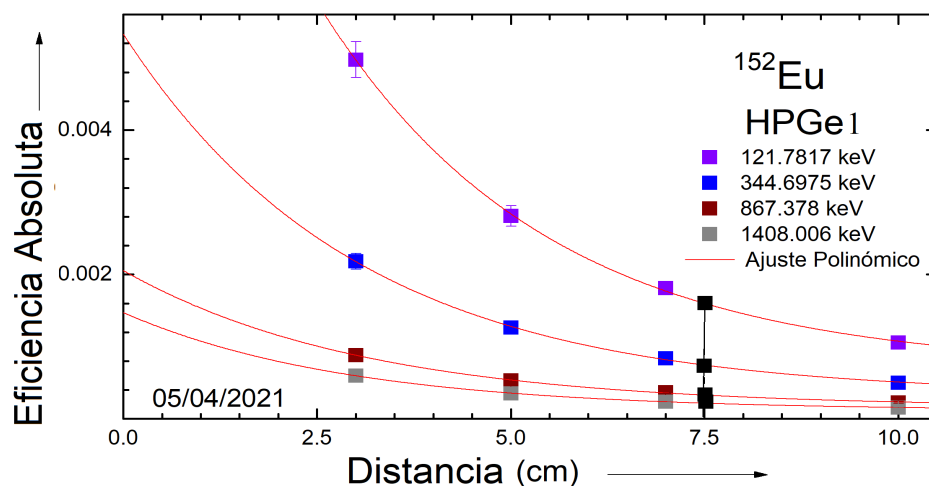
En la figura 4.2 se muestra la eficiencia absoluta registrada por HPGe2<sup>a</sup>



**Figura 4.3:** Muestra una gráfica de eficiencia absoluta vs energía para el detector HPGe1<sup>a</sup> para tres fechas diferentes y con una distancia fija de 3cm de la fuente a la cara del detector para la fuente de <sup>152</sup>Eu.

Energia (keV)	DER
121.7817	3.026884906
244.6975	3.647957088
344.6975	3.735681061
411.1163	3.849001795
443.965	1.139598175
778.904	2.956500448
867.378	0.564162409
964.079	0.441524492
1085.869	0.255667507
1089.737	1.148011585
1112.074	1.209297805
1212.948	3.952261542
1299.14	3.289926148
1408.006	1.084672895

**Cuadro 4.1:** Muestra los valores para la desviación estándar relativa (DER) de la eficiencia absoluta para cada energía de rayo gama de <sup>152</sup>Eu a una distancia fija de 3cm y tres fechas diferentes 19/06/2014, 24/06/2014 y 05/04/2021 para el detector HPGe1<sup>a</sup>.



**Figura 4.4:** Muestra una gráfica de la eficiencia absoluta vs distancia medida desde el HPGe1<sup>a</sup> usando la estándar fuente <sup>152</sup>Eu y con cuatro energías fijas descritas en la figura anterior. El ajuste polinomial se hizo para ver el comportamiento de los datos.

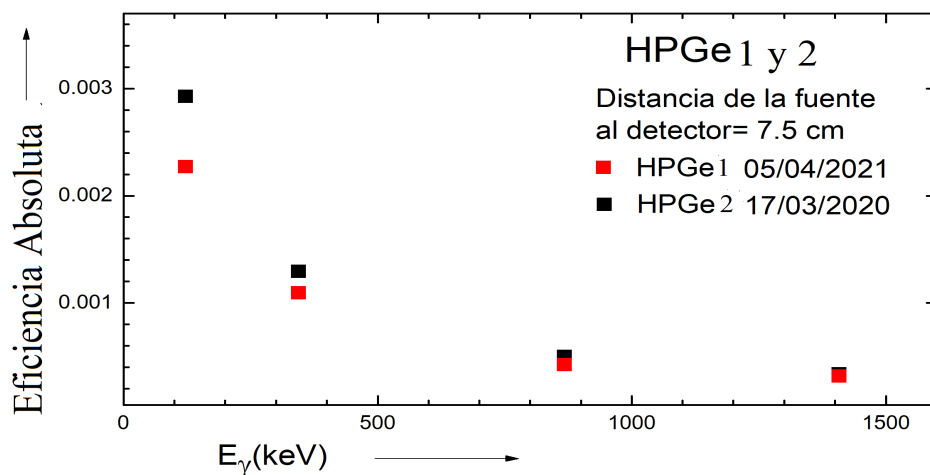
a una distancia de la fuente al detector de 7.5 cm en la fecha experimental de 17/03/2020. Para comparar la eficiencia de dos detectores con la misma fuente y a una misma distancia al detector, deducimos los valores de eficiencia para cuatro de los mas intensos rayos gamma, esto se presentan en la figura 4.4, las líneas de color rojo que se muestran en esta figura son ajustes de polinómicos que nos indican la tendencia de los datos, de modo que podamos tener valores apropiados a la distancia de 7.5 cm para la eficiencia absoluta en el apéndice A.4 se muestran los valores de cada uno de los coeficientes de estos ajustes.

La figura 4.5 muestra una comparación de la eficiencia absoluta para los detectores HPGe1,2<sup>a</sup> para cuatro de las energías de rayos gamma más intensas, como se puede ver en esta figura, el detector HPGe2 es un poco más eficiente que el HPGe1<sup>a</sup>, esto puede deberse a la calidad del cristal presente dentro del detector. Sin embargo, la tendencia de la eficiencia es la misma. Se puede mencionar que después de tener las mediciones

de eficiencia absoluta, el espectrómetro está listo para realizar mediadas, experimentales de espectroscopia nuclear y de la sección eficaz absoluta para los residuos nucleares obtenidos por cualquier reacción nuclear que vale para la actualización de los datos nucleares en el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Deberíamos tener en cuenta, que las correcciones de eficiencia en la medición de datos de la sección transversal absoluta es un paso obligatorio para tener una medición precisa de la eficiencia absoluta, en lo que veremos más adelante en esta sección se ha intentado comparar nuestras medidas experimentales con la curva estándar de eficiencia.

Aunque los cristales de los dos detectores pueden ser del mismo lote han pasado por diferentes vida hasta llegar aquí, ambos tienen los mismos volúmenes, mismos diámetros de las caras. En la comparación de las dos eficiencias absolutas se muestra que a energías mas altas la eficiencia es casi igual, pero a energías más bajas sucede una pequeña dispersión particularmente en las energías mas bajas, en la figura 4.5, de este gráfico, aquí se muestra una clara diferencia entre el HPGe1 rojo y el HPGe2 negro, esta diferencia en energía claramente muestra que los electrones y huecos que salen por el efecto fotoeléctrico en el cristal tienen ahora bajas energías, lo interesante es que los dos cristales muestran que el efecto de jaula (traps) los defectos dentro del cristal son diferentes, son diferentes en términos de defectos, esto sucede por que la historia de usos es diferente el detector de india se usó directamente en línea en aceleradores, utilizando partículas rápidas como electrones y neutrones particularmente neutrones, que hacen daño al cristal, y por lo tanto en la energía muy baja se muestra la diferencia entre los dos detectores, cuando aumentamos la energía es igual, por estos electrones de mas energía pueden pasar por las jaulas y ser recolectados por los detectores. Si un electrón de baja energía proveniente de un rayo gamma de baja energía una vez dentro de la jaula no puede salir fácilmente necesita un mínimo de energía para escapar por eso el proceso de aniquilación es bueno en este proceso estos electrones son desechados por excitación térmica.

Es interesante ampliar la región energética, que se muestra en las figu-



**Figura 4.5:** Muestra una comparación directa para la eficiencia absoluta de los detectores HPGe1,2<sup>a</sup> con la distancia fija de 7.5cm y teniendo el menor periodo de tiempo entre los dos experimentos.

ras anteriores (figura 4.1 y 4.2). Para esto ampliaremos el espectro en la región energética menor a 121 keV, junto con la región que se muestra en las figuras anteriores, tendremos cubierto las energías bajas y altas hasta alrededor de los 1408keV, utilizando las fuentes conocidas (<sup>133</sup>Ba y <sup>152</sup>Eu) para el detector HPGe1<sup>a</sup>, este experimento se realizó en el año 2021, se calculó la eficiencia absoluta del detector HPGe1<sup>a</sup> y se presenta en las figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 que corresponden a diferentes distancias de las fuentes al detector. También ampliamos la parte de la región de energía más baja para el detector HPGe2<sup>a</sup>, como se se muestra en la figura 4.10. Como se puede ver en estas figuras, tenemos tres regiones de interés la primera es a bajas energías menores a los 121.79keV donde la eficiencia absoluta disminuye, con la disminución, de la energía en la segunda región comienza aumentar la eficiencia absoluta con el aumento energía hasta llegar a un máximo al rededor de los 121keV, en la tercera región la eficiencia absoluta disminuye, con el aumento de la energía y tiene una tendencia a disminuir exponencialmente. Anteriormente detallamos lo que sucede en las regiones segunda y tercera. Observamos aquí en la

primera región de estas gráficas en el rango de bajas energías la eficiencia tiene valores bajos, debido a que los fotones tienden a desaparecer por la auto-absorción en las capas muertas del detector (como la carcasa de aluminio del detector) y por la atenuación, con el incremento de la energía este factor desaparece dando como resultado, el aumento en la eficiencia absoluta. Para describir la eficiencia absoluta experimental medida, en el presente trabajo utilizando fuentes conocidas ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  y  $^{241}\text{Am}$ ) utilizamos las curvas estándares de eficiencia para energías menores a 82keV y para energías mayores a 82keV, estas se conoce comúnmente como leyes de potencias las cuales vienen directamente de los métodos Monte Carlo:

$$A_{\epsilon} = 10^{(a_1+a_2 \log(E)+a_3 \log(E)^2)}; E_0 < 82\text{keV} \quad (4.6)$$

$$A_{\epsilon} = (a_1/E_Y)^{a_2} + a_3 \exp(-a_4 E_Y); E_0 > 82\text{keV} \quad (4.7)$$

donde,  $A_{\epsilon}$  es la eficiencia máxima de absorción de energía total a la energía  $E_Y$  (keV),  $E_0$  la energía (keV) corresponde a los puntos de unión,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  y  $a_4$  son los parámetros de ajuste constantes a energías más altas de la curva, y  $b_1$ ,  $b_2$  y  $b_3$  son los parámetros de ajuste constantes en la región de baja energía de la curva. Es interesante explicar que a la energía,  $E = 82$  keV, se le llama el punto de unión donde ambas curvas dan casi los mismos valores. Calculamos los parámetros de ajuste de los métodos de Monte Carlo, en el software ORIGIN manteniendo el número de pasos al mínimo posible ( $< 0.01$ ).

Las eficiencias absolutas experimentales medidas, para los detectores HPGe1,2<sup>a</sup> son comparadas con la ecuación 4.7 (ley de potencia 1) y 4.6 (ley de potencia 2) y son presentadas en las figuras; 4.6 a la 4.10. Los detalles sobre los valores de los parámetros de ajuste son tabulados en la tabla 4.2.

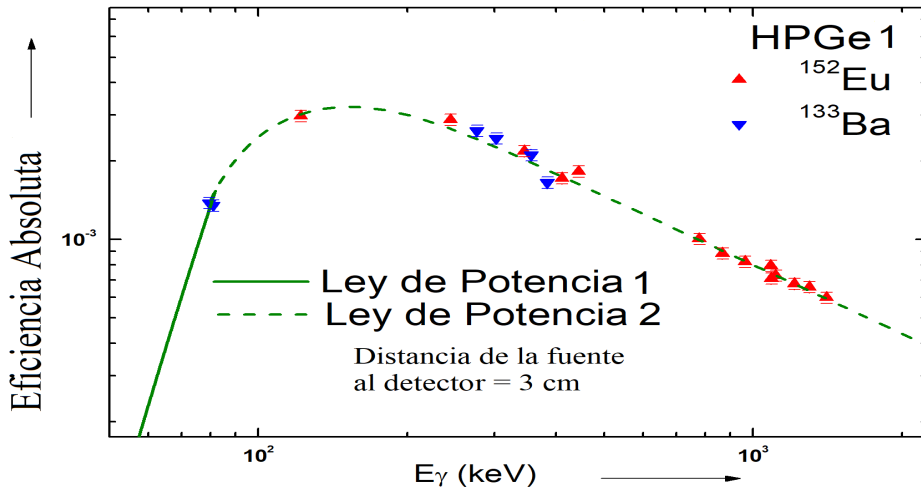
Como se puede ver en las figuras; 4.6 a la figura 4.10, nuestros datos experimentales coinciden bien con los cálculos teóricos realizados utilizando las ecuaciones 4.7 y 4.6. Las líneas verdes continuas corresponden a la ley de potencia 1 (es decir, la ecuación 4.7) y las línea discontinua verde

Parámetros de ajuste	figura 4.6	figura 4.7	figura 4.8	figura 4.9	figura 4.10
Ley de Potencia 1					
$a_1$	0.2941	016701	0.11121	0.06359	0.16701
$a_2$	0.87709	0.87709	0.87709	0.87709	0.87709
$a_3$	-0.4549	-0.02769	-0.01938	-0.01187	-0.02769
$a_4$	0.0255	0.0255	0.0255	0.0255	0.0255
Ley de Potencia 2					
$b_1$	-21.11029	-21.27111	-21.43113	-21.61679	-21.29647
$b_2$	13,319435	13.29267	13.26588	13.23634	13.28771
$b_3$	-1.9632	-1.95599	-1.94877	-1.94082	-1.95465

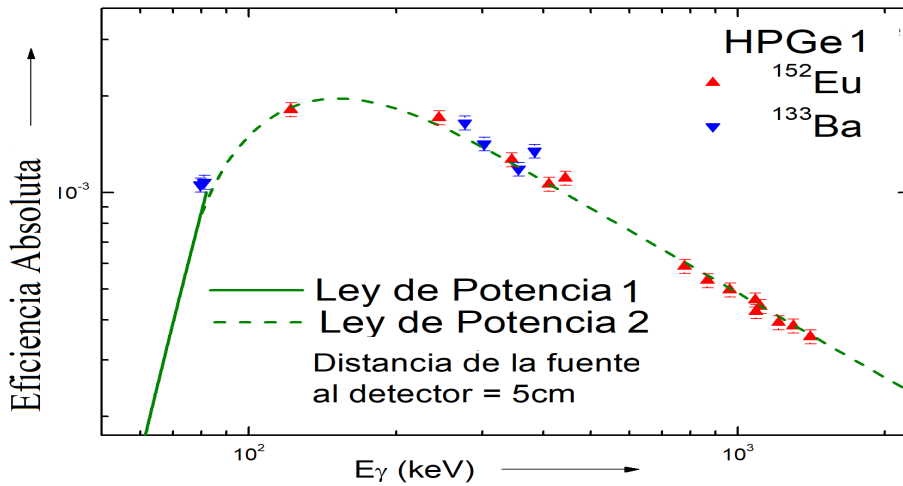
**Cuadro 4.2:** Muestra parámetros de ajuste obtenidos de la ecuaciones para las leyes de potencia 4.7 y 4.6. Se observan los valores para las 5 figuras.

corresponde a la Ley de potencia 2 (es decir, la ecuación 4.6) . Las barras de errores que se muestran en las figuras, son los errores sistemáticos junto con los errores estándares.

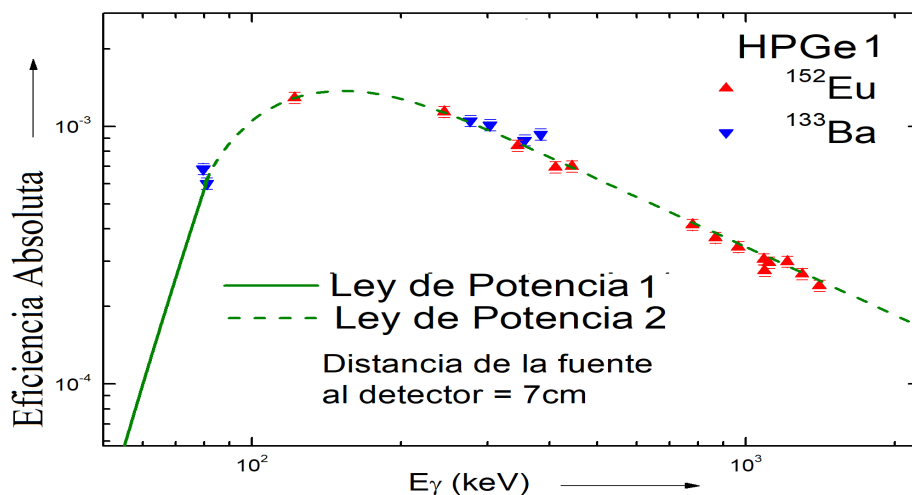
El por que de estos valores se explica con dos motivos principales El primero es que el detector solo tiene la capacidad de detectar electrones y huecos que resultan del efecto fotoeléctrico, únicamente lo que produce señal en el detector es el efecto fotoeléctrico, este efecto produce un electrón que lleva la energía del fotón, este es una huella de la gamma incidente en el detector. Los demás procesos no general señal del detector. Las secciones eficaces son muy pequeñas y por lo tanto la eficiencia que solo es por la detención de electrones y huecos que resultan después del efecto fotoeléctrico es muy bajo. Otra razón importante es que los efectos de geometría De los rayos gamma emitidos en ángulo solido total en todas las direcciones  $4\pi$  solo se detectan un ángulo solido pequeño entonces por eso disminuye la cantidad de gamas que son medido por el detector. Si calculamos el porcentaje de estas eficiencias es muy pequeño menor



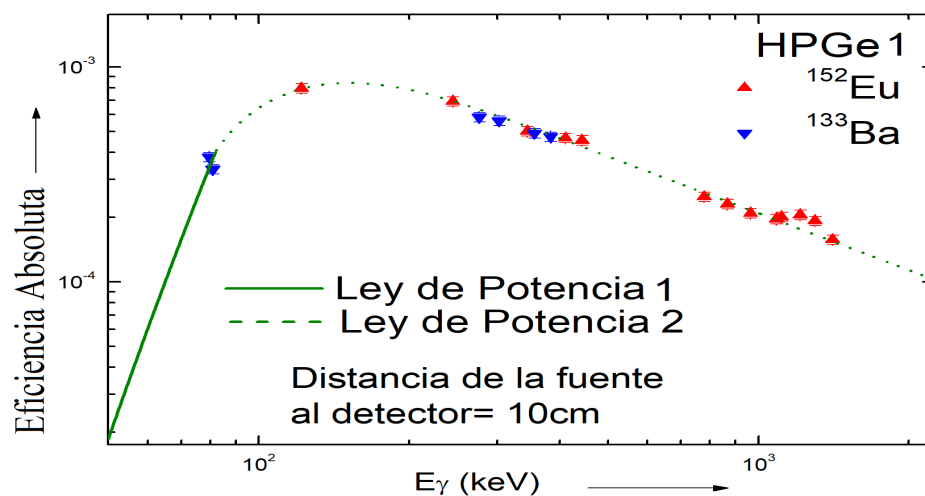
**Figura 4.6:** Muestra la eficiencia absoluta experimental con el ajuste dado por las ecuaciones 4.7 y 4.6 para el detector HPGe1<sup>a</sup>, en la distancia de la fuente al detector= 3cm, para la fuente de <sup>152</sup>Eu y la fecha del 05/04/2021.



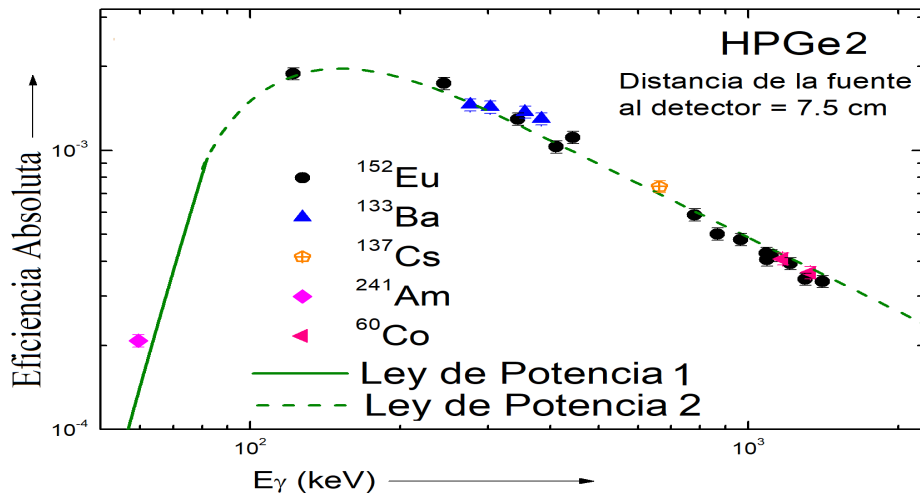
**Figura 4.7:** Muestra la eficiencia absoluta experimental con el ajuste dado por las ecuaciones 4.7 y 4.6 para el detector HPGe1<sup>a</sup> en la distancia de la fuente al detector= 5cm, para la fuente de <sup>152</sup>Eu y la fecha del 05/04/2021.



**Figura 4.8:** Muestra la eficiencia absoluta experimental, con el ajuste dado por las ecuaciones 4.7 y 4.6, para el detector HPGe1<sup>a</sup> en la distancia de la fuente al detector= 7cm, para la fuente de <sup>152</sup>Eu y la fecha del 05/04/2021.



**Figura 4.9:** Muestra la eficiencia absoluta experimental con el ajuste dado por las ecuaciones 4.7 y 4.6, para el detector HPGe1<sup>a</sup> en la distancia de la fuente al detector= 10cm, para la fuente de <sup>152</sup>Eu y la fecha del 05/04/2021.



**Figura 4.10:** Muestra la eficiencia absoluta experimental con el ajuste dado por las ecuaciones 4.7 y 4.6, para el detector HPGe1<sup>a</sup> en la distancia de la fuente al detector= 7.5cm, para la fuente de <sup>152</sup>Eu y la fecha del 17/03/2020.

al 1%. Por que es tan pequeño, esta emisión es multidireccional puede ir en cualquier dirección y solo tengo un detector, si coloco el detector a un cierto ángulo con respecto de la fuente muy pocas líneas gama caen directamente al detector si colocamos un arreglo de detectores como el detector clover detector ahora registraremos más líneas gamma y la eficiencia del detector incrementara.

## 4.2. Eficiencia Intrínseca

La eficiencia intrínseca de un detector se puede definir, como la relación entre el número total de fotones detectados a una distancia fija y el número total de fotones que inciden en la superficie del detector. La eficiencia intrínseca depende del grado de atenuación de los fotones a medida, que atraviesan la capa de aire entre la fuente y la cara del detector, el grosor de la tapa del extremo del detector y su material, el material del detector en sí y el grosor al que el fotón que puede llegar a penetrar. De forma

cuantitativa, la eficiencia intrínseca ( $I_\epsilon$ ) se puede escribir como:

$$I_\epsilon = N_{med}/N_{in} \quad (4.8)$$

Donde  $N_{med}$  es el número total de fotones de energía  $E_\gamma$  medidos por el detector y  $N_{in}$  es el número total de fotones de energía  $E_\gamma$ , incidentes en el detector. La eficiencia absoluta y intrínseca se puede relacionar por medio de la siguiente ecuación:

$$A_\epsilon = G_\epsilon \cdot I_\epsilon \quad (4.9)$$

Donde  $G_\epsilon$  es la eficiencia geométrica, depende de las condiciones de medida, como el ángulo sólido, la distancia y el radio de la cara del detector. La diferencia fundamental entre la eficiencia absoluta  $A_\epsilon$  y la intrínseca  $I_\epsilon$ , radica en este factor geométrico, como se establece en la ecuación anterior 4.9, la eficiencia absoluta  $A_\epsilon$  se puede factorizar de tal manera que se separa el factor geométrico, entonces la eficiencia intrínseca  $I_\epsilon$ , es usada como herramienta para entender el comportamiento de los factores fundamentales que afectan la eficiencia absoluta sin la interferencia del factor geométrico.

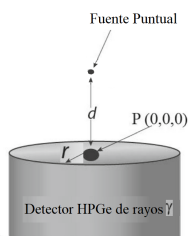
Por otra parte para conocer la eficiencia geométrica, se tiene la siguiente ecuación:

$$G_\epsilon = \frac{\Omega}{4\pi} \quad (4.10)$$

Donde  $\Omega$  es el ángulo sólido del detector visto desde la fuente y su valor máximo es  $4\pi$ , este ángulo sólido se puede expresar de la siguiente manera [A.10]:

$$\Omega = 2\pi \left[ 1 - \frac{d}{(d^2 + r^2)^{1/2}} \right] \quad (4.11)$$

Donde:  $d$  es la distancia desde la fuente puntual al centro de la cara del detector,  $r$  es el radio de la cara del detector (figura 4.11). Por lo tanto, si se conocen  $d$ ,  $r$ , la eficiencia absoluta y la eficiencia geométrica, la eficiencia intrínseca se puede calcular fácilmente a partir de la ecuación 4.9, en este

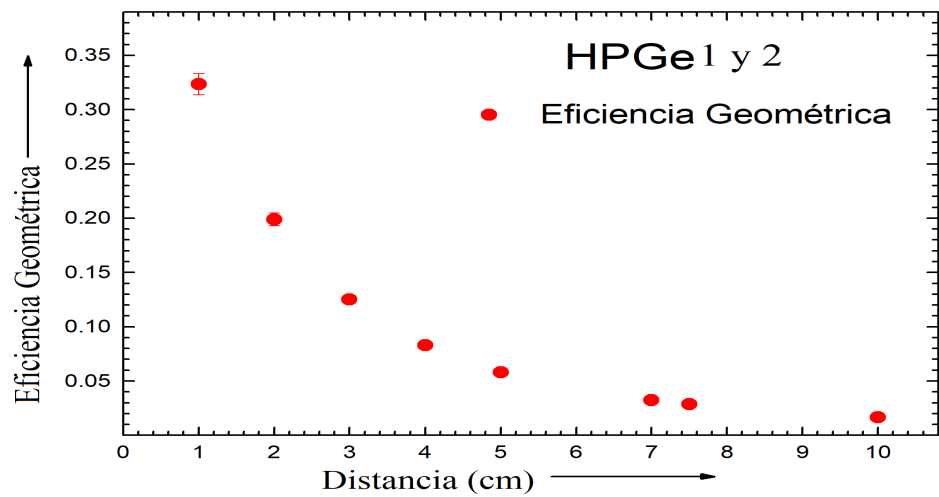


**Figura 4.11:** Muestra una fuente puntual colocada a una altura  $d$  sobre la cara del detector de radio  $r$ .

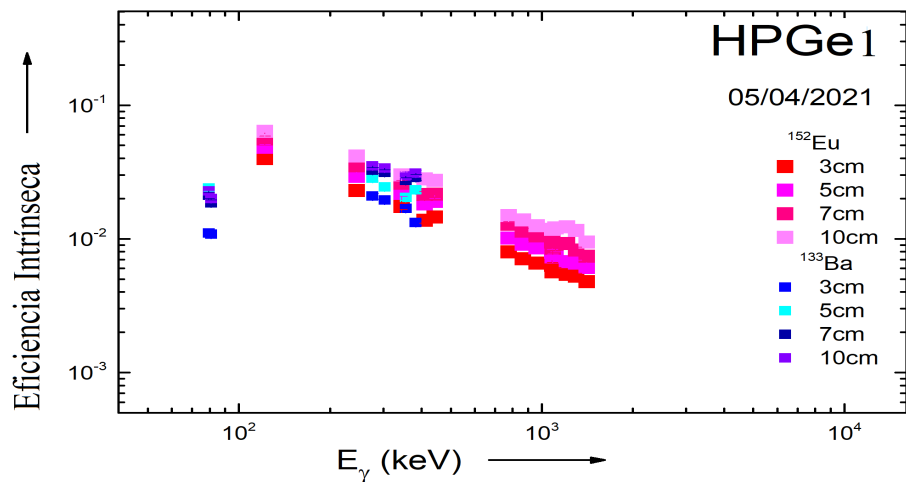
trabajo calculamos la eficiencia geométrica por medio de la ecuación 4.10 y 4.11 para todas las distancias desde 1 a 10cm para las dos detectores de HPGe1,2<sup>a</sup>. Esto se muestra en la figura 4.12 y los detalles de los cálculos se presentan en las tablas [A.4].

Una vez obtenida la eficiencia geométrica 4.12 y la absoluta obtenida experimentalmente podemos aplicar la ecuación 4.9 para obtener la eficiencia intrínseca para los dos detectores de HPGe1,2<sup>a</sup>, nuestro objetivo es encontrar las eficiencias de cada uno de los detectores, para después poder compararlas utilizando la ecuación 4.9, en la figura 4.13 mostramos la eficiencia intrínseca para la fecha 05/04/2021 para el detector HPGe1<sup>a</sup> y para dos fuentes  $^{152}\text{Eu}$  y  $^{133}\text{Ba}$ , y diferentes distancias de la fuente al detector, y en la figura 4.14 mostramos la eficiencia intrínseca para la fecha 17/03/2020, para el detector HPGe2<sup>a</sup>, con una distancia fija y para varias fuentes mencionadas en la gráfica.

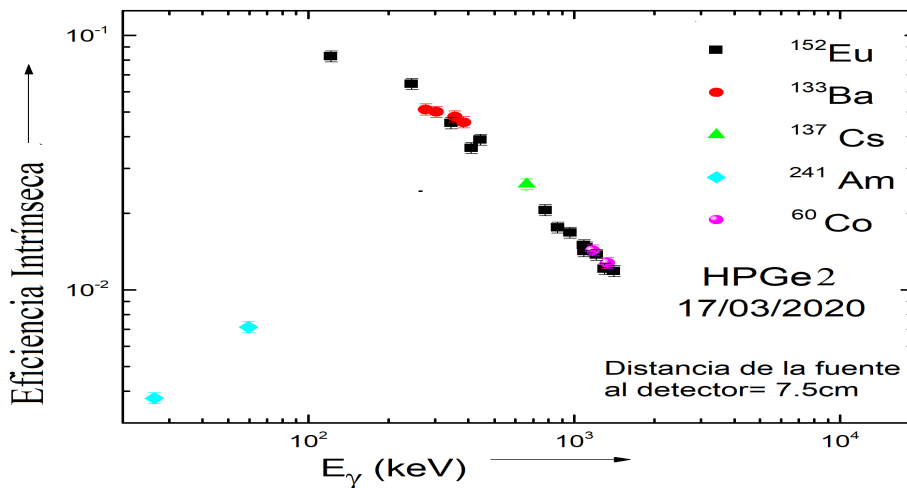
El análisis en la variación de la eficiencia intrínseca con la distancia utilizando el mismo detector es válido únicamente si no hay variación de la eficiencia intrínseca, en el tiempo al igual que en la sección anterior con la eficiencia absoluta vamos hacer una gráfica con tres fechas diferentes entre si, una fuente de  $^{152}\text{Eu}$ , y a una distancia fija en común de 3cm, después calculamos en una tabla la desviación estándar relativa. Una prueba de precisión de los valores de eficiencia intrínseca, obtenidos en



**Figura 4.12:** Presenta la gráfica de eficiencia geométrica vs distancia para los dos detectores HPGe1,2<sup>a</sup>, esta eficiencia es igual para los dos detectores ya que los radios de los detectores son iguales  $r=2.65\text{cm}$ .



**Figura 4.13:** Muestra una gráfica de la eficiencia intrínseca usando la ecuación 4.9 para el HPGe1<sup>a</sup> para las fuentes de <sup>152</sup>Eu y <sup>133</sup>Ba, y diferentes fechas.



**Figura 4.14:** Muestra una gráfica de la eficiencia intrínseca usando, la ecuación 4.9 para el HPGe2<sup>a</sup> para diferentes fuentes mostradas en la gráfica, y diferentes fechas

dichas fechas se muestran en la figura 4.15 y la tabla 4.3.

Para comparar la eficiencia de los dos detectores HPGe 1,2<sup>a</sup> para la misma fuente  $^{152}\text{Eu}$  y a la misma distancia del detector a la fuente, siguiendo la eficiencia intrínseca en función de la distancia para cuatro de las más intensas energías para el detector HPGe1<sup>a</sup>, la líneas en color negro muestra el ajuste, los coeficientes y ecuación polinómica para este ajuste se pueden ver en el apéndice A.4, por medio de estos ajustes podemos ver el comportamiento de los datos y por medio de una regresión lineal podemos encontrar los valores para la eficiencia intrínseca para las cuatro energías mencionadas anteriormente. Conociendo la eficiencia intrínseca para la distancia de 7.5 cm estamos en condiciones de realizar una mejor comparación para los dos detectores como lo realizamos en la sección pasada para la eficiencia absoluta, se toma la fecha experimental más cercana del detector HPGe1 a la fecha experimental para el detector

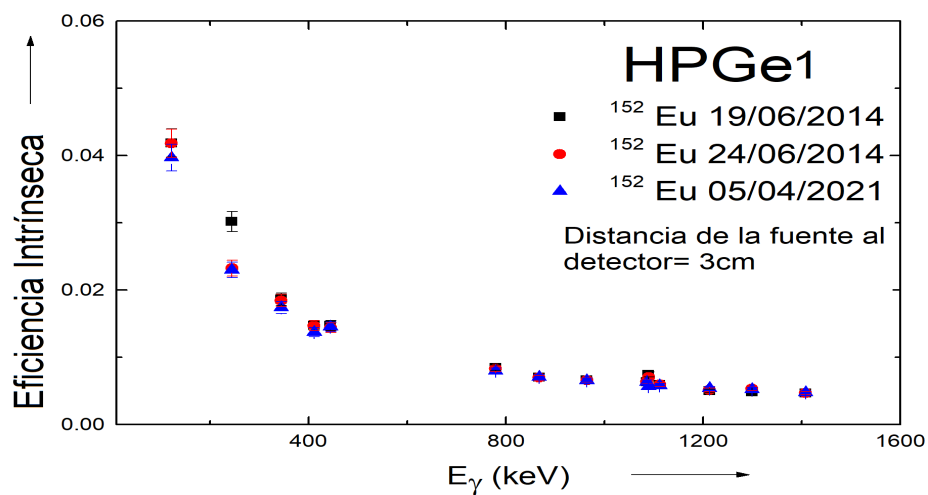
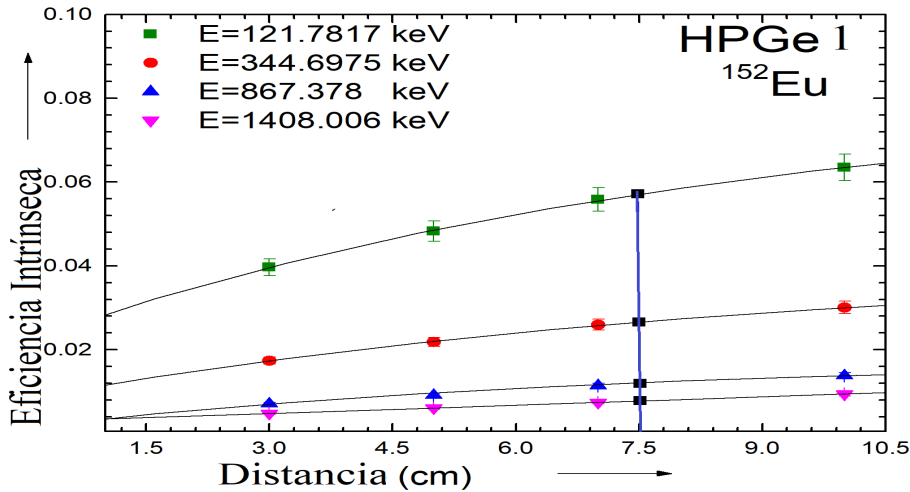


Figura 4.15: Muestra una gráfica muestra la eficiencia intrínseca para distintas fechas mostradas en la gráfica y una distancia fija de 3cm para la fuente de  $^{152}\text{Eu}$ .

Energy (keV) 3cm	DER %
121.7817	3.026884906
244.6975	3.647957088
344.6975	3.735681061
411.1163	3.849001795
443.965	1.139598175
778.904	2.956500448
867.378	0.564162409
964.079	0.441524492
1085.869	0.255667507
1089.737	1.148011585
1112.074	1.209297805
1212.948	3.952261542
1299.14	3.289926148
1408.006	1.084672895

Cuadro 4.3: Muestra los valores para la Desviación Estándar Relativa (DER) para cada energía de rayo gama de  $^{152}\text{Eu}$  a una distancia fija de 3cm.



**Figura 4.16:** Muestra una gráfica de la eficiencia intrínseca vs la distancia medida desde el HPGe1<sup>a</sup> a una fuente estándar de  $^{152}\text{Eu}$ . Los cuadros negros indican la eficiencia intrínseca obtenida para las cuatro energías de la gráfica de arriba.

HPGe2. esta comparación se muestra en la figura 4.17

Una vez hecha la comparación de eficiencia entre los dos detectores mostrada en la 4.17. Como se esperaba, vemos en esta figura que la HPGe2<sup>a</sup> tiene mejor eficiencia intrínseca que el detector HPGe1<sup>a</sup>, además se encuentra que, a una distancia dada, la relación entre la eficiencia intrínseca y la fuente de energía es decreciente, a mayor energías de los rayos gamma, menor es la eficiencia intrínseca, el comportamiento es similar al de la eficiencia absoluta, ya que solo omitimos la parte geométrica para el cálculo de la eficiencia intrínseca, como sabemos por la ecuación 4.11 la eficiencia geométrica solo depende de la distancia a la fuente y el radio del detector (ángulo sólido), como los radios son iguales, para cada distancia tendremos ángulos sólidos similares para los dos detectores a distancias iguales. Como se vio en la sección anterior, la diferencia entre las eficiencias absolutas entre los dos detectores obedece a la calidad de los cristales utilizados y no obedece alguna situación geométrica, es por

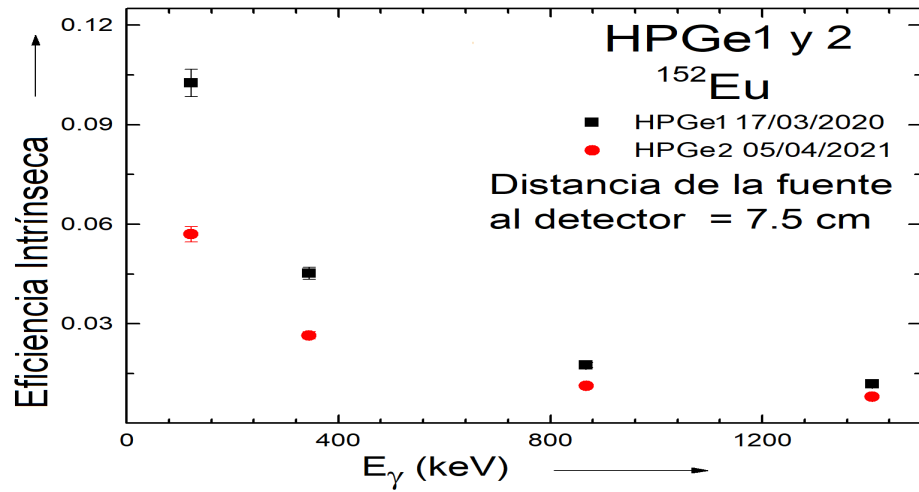


Figura 4.17: Muestra la comparación de las dos eficiencias intrínsecas para los dos detectores para una distancia fija de 7.5cm.

eso que se tiene la misma tendencia entre las dos eficiencias y su variación únicamente obedece a una relación de escala debido al factor geométrico agregado en la eficiencia absoluta.

# 5

## Conclusiones & Trabajos a Futuro

---

En la parte de calibración de energía; observamos que esta no depende de la distancia de la fuente al detector solo depende del ajuste en la ganancia del amplificador, obtuvimos una ecuación de calibración de orden 2, que es la ecuación que mejor ajusta a los datos, el termino de orden 2 es muy cercano a cero y por lo tanto, no es considerado para nuestra calibración de energía, comparamos los dos términos  $a_1$  de las ecuaciones cuadráticas para los detectores HPGe1,2<sup>a</sup>. Para el HPGe1<sup>a</sup> y obtuvimos una ganancia del amplificador similar al 0.125 keV/ch, esto lo pudimos obtener al hacer la calibración de triple alfa, para el detector HPGe2<sup>a</sup> obtuvimos una ganancia del amplificador de 0.25 keV/ch. estos resultados obtenidos coinciden con la teoría (ORTEC [ORT99]). Lo que nos confirma, que se realizó una buena calibración de energía de los detectores.

Para la resolución de energía obtuvimos primero el FWHM para los dos detectores HPGe1,2<sup>a</sup> el cual depende de  $E_\gamma$ , y observamos que aumenta a mayores energías, ya que el FWHM es una cantidad estadística, los fotones gamma de baja energía son capturados todos en el volumen activo del detector, por lo que la incertidumbre estadística de sus números no es alta, lo que resulta en un FWHM bajo. En el caso de los fotones de alta energía, algunos no se capturan dentro del volumen del detector. Y estos, pueden depositar su energía en cualquier parte del volumen del detector. Son no localizado en la región cercana al frente del detector. Estos dos factores hacen que la incertidumbre sobre sus números sea más alta que para los fotones de baja energía, provocando un aumento en el FWHM. En las gráficas (3.7 y 3.8), observamos que a mayor energía la resolución del detector sufre una mayor pérdida, las resoluciones de los dos detectores siguen curvas con tendencias similares y tienen diferencias numéricas muy pequeñas entre ellos a bajas energías tiene disminuciones exponenciales.

Para la parte de eficiencias comencemos con la eficiencia geométrica las cuales se calcularon a varias distancias desde 1 cm hasta 10 cm las dimensiones de los dos detectores son iguales. Y observamos que la eficiencia geométrica disminuye con la distancia ya que el ángulo sólido disminuye con la distancia. Para la eficiencia absoluta observamos en las gráficas este resultado y en la tabla muestra los valores para la desviación estándar relativa el cual es muy pequeña para todas la energías del  $^{152}\text{Eu}$ , por lo que concluimos que no depende el tiempo. El resultado de la eficiencia geométrica, hace que la eficiencia absoluta también disminuya con la distancia ya que, el numero de fotones que golpean la cara del detector será menor cuando el ángulo sólido disminuya. En la comparación de las eficiencias absolutas para los dos detectores  $\text{HPGe}1,2^a$ , observamos que el  $\text{HPGe}2^a$ , es mas eficiente que el  $\text{HPGe}1^a$ , esto puede deberse a la calidad del cristal presente dentro del detector. Sin embargo, las dos eficiencias presentan la misma tendencia. En la figura 4.10, se observa como a menores distancias la eficiencia aumenta rápidamente a medida que aumenta la energía hasta alcanzar su valor máximo, a partir de ese punto máximo, la tendencia de los valores es a disminuir exponencialmente a medida que la energía aumenta, después de tener estas mediciones de eficiencias absolutas, el espectrómetro esta listo para realizar medidas experimentales de espectroscopia nuclear y de sección eficaz.

En la parte de la eficiencia intrínseca, la dependencia de esta con la energía  $E_\gamma$  particular, con la distancia es opuesta a la dependencia de la eficiencia absoluta, esto resulta lógico, ya que la eficiencia geométrica disminuye al aumentar la distancia, observamos en la ecuación 4.8 al aumentar la distancia hará que la eficiencia intrínseca sea mayor. La mayor contribución de mi trabajo y lo realmente nuevo es que no se tiene evidencia de la comparación que aquí realiza para las eficiencias intrínsecas y absolutas en cuestión de diferentes fuentes de radiación y dos detectores con características similares.

#### Trabajos presentables;

Se presento este trabajo en el congreso nacional de física en el mes de octubre en la modalidad de platica, se planea continuar con el trabajo hasta hoy realizado para trabajar en un artículo científico en alguna revista

nacional o internacional.



Ciudad de México, 05 de Junio de 2021

A quien corresponda

Tenemos el gusto de informarle que el trabajo con clave única: **LXIV-003457** y cuyo título es: **Análisis de Eficiencia de un Espectrometro de Rayos Gamma usando Detectores de Germanio de Alta Pureza**, de los autores:

- Raya Farías Isai\*  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
- Sharma Vijay Raj  
Instituto de Física, UNAM, CDMX, México.
- Dasgupta-Schubert Nabanita  
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México

\* *Presentador*

Fue aceptado para su presentación tipo **plática** en la sesión de **Física Nuclear** el día **05 de octubre en Sala cuatro** dentro del programa del LXIV Congreso Nacional de Física

ATENTAMENTE

Comité Científico  
Sociedad Mexicana de Física

## A.1. Tablas de Calibración de Energía

Ecuaciones de calibración con los dos softwares		
Distancia y fecha	CANDLE	Origin
D= 1cm 19/06/2014	$0C^2 + 0.12886C - 1.39325$	$2.82 \exp -08C^2 + 0.12858C - 0.62593$
D= 2cm 19/06/2014	$0C^2 + 0.12894C - 1.13208$	$1.24 \exp -08C^2 + 0.12880C - 0.16091$
D= 3cm 19/06/2014	$0C^2 + 0.12896C - 1.0426$	$1.82 \exp -08C^2 + 0.12873C - 0.57541$
D= 4cm 19/06/2014	$0C^2 + 0.12895C - 0.99508$	$1.84 \exp -08C^2 + 0.12874C - 0.55171$
D= 1cm 24/06/2014	$0C^2 + 0.12903C - 1.41252$	$2.35 \exp -08C^2 + 0.12878C - 0.97376$
D= 2cm 24/06/2014	$0C^2 + 0.12906C - 1.18839$	$1.93 \exp -08C^2 + 0.12883C - 0.72294$
D= 3cm 24/06/2014	$0C^2 + 0.12904C - 1.11767$	$2.48 \exp -08C^2 + 0.12875C - 0.5206$

**Cuadro A.1:** Presenta las ecuaciones anteriores corresponden a las ecuaciones de calibración de energía

## A.2. Tablas de calibración Eficiencia Absoluta

### A.2.1. Eficiencia Absoluta para el HPGe1

<sup>152</sup> Eu Fecha 19/06/2014 $N_P(E) = 474619 \text{ dps}$	
Tiempo de conteo $t_c$ (s)	Distancia $d$ (cm)
2511	1
5103	2
5179	3
4800	4

**Cuadro A.2:** Vemos los tiempos de conteo para las diferentes distancias de <sup>152</sup>Eu 19/06/2014

<sup>152</sup> Eu Fecha 24/06/2014 $N_P(E) = 474619 \text{ dps}$	
Tiempo de conteo $t_c$ (s)	Distancia $d$ (cm)
3900	1
19200	2
19800	3

**Cuadro A.3:** Vemos los tiempos de conteo para las diferentes distancias de <sup>152</sup>Eu 24/06/2014

<sup>152</sup> Eu Fecha 05/04/2021 $N_P(E) = 474619 \text{ dps}$	
Tiempo de conteo $t_c$ (s)	Distancia $d$ (cm)
1867	3
1800	5
1800	7
1800	10

**Cuadro A.4:** Vemos los tiempos de conteo para las diferentes distancias de <sup>152</sup>Eu 05/04/2021

<sup>152</sup> Eu Fecha 05/04/2021 $N_P(E) = 474619 \text{ dps}$	
Tiempo de conteo $t_c$ (s)	Distancia $d$ (cm)
1800	3
1800	5
1800	7
1988	10

**Cuadro A.5:** Vemos los tiempos de conteo para las diferentes distancias de <sup>152</sup>Eu 05/04/2021

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{152}\text{Eu}$ , Distancia = 1cm, Fecha = 19/06/2014					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
121.7817	752693.6	0.2858	2633637.509	1.0312E-05	0.01082
244.6975	101184.6	0.0758	1334889.182	1.0312E-05	0.00548
344.6975	328852.1	0.2654	1239081.01	1.0312E-05	0.00509
411.1163	20019	0.02234	896105.6401	1.0312E-05	0.00368
443.965	22974.1	0.02821	814395.6044	1.0312E-05	0.00334
778.904	70087.2	0.1294	541632.1484	1.0312E-05	0.00222
867.378	15258.3	0.04245	359441.6961	1.0312E-05	0.00148
964.079	55876.3	0.14605	382583.3619	1.0312E-05	0.00157
1085.869	41889.7	0.102	410683.3333	1.0312E-05	0.00169
1089.737	8807.2	0.01727	509971.0481	1.0312E-05	0.00209
1112.074	45978	0.13644	336983.2894	1.0312E-05	0.00138
1212.948	3673.4	0.01422	258326.301	1.0312E-05	0.00106
1299.14	4822.2	0.01623	297116.451	1.0312E-05	0.00122
1408.006	52989	0.21005	252268.5075	1.0312E-05	0.00104

**Cuadro A.6:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{152}\text{Eu}$  para la distancia de 1cm y para la fecha 19/06/2014.

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{152}\text{Eu}$ , Distancia = 2cm, Fecha = 19/06/2014					
Energy (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
121.7817	1002542.9	0.2858	3507847.796	1.0312E-05	0.00709
244.6975	147711.4	0.0758	1948699.208	1.0312E-05	0.00394
344.6975	422962.8	0.2654	1593680.482	1.0312E-05	0.00322
411.1163	27893.2	0.02234	1248576.544	1.0312E-05	0.00252
443.965	33199.1	0.02821	1176855.725	1.0312E-05	0.00238
778.904	90860.6	0.1294	702168.4699	1.0312E-05	0.00142
867.378	22305.5	0.04245	525453.4747	1.0312E-05	0.001061
964.079	76887.6	0.14605	526447.1072	1.0312E-05	0.001063
1085.869	55089.9	0.102	540097.0588	1.0312E-05	0.00109
1089.737	10354.3	0.01727	599554.1401	1.0312E-05	0.00121
1112.074	65267.6	0.13644	478361.1844	1.0312E-05	9.66663E-4
1212.948	5586.8	0.01422	392883.263	1.0312E-05	7.93931E-4
1299.14	7090.2	0.01623	436857.671	1.0312E-05	8.82794E-4
1408.006	77904.3	0.21005	370884.5513	1.0312E-05	7.49476E-4

**Cuadro A.7:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{152}\text{Eu}$ , para la distancia de 2cm y la fecha de 19/06/2014.

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{152}\text{Eu}$ , Distancia = 3cm, Fecha = 19/06/2014					
Energy (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
121.7817	752690.2	0.2858	2633625.612	1.0312E-05	0.00524
244.6975	143994	0.0758	1899656.992	1.0312E-05	0.00378
344.6975	311391.1	0.2654	1173289.751	1.0312E-05	0.00234
411.1163	20662.7	0.02234	924919.427	1.0312E-05	0.00184
443.965	26153.8	0.02821	927110.9536	1.0312E-05	0.00185
778.904	68902	0.1294	532472.9521	1.0312E-05	0.00106
867.378	18743.8	0.04245	441550.0589	1.0312E-05	8.79182E-4
964.079	60672.6	0.14605	415423.4851	1.0312E-05	8.27161E-4
1085.869	40717.2	0.102	399188.2353	1.0312E-05	7.94834E-4
1089.737	8084.2	0.01727	468106.5431	1.0312E-05	9.32059E-4
1112.074	50695.1	0.13644	371555.9953	1.0312E-05	7.39815E-4
1212.948	4466.2	0.01422	314078.7623	1.0312E-05	6.25371E-4
1299.14	4928.8	0.01623	303684.5348	1.0312E-05	6.04674E-4
1408.006	62079.7	0.21005	295547.2507	1.0312E-05	5.88472E-4

**Cuadro A.8:** Muestran los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{152}\text{Eu}$ , para la distancia de 3cm y la fecha de 19/06/2014

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{152}\text{Eu}$ , Distancia = 4cm, Fecha = 19/06/2014					
Energy (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
121.7817	610494	0.2858	2136088.174	1.0312E-05	0.00459
244.6975	93467.8	0.0758	1233084.433	1.0312E-05	0.00265
344.6975	252309.9	0.2654	950677.8448	1.0312E-05	0.00204
411.1163	16851.7	0.02234	754328.5586	1.0312E-05	0.00162
443.965	21770	0.02821	771712.1588	1.0312E-05	0.00166
778.904	55590.7	0.1294	429603.5549	1.0312E-05	9.22936E-4
867.378	15525.8	0.04245	365743.2273	1.0312E-05	7.85742E-4
964.079	50743	0.14605	347435.8097	1.0312E-05	7.46411E-4
1085.869	33372.7	0.102	327183.3333	1.0312E-05	7.02902E-4
1089.737	6547.8	0.01727	379143.0226	1.0312E-05	8.14529E-4
1112.074	42249.49	0.13644	309656.1859	1.0312E-05	6.65248E-4
1212.948	3957.6	0.01422	278312.2363	1.0312E-05	5.9791E-4
1299.14	4251.1	0.01623	261928.5274	1.0312E-05	5.62712E-4
1408.006	52128	0.21005	248169.4835	1.0312E-05	5.33153E-4

**Cuadro A.9:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{152}\text{Eu}$ , para la distancia de 4cm y la fecha de 19/06/2014

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{152}\text{Eu}$ , Distancia = 1cm, Fecha = 24/06/2014					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
121.7817	1146557.4	0.2858	37.90873924	1.0312E-05	0.01061
244.6975	153857	0.0758	2029775.726	1.0312E-05	0.00537
344.6975	502071.1	0.2654	1891752.449	1.0312E-05	0.005
411.1163	30245.2	0.02234	1353858.55	1.0312E-05	0.00358
443.965	35406	0.02821	1255086.849	1.0312E-05	0.00332
778.904	104725.6	0.1294	809316.847	1.0312E-05	0.00214
867.378	23459	0.04245	552626.6196	1.0312E-05	0.001461
964.079	80720	0.14605	552687.4358	1.0312E-05	0.001463
1085.869	63140	0.102	619019.6078	1.0312E-05	0.00164
1089.737	14834.2	0.01727	858957.7302	1.0312E-05	0.00227
1112.074	68751.4	0.13644	503894.7523	1.0312E-05	0.00133
1212.948	5367.5	0.01422	377461.3221	1.0312E-05	9.98051E-4
1299.14	7694.2	0.01623	474072.7049	1.0312E-05	0.00125
1408.006	78683.9	0.21005	374596.0486	1.0312E-05	9.90475E-4

**Cuadro A.10:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{152}\text{Eu}$ , para la distancia de 1cm y la fecha de 24/06/2014

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{152}\text{Eu}$ , Distancia = 2cm, Fecha = 24/06/2014					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
121.7817	3791791.9	0.2858	13267291.46	1.0312E-05	0.00713
244.6975	539569.4	0.0758	7118329.815	1.0312E-05	0.00382
344.6975	1579978.2	0.2654	5953195.931	1.0312E-05	0.0032
411.1163	99066.5	0.02234	4434489.705	1.0312E-05	0.00238
443.965	122415.3	0.02821	4339429.28	1.0312E-05	0.00233
778.904	338076.8	0.1294	2612649.15	1.0312E-05	0.0014
867.378	83817.1	0.04245	1974489.988	1.0312E-05	0.00106
964.079	292068.8	0.14605	1999786.375	1.0312E-05	0.001074
1085.869	204102.2	0.102	2001001.961	1.0312E-05	0.001075
1089.737	35291.4	0.01727	2043508.975	1.0312E-05	0.0011
1112.074	239273.8	0.13644	1753692.466	1.0312E-05	9.41883E-4
1212.948	20871.5	0.01422	1467756.681	1.0312E-05	7.88311E-4
1299.14	26121.1	0.01623	1609433.148	1.0312E-05	8.64403E-4
1408.006	291541.9	0.21005	1387964.294	1.0312E-05	7.45456E-4

**Cuadro A.11:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{152}\text{Eu}$ , para la distancia de 2cm y la fecha de 19/06/2014

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{152}\text{Eu}$ , Distancia = 3cm, Fecha = 24/06/2014					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
121.7817	2873843	0.2858	10055433.87	1.0312E-05	0.00524
244.6975	424248.6	0.0758	5596947.23	1.0312E-05	0.00291
344.6975	1177525.8	0.2654	4436796.534	1.0312E-05	0.00231
411.1163	79074.7	0.02234	3539601.611	1.0312E-05	0.00184
443.965	97932.5	0.02821	3471552.641	1.0312E-05	0.00181
778.904	258111	0.1294	1994675.425	1.0312E-05	0.00104
867.378	71278.3	0.04245	1679111.896	1.0312E-05	8.74499E-4
964.079	232300.4	0.14605	1590553.92	1.0312E-05	8.28377E-4
1085.869	155963.9	0.102	1529057.843	1.0312E-05	7.96349E-4
1089.737	29331.3	0.01727	1698396.063	1.0312E-05	8.84542E-4
1112.074	195009.7	0.13644	1429270.742	1.0312E-05	7.44379E-4
1212.948	17647.3	0.01422	1241019.691	1.0312E-05	6.46336E-4
1299.14	20724.5	0.01623	1276925.447	1.0312E-05	6.65036E-4
1408.006	236298.8	0.21005	1124964.532	1.0312E-05	5.85893E-4

**Cuadro A.12:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{152}\text{Eu}$ , para la distancia de 4cm y la fecha de 19/06/2014.

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{152}\text{Eu}$ , Distancia = 3cm, Fecha = 05/04/2021					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
121.7817	182022	0.2858	636885.9342	3.04385E-07	0.00497
244.6975	27956.9	0.0758	368824.5383	3.04385E-07	0.00288
344.6975	74163.3	0.2654	279439.7136	3.04385E-07	0.00218
411.1163	4911.2	0.02234	219838.8541	3.04385E-07	0.00172
443.965	6581.8	0.02821	233314.4275	3.04385E-07	0.00182
778.904	16642.7	0.1294	128614.374	3.04385E-07	0.001
867.378	4806.3	0.04245	113222.6148	3.04385E-07	8.84416E-4
964.079	15360.6	0.14605	105173.5707	3.04385E-07	8.21543E-4
1085.869	10346.2	0.102	101433.3333	3.04385E-07	7.96349E-4
1089.737	1566	0.01727	90677.47539	3.04385E-07	7.08309E-4
1112.074	12701.5	0.13644	93092.2017	3.04385E-07	7.27172E-4
1212.948	1231.4	0.01422	86596.34318	3.04385E-07	6.7643E-4
1299.14	1364.9	0.01623	84097.35059	3.04385E-07	6.5691E-4
1408.006	16082	0.21005	76562.72316	3.04385E-07	5.98055E-4

**Cuadro A.13:** Muestran los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{152}\text{Eu}$ , para la distancia de 3cm y la fecha de 05/04/2021.

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{152}\text{Eu}$ , Distancia = 5cm, Fecha = 05/04/2021					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
121.7817	99187.2	0.2858	347051.0847	3.04385E-07	0.00281
244.6975	15999.8	0.0758	211079.1557	3.04385E-07	0.00171
344.6975	41476.8	0.2654	156280.3316	3.04385E-07	0.00127
411.1163	2926.2	0.02234	130984.7807	3.04385E-07	0.00106
443.965	3855.1	0.02821	136657.2138	3.04385E-07	0.00111
778.904	9391.4	0.1294	72576.50696	3.04385E-07	5.88019E-4
867.378	2781.5	0.04245	65524.14605	3.04385E-07	5.3088E-4
964.079	8950.2	0.14605	61281.75282	3.04385E-07	4.96508E-4
1085.869	5814.2	0.102	57001.96078	3.04385E-07	4.61833E-4
1089.737	905.8	0.01727	52449.33411	3.04385E-07	4.24948E-4
1112.074	7427.3	0.13644	54436.38229	3.04385E-07	4.41047E-4
1212.948	689.2	0.01422	48466.94796	3.04385E-07	3.92682E-4
1299.14	768	0.01623	47319.77819	3.04385E-07	3.83388E-4
1408.006	9193.3	0.21005	43767.19829	3.04385E-07	3.54604E-4

**Cuadro A.14:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{152}\text{Eu}$  para la distancia de 5cm y la fecha de 05/04/2021

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{152}\text{Eu}$ , Distancia = 7cm, Fecha = 05/04/2021					
Energy (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
121.7817	63843.7	0.2858	223385.9342	3.04385E-07	0.00181
244.6975	10658.3	0.0758	140610.8179	3.04385E-07	0.00114
344.6975	27561.4	0.2654	103848.5305	3.04385E-07	8.41387E-4
411.1163	1911.4	0.02234	85559.53447	3.04385E-07	6.93208E-4
443.965	2434.9	0.02821	86313.36406	3.04385E-07	6.99316E-4
778.904	6630.6	0.1294	51241.11283	3.04385E-07	4.15158E-4
867.378	1936.5	0.04245	45618.37456	3.04385E-07	3.69603E-4
964.079	6127.4	0.14605	41954.1253	3.04385E-07	3.39915E-4
1085.869	3838	0.102	37627.45098	3.04385E-07	3.0486E-4
1089.737	586.6	0.01727	33966.41575	3.04385E-07	2.75198E-4
1112.074	4973.8	0.13644	36454.11903	1.0312E-05	2.95353E-4
1212.948	523.4	0.01422	36807.31364	1.0312E-05	2.98215E-4
1299.14	534.6	0.01623	32939.00185	1.0312E-05	2.66874E-4
1408.006	6226.8	0.21005	29644.37039	1.0312E-05	2.4018E-4

**Cuadro A.15:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{152}\text{Eu}$  para la distancia de 7cm y la fecha de 05/04/2021.

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{152}\text{Eu}$ , Distancia = 10cm, Fecha = 05/04/2021					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
121.7817	37446.2	0.2858	131022.3933	3.04385E-07	0.00106
244.6975	6468	0.0758	85329.8153	3.04385E-07	6.91347E-4
344.6975	16431.2	0.2654	61911.07762	3.04385E-07	5.01607E-4
411.1163	1286.6	0.02234	57591.76365	3.04385E-07	4.66612E-4
443.965	1585.4	0.02821	56199.9291	3.04385E-07	4.55335E-4
778.904	3969.2	0.1294	30673.87944	3.04385E-07	2.48522E-4
867.378	1206.1	0.04245	28412.24971	3.04385E-07	2.30198E-4
964.079	3761.7	0.14605	25756.24786	3.04385E-07	2.08679E-4
1085.869	2464.6	0.102	24162.7451	3.04385E-07	1.95768E-4
1089.737	417.4	0.01727	24169.07933	3.04385E-07	1.95819E-4
1112.074	3375.9	0.13644	24742.74406	3.04385E-07	2.00467E-4
1212.948	359.8	0.01422	25302.391	3.04385E-07	2.05001E-4
1299.14	385	0.01623	23721.50339	3.04385E-07	1.92193E-4
1408.006	4075.7	0.21005	19403.47536	3.04385E-07	1.57208E-4

**Cuadro A.16:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{152}\text{Eu}$  para la distancia de 10cm y la fecha de 05/04/2021

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{133}\text{Ba}$ , Distancia= 3cm, Fecha 05/04/2021					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
79.6142	492296.65	0.0265	748171.2006	1.45837E-05	0.00138
80.997	492296.65	0.329	748171.2006	1.45837E-05	0.00135
276.398	100016.6	0.07164	1396099.944	1.45837E-05	0.00261
302.853	239529.1	0.1833	1306759.956	1.45837E-05	0.00244
356.017	702844.1	0.6205	1132706.044	1.45837E-05	0.00211
383.851	109087.4	0.0894	1220217.002	1.45837E-05	0.00165

**Cuadro A.17:** En la tabla se muestran los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{133}\text{Ba}$  para la distancia de 3cm y la fecha de 05/04/2021

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{133}\text{Ba}$ , Distancia= 5cm, Fecha 05/04/2021					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
79.6142	464696.15	0.0265	6821.728567	1.45837E-05	6.83016E-4
80.997	464696.15	0.329	6821.728567	1.45837E-05	6.00164E-4
276.398	98935.5	0.07164	13810.09213	1.45837E-05	0.00105
302.853	233983.8	0.1833	12765.07365	1.45837E-05	0.00101
356.017	685780.3	0.6205	11052.05963	1.45837E-05	8.83337E-4
383.851	100299.3	0.0894	11219.16107	1.45837E-05	9.30164E-4

**Cuadro A.18:** En la tabla se muestran los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{133}\text{Ba}$  para la distancia de 5cm y la fecha de 05/04/2021

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{133}\text{Ba}$ , Distancia= 7cm, Fecha 05/04/2021					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
79.6142	984593.3	0.0265	748171.2006	1.45837E-05	0.00139
80.997	984593.3	0.329	748171.2006	1.45837E-05	0.00108
276.398	100016.6	0.07164	1396099.944	1.45837E-05	0.00165
302.853	239529.1	0.1833	1306759.956	1.45837E-05	0.00142
356.017	702844.1	0.6205	1132706.044	1.45837E-05	0.00118
383.851	109087.4	0.0894	1220217.002	1.45837E-05	0.00135

**Cuadro A.19:** En la tabla se muestran los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{133}\text{Ba}$  para la distancia de 7cm y la fecha de 05/04/2021

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{133}\text{Ba}$ , Distancia= 10cm, Fecha 05/04/2021					
Energy (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
79.6142	419729.2	0.0265	6161.614797	1.45837E-05	3.79453E-4
80.997	419729.2	0.329	6161.614797	1.45837E-05	3.33424E-4
276.398	92990.4	0.07164	12980.23451	1.45837E-05	5.83333E-4
302.853	218379.6	0.1833	11913.78069	1.45837E-05	5.61111E-4
356.017	636928	0.6205	10264.75423	1.45837E-05	4.90743E-4
383.851	89617.3	0.0894	10024.30649	1.45837E-05	5.16758E-4

**Cuadro A.20:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{133}\text{Ba}$  para la distancia de 10cm y la fecha de 05/04/2021.

## A.2.2. Eficiencia Absoluta HPGe 2

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para la Distancia= 7.5cm, Fecha 17/03/2020							
Fuente	Fecha de fabricación	Fecha de experimento	tiempo transcurrido (s)	vida media (años)	$\lambda(1/s)$	tiempo de conteo (s)	$A_0(dps)$
<sup>60</sup> Co	04/01/1986	17/03/2020	1,071,705,600	5.271	4.16991E-09	720	425,500
<sup>133</sup> Ba	04/01/1986	17/03/2020	1,071,705,600	10.551	2.08317E-09	240	389,980
<sup>137</sup> Cs	04/01/1986	17/03/2020	1,071,705,600	30.08	7.30703E-10	180	403,300
<sup>152</sup> Eu	05/18/2001	17/03/2020	59,4259,200	13.528	1.62475E-09	2808	216,100
<sup>241</sup> Am	04/01/1986	17/03/2020	1,071,705,600	432.6	5.08079E-11	3000	412,920

**Cuadro A.21:** Muestra algunos de los valores de las muestra consideradas para obtener la energía absoluta

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para <sup>60</sup> Co, Fecha 17/03/2020 Distancia= 7.5cm					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
1173.237	3022.2	0.9985	1,440.060	2.5573E-06	0.041017887
1332.501	85935.8	0.9998	1,275.522	2.5573E-06	0.036331272

**Cuadro A.22:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el <sup>60</sup>Co, para la distancia de 7.5cm y la fecha 17/03/2020.

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para <sup>133</sup> Ba, Fecha 17/03/2020 Distancia= 7.5cm					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
276.39	1047.4	0.07164	14,620.325	2.39079E-05	0.00146
302.86	2629.1	0.1833	14,343.153	2.39079E-05	0.00143
356.02	8540	0.6205	13,763.094	2.39079E-05	0.00137
383.85	1163	0.0894	13,008.949	2.39079E-05	0.0013

**Cuadro A.23:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el <sup>133</sup>Ba, para la distancia de 7.5cm y la fecha de 19/06/2014.

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{137}\text{Cs}$ , Fecha 17/03/2020, Distancia= 7.5cm					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
662.94	20950.54	0.8512	2,0950.54	7.41922E-4	7.41922E-4

**Cuadro A.24:** En la tabla se muestran los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{137}\text{Cs}$  para la distancia de 7.5cm y la fecha de 17/03/2020.

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{152}\text{Eu}$ , Fecha 17/03/2020, Distancia = 7.5cm					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
121.7817	103197.5	0.2858	361,082.925	1.21525E-05	0.00293
244.6975	32166.6	0.0758	424,361.477	1.21525E-05	0.00184
344.6975	79365	0.2654	299,039.186	1.21525E-05	0.00129
411.1163	5312.3	0.02234	237,793.196	1.21525E-05	0.00103
443.965	7255.8	0.02821	257,206.664	1.21525E-05	0.00111
778.904	17564.6	0.1294	135,738.794	1.21525E-05	5.87452E-4
867.378	4919.9	0.04245	115,898.7044	1.21525E-05	5.01587E-4
964.079	16173.4	0.14605	110,738.788	1.21525E-05	5.01587E-4
1085.869	10081.8	0.102	98,841.17647	1.21525E-05	4.27766E-4
1089.737	1617.7	0.01727	93,671.1059	1.21525E-05	4.05391E-4
1112.074	13219.3	0.13644	96,887.27646	1.21525E-05	4.1931E-4
1212.948	1289.5	0.01422	90,682.1378	1.21525E-05	3.92455E-4
1299.14	1296.4	0.01623	79,876.7714	1.21525E-05	3.45691E-4
1408.006	16446.1	0.21005	78,296.11997	1.21525E-05	3.38851E-4

**Cuadro A.25:** En la tabla se muestran los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{152}\text{Eu}$  para la distancia de 7.5cm y la fecha de 17/03/2020.

Parámetros de la Eficiencia Absoluta para $^{241}\text{Am}$ , Fecha 17/03/2020, Distancia= 7.5cm					
Energía (keV)	$N_p(E)$ (conteos)	$I_\gamma$	$N_p(E)/I_\gamma$ (conteos)	$C_\gamma$ (dps)	$\epsilon_\gamma$
26.3448	2.5573E-06	0.024	3022.2	2.5573E-06	1.07343E-4
59.5412	2.5573E-06	0.359	85935.8	2.5573E-06	2.04052E-4

**Cuadro A.26:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Absoluta para el  $^{241}\text{Am}$  para la distancia de 7.5cm y la fecha de 17/03/2020.

Energía	Detector 1	Detector 2
(keV)	Eficiencia Absoluta	Eficiencia Absoluta
121.78	0.00293	0.00293
344.70	0.00109	0.00129
867.38	4.26E-4	5.01587E-4
1408.01	3.19E-4	3.38851E-4

**Cuadro A.27:** Muestra los valores para comparar la eficiencia absoluta para la distancia de 7.5 cm

Energía (keV) 3cm	ERS %
121.7817	3.026884906
244.6975	3.647957088
344.6975	3.735681061
411.1163	3.849001795
443.965	1.139598175
778.904	2.956500448
867.378	0.564162409
964.079	0.441524492
1085.869	0.255667507
1089.737	1.148011585
1112.074	1.209297805
1212.948	3.952261542
1299.14	3.289926148
1408.006	1.084672895

**Cuadro A.28:** Muestra los valores porcentuales para la desviación estándar relativa de la eficiencia absoluta para las distancias de 3cm.

## A.3. Tablas de la Eficiencia Intrínseca

### A.3.1. Eficiencia Intrínseca HPGe1

Eficiencia Intrínseca de $^{152}\text{Eu}$ , distancia = 1cm, fecha 19/06/2014				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	ángulo solido	eficiencia geométrica	Eficiencia intrínseca
121.7817	0.01082	4.06487	0.323471	0.033436335
244.6975	0.00548	4.06487	0.323471	0.016947587
344.6975	0.00509	4.06487	0.323471	0.015731219
411.1163	0.00368	4.06487	0.323471	0.011376846
443.965	0.00334	4.06487	0.323471	0.010339466
778.904	0.00222	4.06487	0.323471	0.006876495
867.378	0.00148	4.06487	0.323471	0.004563427
964.079	0.00157	4.06487	0.323471	0.004857231
1085.869	0.00169	4.06487	0.323471	0.005213985
1089.737	0.00209	4.06487	0.323471	0.006474529
1112.074	0.00138	4.06487	0.323471	0.004278298
1212.948	0.00106	4.06487	0.323471	0.003279679
1299.14	0.00122	4.06487	0.323471	0.003772154
1408.006	0.001036	4.06487	0.323471	0.00320277

**Cuadro A.29:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el  $^{152}\text{Eu}$ , para la distancia de 1cm, la fecha de 19/06/2014 y radio de 2.65 cm.

Eficiencia Intrínseca de <sup>152</sup> Eu, distancia = 2cm, fecha 19/06/2014				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
121.7817	0.00709	2.49815	0.198797	0.035657433
244.6975	0.00394	2.49815	0.198797	0.019808617
344.6975	0.00322	2.49815	0.198797	0.016199835
411.1163	0.00252	2.49815	0.198797	0.012691838
443.965	0.00238	2.49815	0.198797	0.011962792
778.904	0.00142	2.49815	0.198797	0.007137575
867.378	0.001061	2.49815	0.198797	0.005341259
964.079	0.001063	2.49815	0.198797	0.005351359
1085.869	0.00109	2.49815	0.198797	0.005490111
1089.737	0.00121	2.49815	0.198797	0.006094495
1112.074	9.66663E-4	2.49815	0.198797	0.004862563
1212.948	7.93931E-4	2.49815	0.198797	0.003993676
1299.14	8.82794E-4	2.49815	0.198797	0.004440678
1408.006	7.49476E-4	2.49815	0.198797	0.003770058

**Cuadro A.30:** Muestran los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>152</sup>Eu para la distancia de 2 cm y la fecha de 19/06/2014

Eficiencia Intrínseca de <sup>152</sup> Eu, distancia = 3cm, fecha 19/06/2014				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
121.7817	0.00524	1.57411	0.125263	0.041862971
244.6975	0.00378	1.57411	0.125263	0.030196124
344.6975	0.00234	1.57411	0.125263	0.018650105
411.1163	0.00184	1.57411	0.125263	0.014702118
443.965	0.00185	1.57411	0.125263	0.014736954
778.904	0.00106	1.57411	0.125263	0.008463959
867.378	8.79182E-4	1.57411	0.125263	0.007018688
964.079	8.27161E-4	1.57411	0.125263	0.006603392
1085.869	7.94834E-4	1.57411	0.125263	0.006345323
1089.737	9.32059E-4	1.57411	0.125263	0.007440819
1112.074	7.39815E-4	1.57411	0.125263	0.005906093
1212.948	6.25371E-4	1.57411	0.125263	0.00499246
1299.14	6.04674E-4	1.57411	0.125263	0.004440678
1408.006	5.88472E-4	1.57411	0.125263	0.004697891

**Cuadro A.31:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>152</sup>Eu para la distancia de 3cm y la fecha de 19/06/2014

Eficiencia Intrínseca de $^{152}\text{Eu}$ , distancia = 4cm, fecha 19/06/2014				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
121.7817	0.00459	1.04521	0.083175	0.055173415
244.6975	0.00265	1.04521	0.083175	0.031849565
344.6975	0.00204	1.04521	0.083175	0.024555233
411.1163	0.00162	1.04521	0.083175	0.019483691
443.965	0.00166	1.04521	0.083175	0.019932695
778.904	9.22936E-4	1.04521	0.083175	0.011096309
867.378	7.85742E-4	1.04521	0.083175	0.009446849
964.079	7.46411E-4	1.04521	0.083175	0.008973983
1085.869	7.02902E-4	1.04521	0.083175	0.008450879
1089.737	8.14529E-4	1.04521	0.083175	0.009792955
1112.074	6.65248E-4	1.04521	0.083175	0.007998167
1212.948	5.9791E-4	1.04521	0.083175	0.007188578
1299.14	5.62712E-4	1.04521	0.083175	0.0067654
1408.006	5.33153E-4	1.04521	0.083175	0.006410015

**Cuadro A.32:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el  $^{152}\text{Eu}$  para la distancia de 4 cm y la fecha de 19/06/2014.

Eficiencia Intrínseca de $^{152}\text{Eu}$ , distancia = 1cm, fecha 24/06/2014				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
121.7817	0.01061	4.06487	0.323471	0.032792789
244.6975	0.00537	4.06487	0.323471	0.016591774
344.6975	0.005	4.06487	0.323471	0.015463546
411.1163	0.00358	4.06487	0.323471	0.011066698
443.965	0.00332	4.06487	0.323471	0.010259319
778.904	0.00214	4.06487	0.323471	0.00661551
867.378	0.001461	4.06487	0.323471	0.004517275
964.079	0.001463	4.06487	0.323471	0.004517773
1085.869	0.00164	4.06487	0.323471	0.005059984
1089.737	0.00227	4.06487	0.323471	0.007021284
1112.074	0.00133	4.06487	0.323471	0.004118932
1212.948	9.98051E-4	4.06487	0.323471	0.003085441
1299.14	0.00125	4.06487	0.323471	0.003875161
1408.006	9.90475E-4	4.06487	0.323471	0.00306202

**Cuadro A.33:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el  $^{152}\text{Eu}$  para la distancia de 1cm y la fecha de 24/06/2014

Eficiencia Intrínseca de <sup>152</sup> Eu, distancia = 2cm, y fecha 24/06/2014				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
121.7817	0.00713	2.49815	0.198797	0.035843957
244.6975	0.00382	2.49815	0.198797	0.019231439
344.6975	0.0032	2.49815	0.198797	0.016083622
411.1163	0.00238	2.49815	0.198797	0.011980566
443.965	0.00233	2.49815	0.198797	0.011723743
778.904	0.0014	2.49815	0.198797	0.007058538
867.378	0.00106	2.49815	0.198797	0.005334437
964.079	0.001074	2.49815	0.198797	0.00540278
1085.869	0.001075	2.49815	0.198797	0.005406064
1089.737	0.0011	2.49815	0.198797	0.005520904
1112.074	9.41883E-4	2.49815	0.198797	0.004737913
1212.948	7.88311E-4	2.49815	0.198797	0.003965407
1299.14	8.64403E-4	2.49815	0.198797	0.004348171
1408.006	7.45456E-4	2.49815	0.198797	0.003749833

**Cuadro A.34:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>152</sup>Eu, para la distancia de 2 cm y la fecha de 24/06/2014

Eficiencia Intrínseca de <sup>152</sup> Eu, distancia = 3cm, y fecha 24/06/2014				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
121.7817	0.00713	1.57411	0.125263	0.041807823
244.6975	0.00382	1.57411	0.125263	0.02327062
344.6975	0.0032	1.57411	0.125263	0.018447021
411.1163	0.00238	1.57411	0.125263	0.014716723
443.965	0.00233	1.57411	0.125263	0.014433794
778.904	0.0014	1.57411	0.125263	0.00829333
867.378	0.00106	1.57411	0.125263	0.006981301
964.079	0.001074	1.57411	0.125263	0.006613101
1085.869	0.001075	1.57411	0.125263	0.006357416
1089.737	0.0011	1.57411	0.125263	0.00706148
1112.074	9.41883E-4	1.57411	0.125263	0.005942528
1212.948	7.88311E-4	1.57411	0.125263	0.00515983
1299.14	8.64403E-4	1.57411	0.125263	0.005309117
1408.006	7.45456E-4	1.57411	0.125263	0.004677304

**Cuadro A.35:** Muestran los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>152</sup>Eu para la distancia de 3 cm y la fecha de 24/06/2014

Eficiencia Intrínseca de $^{152}\text{Eu}$ , distancia = 3cm, y fecha 05/04/2021				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
121.7817	0.00497	1.57411	0.125263	0.039676521
244.6975	0.00288	1.57411	0.125263	0.022991626
344.6975	0.00218	1.57411	0.125263	0.017403383
411.1163	0.00172	1.57411	0.125263	0.01452943
443.965	0.00182	1.57411	0.125263	0.007983203
778.904	0.001	1.57411	0.125263	0.007060473
867.378	8.84416E-4	1.57411	0.125263	0.006558545
964.079	8.21543E-4	1.57411	0.125263	0.006325308
1085.869	7.96349E-4	1.57411	0.125263	0.006357416
1089.737	7.08309E-4	1.57411	0.125263	0.005654575
1112.074	7.27172E-4	1.57411	0.125263	0.005805162
1212.948	6.7643E-4	1.57411	0.125263	0.005400078
1299.14	6.5691E-4	1.57411	0.125263	0.005244246
1408.006	5.98055E-4	1.57411	0.125263	0.004774395

**Cuadro A.36:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el  $^{152}\text{Eu}$ , para la distancia de 3cm y la fecha de 05/04/2021

Eficiencia Intrínseca de $^{152}\text{Eu}$ , distancia = 5cm, y fecha 05/04/2021				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
121.7817	0.00281	0.731533	0.05821	0.048273493
244.6975	0.00171	0.731533	0.05821	0.029376396
344.6975	0.00127	0.731533	0.05821	0.021817557
411.1163	0.00106	0.731533	0.05821	0.01820993
443.965	0.00111	0.731533	0.05821	0.019068889
778.904	5.88019E-4	0.731533	0.05821	0.010101684
867.378	5.3088E-4	0.731533	0.05821	0.009120082
964.079	4.96508E-4	0.731533	0.05821	0.0085296
1085.869	4.61833E-4	0.731533	0.05821	0.007933912
1089.737	4.24948E-4	0.731533	0.05821	0.007300258
1112.074	4.41047E-4	0.731533	0.05821	0.007576825
1212.948	3.92682E-4	0.731533	0.05821	0.006745954
1299.14	3.83388E-4	0.731533	0.05821	0.006586291
1408.006	3.54604E-4	0.731533	0.05821	0.006091806

**Cuadro A.37:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el  $^{152}\text{Eu}$  para la distancia de 5 cm y la fecha de 05/04/2021

Eficiencia Intrínseca de <sup>152</sup> Eu, distancia = 7cm, y fecha 05/04/2021				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
121.7817	0.00181	0.406984	0.03239	0.055881445
244.6975	0.00114	0.406984	0.03239	0.035196048
344.6975	8.41387E-4	0.406984	0.03239	0.025976752
411.1163	6.93208E-4	0.406984	0.03239	0.021401914
443.965	6.99316E-4	0.406984	0.03239	0.021590491
778.904	4.15158E-4	0.406984	0.03239	0.012817475
867.378	3.69603E-4	0.406984	0.03239	0.011411022
964.079	3.39915E-4	0.406984	0.03239	0.010494443
1085.869	3.0486E-4	0.406984	0.03239	0.009412164
1089.737	2.75198E-4	0.406984	0.03239	0.008496388
1112.074	2.95353E-4	0.406984	0.03239	0.009118648
1212.948	2.98215E-4	0.406984	0.03239	0.009207008
1299.14	2.66874E-4	0.406984	0.03239	0.008239395
1408.006	2.4018E-4	0.406984	0.03239	0.007415252

**Cuadro A.38:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>152</sup>Eu para la distancia de 7cm y la fecha de 05/04/2021

Eficiencia Intrínseca de <sup>152</sup> Eu, distancia = 5cm, y fecha 05/04/2021				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
121.7817	0.00106	0.209639	0.016683	0.063537733
244.6975	6.91347E-4	0.209639	0.016683	0.041440209
344.6975	5.01607E-4	0.209639	0.016683	0.030066954
411.1163	4.66612E-4	0.209639	0.016683	0.02796931
443.965	4.55335E-4	0.209639	0.016683	0.027293353
778.904	2.48522E-4	0.209639	0.016683	0.014896721
867.378	2.30198E-4	0.209639	0.016683	0.013798358
964.079	2.08679E-4	0.209639	0.016683	0.012508482
1085.869	1.95768E-4	0.209639	0.016683	0.01173458
1089.737	1.95819E-4	0.209639	0.016683	0.011737637
1112.074	2.00467E-4	0.209639	0.016683	0.012016244
1212.948	2.05001E-4	0.209639	0.016683	0.012288018
1299.14	1.92193E-4	0.209639	0.016683	0.01152029
1408.006	1.57208E-4	0.209639	0.016683	0.009423245

**Cuadro A.39:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>152</sup>Eu, para la distancia de 10cm y la fecha de 05/04/2021

Eficiencia Intrínseca <sup>133</sup> Ba Distancia = 3cm, radio = 2.65cm y fecha 05/04/2021				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
79.6	0.00138	1.57411	0.125263	0.011016821
80.99	0.00135	1.57411	0.125263	0.010777325
276.39	0.00261	1.57411	0.125263	0.020836161
302.86	0.00244	1.57411	0.125263	0.019479016
356.02	0.00211	1.57411	0.125263	0.016844559
383.85	0.00165	1.57411	0.125263	0.013172286

**Cuadro A.40:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>133</sup>Eu para la distancia de 3cm y la fecha de 05/04/2021

Eficiencia Intrínseca <sup>133</sup> Ba Distancia = 5cm, radio = 2.65cm y fecha 05/04/2021				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
79.6	0.00139	0.731533	0.05821	0.023879059
80.99	0.00108	0.731533	0.05821	0.018553513
276.39	0.00165	0.731533	0.05821	0.028345645
302.86	0.00142	0.731533	0.05821	0.024394434
356.02	0.00118	0.731533	0.05821	0.020271431
383.85	0.00135	0.731533	0.05821	0.023191891

**Cuadro A.41:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>133</sup>Eu, para la distancia de 5 cm y la fecha de 05/04/2021

Eficiencia Intrínseca <sup>133</sup> Ba Distancia = 7cm, radio = 2.65cm y fecha 05/04/2021				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
79.6	6.83E-04	0.406984	0.03239	0.021087249
80.99	6.00E-04	0.406984	0.03239	0.018529299
276.39	0.00105	0.406984	0.03239	0.032417413
302.86	0.00101	0.406984	0.03239	0.031182464
356.02	8.83E-04	0.406984	0.03239	0.027271905
383.85	9.30E-04	0.406984	0.03239	0.028717629

**Cuadro A.42:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>133</sup>Eu para la distancia de 7 cm y la fecha de 05/04/2021

Eficiencia Intrínseca <sup>133</sup> Ba Distancia = 10cm, radio = 2.65cm y fecha 05/04/2021				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
79.6	3.79E-04	0.209639	0.016683	0.02274489
80.99	3.33E-04	0.209639	0.016683	0.019985854
276.39	5.83E-04	0.209639	0.016683	0.034965714
302.86	5.61E-04	0.209639	0.016683	0.033633699
356.02	4.91E-04	0.209639	0.016683	0.029415753
383.85	5.17E-04	0.209639	0.016683	0.030975124

**Cuadro A.43:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>133</sup>Eu, para la distancia de 10 cm y la fecha de 05/04/2021

### A.3.2. Eficiencia Intrínseca del HPGe2

Parámetros para la Eficiencia Intrínseca <sup>60</sup> Co Distancia = 7.5 cm radio = 2.65 cm fecha 17/03/2020 I				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
1173.237	0.041017887	0.358932	0.028563	0.014292861
1332.501	0.036331272	0.358932	0.028563	0.012766201

**Cuadro A.44:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>60</sup>Co, para la distancia de 1 cm y la fecha de 19/06/2014

Parámetros para la Eficiencia Intrínseca <sup>133</sup> Ba Distancia = 7.5 cm radio = 2.65 cm fecha 17/03/2020 I				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
276.39	0.00146	0.358932	0.028563	0.051115079
302.86	0.00143	0.358932	0.028563	0.050064769
356.02	0.00137	0.358932	0.028563	0.047964149
383.85	0.0013	0.358932	0.028563	0.045513426

**Cuadro A.45:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>133</sup>Ba para la distancia de 1 cm y la fecha de 19/06/2014

Parámetros para la Eficiencia Intrínseca <sup>137</sup> Cs Distancia = 7.5 cm radio = 2.65 cm fecha 17/03/2020 I				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
662.94	7.41922E-4	0.358932	0.028563	0.025974933

**Cuadro A.46:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>137</sup>Cs, para la distancia de 1 cm y la fecha de 19/06/2014

## A.4. Tablas de valores de los ajustes

Parámetros para la Eficiencia Intrínseca <sup>152</sup> Eu Distancia = 7.5 cm radio = 2.65 cm fecha 17/03/2020				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
121.7817	0.00293	0.358932	0.028563	0.102580261
244.6975	0.00184	0.358932	0.028563	0.064419004
344.6975	0.00129	0.358932	0.028563	0.045163323
411.1163	0.00103	0.358932	0.028563	0.036060638
443.965	0.00111	0.358932	0.028563	0.038861464
778.904	5.87452E-4	0.358932	0.028563	0.020566887
867.378	5.01587E-4	0.358932	0.028563	0.017560725
964.079	5.01587E-4	0.358932	0.028563	0.01677891
1085.869	4.27766E-4	0.358932	0.028563	0.014976228
1089.737	4.05391E-4	0.358932	0.028563	0.014192872
1112.074	4.1931E-4	0.358932	0.028563	0.014680181
1212.948	3.92455E-4	0.358932	0.028563	0.013739978
1299.14	3.45691E-4	0.358932	0.028563	0.012102755
1408.006	3.38851E-4	0.358932	0.028563	0.011863285

**Cuadro A.47:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>152</sup>Eu, para la distancia de 1 cm y la fecha de 19/06/2014 para el

Parámetros para la Eficiencia Intrínseca <sup>241</sup> Am Distancia = 7.5 cm radio = 2.65 cm fecha 17/03/2020				
Energía (keV)	Eficiencia Absoluta	Ángulo solido	Eficiencia Geométrica	Eficiencia Intrínseca
26.3448	1.07343E-4	0.358932	0.028563	0.003758114
59.5412	2.04052E-4	0.358932	0.028563	0.012766201

**Cuadro A.48:** Muestra los parámetros para el cálculo de la Eficiencia Intrínseca para el <sup>241</sup>Am, para la distancia de 1 cm y la fecha de 19/06/2014 para el

Energía	E.I. Detector <sup>1</sup>	E.I. Detector <sup>2</sup>	ΔE E.I
121.78	0.057	0.10258	0.04558
344.69	0.0265	0.04516	0.01866
867.37	0.01125	0.01756	0.00631
1408.01	0.008	0.01186	0.00386

**Cuadro A.49:** Muestra la comparación de la eficiencia intrínseca para los dos detectores

Energía (keV) 3cm	DER %
121.7817	3.026884906
244.6975	3.647957088
344.6975	3.735681061
411.1163	3.849001795
443.965	1.139598175
778.904	2.956500448
867.378	0.564162409
964.079	0.441524492
1085.869	0.255667507
1089.737	1.148011585
1112.074	1.209297805
1212.948	3.952261542
1299.14	3.289926148
1408.006	1.084672895

**Cuadro A.50:** Muestra los valores porcentuales para la desviación estándar relativa de la eficiencia absoluta para las distancias de 3cm para el

		Ajuste para la gráfica de eficiencia absoluta vs distancia			
Ecuación de ajuste: $y = A_1 \cdot \exp(-x/t_1) + A_2 \cdot \exp(-x/t_2) + y_0$	Energía(keV)	121.78	344.70	867.38	1408.00
parámetros de ajuste					
$y_0$		0.083	0.0414	0.017	-0.179
$A_1$		-0.031	-0.017	-0.009	0.092
$T_1$		8.641	9.342	6.864	-21.203
$A_2$		-0.030	-0.0166	-0.009	0.092
$T_2$		8.631	9.342	6.864	-28.371

**Cuadro A.51:** Muestra la ecuación polinómica utilizada para el ajuste y los parámetros en la eficiencia absoluta vs distancia

		Ajuste para la gráfica de eficiencia intrínseca vs distancia			
Ecuación de ajuste: $y = A_1 * \exp(-x/f_1) + A_2 * \exp(-x/f_2) + y_0$	Energía(keV)	121.78	344.70	867.38	1408.00
parámetros de ajuste					
$y_0$		0.903	0.912	1.034	-0.791
$A_1$		-0.312	-0.172	-0.093	0.933
$T_1$		23.327	27.332	19.002	-81.321
$A_2$		-0.301	-0.163	-0.092	2.002
$T_2$		24.075	27.567	19.345	-88.376

**Cuadro A.52:** Muestra la ecuación polinómica utilizada para el ajuste y los parámetros en la eficiencia intrínseca vs distancia

## A.5. Radioactividad

La radioactividad se refiere a las partículas que son emitidas por los núcleos como resultado de la inestabilidad nuclear. Debido a que el núcleo experimenta un intenso conflicto entre dos de las fuerzas más fuertes de la naturaleza (la electromagnética y la fuerza nuclear fuerte) (Kenneth S Krane [Ken88]), no debería sorprender que haya muchos isótopos nucleares que son inestables y emiten algún tipo de radiación. Los tipos más comunes de radiación se denominan radiación alfa, beta y gamma, pero existen otras variedades de desintegración radioactiva.

Las tasas de desintegración radioactiva se expresan normalmente en términos de sus vidas medias, y la vida media de una especie nuclear determinada está relacionada con su riesgo de radiación. Los diferentes tipos de radiactividad conducen a diferentes rutas de desintegración que transmutan los núcleos en otros elementos químicos. El examen de las cantidades de los productos de desintegración hace posible la datación radioactiva.

La radiación de fuentes nucleares se distribuye por igual en todas las direcciones, obedeciendo la ley del cuadrado inverso.

La radioactividad fue descubierta en 1896 por el científico francés Henri Becquerel, mientras trabajaba con materiales fosforescentes (Kenneth S Krane [Ken88]). Estos materiales brillan en la oscuridad después de la exposición a la luz, y sospechó que el brillo producido en los tubo de rayos catódicos por rayos X podría estar asociado con la fosforescencia. Envolvió una placa fotográfica en papel negro y colocó varias sales fosforescentes sobre ella. Todos los resultados fueron negativos hasta que usó sales de uranio. Las sales de uranio causaron un ennegrecimiento de la placa a pesar de estar envuelta en papel negro. A estas radiaciones se les dio el nombre de Rayos de "Becquerel"

Pronto se hizo evidente que el ennegrecimiento de la placa no tenía nada que ver con la fosforescencia, ya que el ennegrecimiento también lo producían las sales uranio no fosforescente y el uranio metálico. De estos experimentos quedó claro que había una forma de radiación invisible

que podía pasar a través del papel y que estaba haciendo que la placa reaccionara como si estuviera expuesta a la luz.

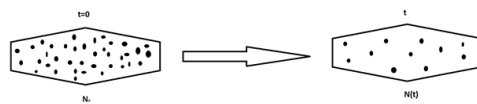
Al principio, parecía que la nueva radiación era similar a las radiografías recientemente descubiertas. Investigaciones posteriores de Becquerel, Ernest Rutherford, Paul Villard, Pierre Curie, Marie Curie, y otros demostraron que esta forma de radioactividad era significativamente más complicada. Rutherford fue el primero en darse cuenta de que todos estos elementos se desintegran de acuerdo con la misma fórmula matemática exponencial. Rutherford y su estudiante Frederick Soddy fueron los primeros en darse cuenta de que muchos procesos de desintegración resultaron en la transmutación nuclear de un elemento a otro. Posteriormente, se formuló la ley de desplazamiento radioactivo de Fajans y Soddy para describir los productos de desintegración alfa y beta (Mould [Mou95], Fajans. [Faj13]).

Los estudios del matrimonio de Marie y Pierre Curie, quienes encontraron otras sustancias radiactivas: torio, polonio y radio. La intensidad de la radiación emitida era proporcional a la cantidad de uranio presente, por lo que los Curie dedujeron que la radioactividad era una propiedad atómica. El fenómeno de la radioactividad se origina exclusivamente en el núcleo de los átomos radioactivos. Se cree que se origina debido a la interacción neutrón-protón. Al estudiar la radiación emitida por el radio, se comprobó que era compleja, pues al aplicarle un campo magnético, parte de ella se desviaba de su trayectoria y otra parte no.

### A.5.1. Ley de constante radioactivo

El decaimiento radioactivo es un proceso espontáneo en el que una muestra sufre una desintegración radioactiva. Existen diferentes tipos de procesos de desintegración radioactiva, por ejemplo, la desintegración alfa, beta, gamma y todos son diferentes entre sí porque emiten partículas diferentes que ocurren por diferentes razones, sin embargo, hay algo muy común entre todos estos procesos que es la expresión matemática, la cual nos dice cómo cambia el número de partículas con el tiempo algo que es común entre todas ellas y esta viene dada por la ley de desintegración radioactiva o ley de decaimiento radioactivo.

Antes de derivar la ley de desintegración radioactiva es importante entender que la radioactividad es un tipo de proceso muy diferente, es un proceso muy peculiar, por lo que, por ejemplo, si se tiene un átomo radioactivo en un contenedor, nunca se podrá predecir lo que le sucederá a ese átomo en la próxima hora, día o año, el átomo radioactivo podría sufrir desintegración de algún tipo en un período de tiempo que no se puede calcular, sin embargo, si se tiene, supongamos que cien de tales átomos o miles de tales átomos en este caso, puede hacerse una predicción aproximada de lo que será el número de átomos que quedan después de un tiempo  $t$ . ¿Qué nos dice esto? Nos dice que la radioactividad es un proceso probabilístico que significa que no puede hacerse una predicción precisa para un átomo, pero puede hacerse una buena estimación sobre una gran colección de átomos.



**Figura A.1:** Podemos observar del lado izquierdo una muestra radioactiva  $N_0$  en el tiempo  $t = 0$  y en el lado derecho podemos ver la misma muestra radiactiva  $N(t)$  después de un periodo  $t$

Una observación experimental muy importante asociada con la desintegración de la radioactividad, es en la cual se observa la velocidad a la que se produce la desintegración de cualquier tipo de sustancia, lo que significa que una cantidad de partículas que se desintegran durante un cierto período de tiempo es directamente proporcional al número de partículas presentes en ese instante de tiempo, la tasa de desintegración esta básicamente dada por  $\frac{dN}{dt}$  que es directamente proporcional al número de partículas  $N$  que están presentes para cualquier tiempo dado, la expresión anterior es normalmente conocida como la tasa de decaimiento o la actividad (decay rate). La proporcionalidad entre la expresión anterior y el número de partículas nos dice por ejemplo, que si un recipiente contiene una gran cantidad de dicha muestra radioactiva, la tasa de desintegración será mayor. Si un recipiente contiene una cantidad muy pequeña de la muestra radioactiva, la tasa de desintegración será menor, y usando esta observación experimental podemos derivar la ley de decaimiento radioactivo de la siguiente manera

$$\frac{dN}{dt} \propto N \quad (\text{A.1})$$

Entonces podemos decir que;

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (\text{A.2})$$

Donde;  $\lambda$  es una constante de proporcionalidad y que también se conoce como constante de desintegración o constante de decaimiento. Se observa un signo negativo aquí porque el número de partículas disminuye con el tiempo a medida que la muestra radioactiva se desintegra, no introducir un signo negativo, en esta ecuación básicamente significaría que el número de partículas está aumentando; sin embargo, en nuestro caso, el número de partículas está disminuyendo; por lo tanto, hemos usado un signo negativo, ahora con esta expresión entonces podemos intercambiar los

términos  $N$  y  $dt$  y conseguir

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (\text{A.3})$$

Ahora si consideramos para tiempo  $t = 0$ , tendremos un contenedor que tiene  $N_0$  números de átomos radioactivos y después de que haya transcurrido algún tiempo  $t$  el contenedor ahora tendrá  $N(t)$  números de muestras radioactivas, ahora podemos hacer la integración de esta expresión para este período de tiempo y resolver la ecuación diferencial para este caso escribimos

$$\int_N^{N_0} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{t=0}^t dt \quad (\text{A.4})$$

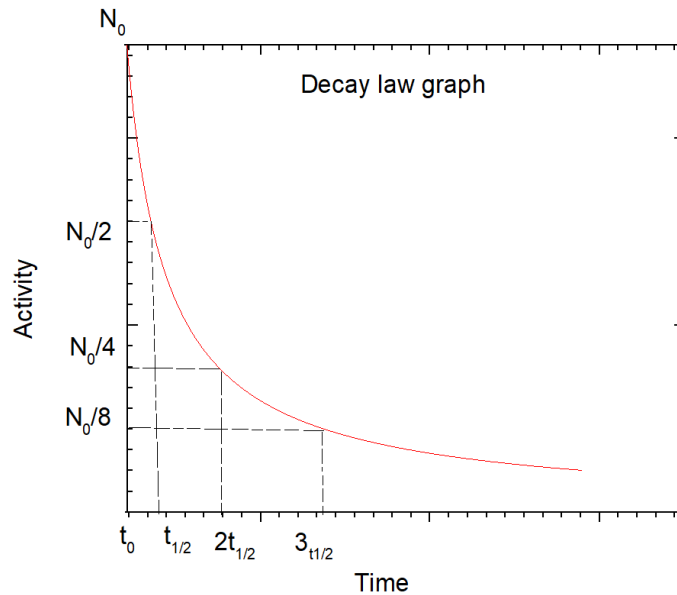
$$= \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (\text{A.5})$$

Y finalmente podemos escribir la ley de decaimiento radioactivo de la siguiente forma

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (\text{A.6})$$

Donde  $N(t)$  es el número de partículas en el tiempo  $t$ , esta es la ley de decaimiento radioactivo tal que cualquier muestra radioactiva la obedece,  $N$  es el número de partículas que existen en el contenedor en el tiempo  $t$ .  $N_0$  es el número inicial de partículas en el tiempo  $t = 0$ .

La expresión de arriba nos dice que la muestra radioactiva decrece del tal manera que muestra un comportamiento de decaimiento exponencial, y este va a depender mucho del tiempo, así como de la constante de decaimiento, esta es una constante que no depende de la temperatura, presión o densidad del material, más bien es una característica del elemento que se está desintegrándose así mismo. Ahora, como vemos en la figura anterior la muestra radioactiva contiene un número de partículas en el tiempo  $t=0$  y este número de partículas disminuirá lentamente de una manera exponencialmente decadente si se observa la expresión 2.1.4,



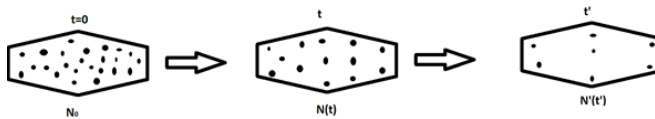
**Figura A.2:** observamos el comportamiento exponencial para una muestra que contiene en principio  $N_0$  número de partículas. Además muestra que el número de partículas decrece a la mitad de su valor original cuando  $N_0 \rightarrow N_0/2$  en un período de tiempo que es igual a su vida media  $T_{1/2}$ .

se puede decir que es muy dependiente de la constante de decaimiento porque si la constante de decaimiento es un número grande, entonces la desintegración ocurrirá muy rápido la cantidad de partículas disminuirá rápidamente, si la constante de desintegración es un número pequeño, entonces la desintegración ocurrirá muy lentamente por lo tanto el número de partículas va a cambiar muy lentamente.

## A.6. Vida media y principal

### A.6.1. Vida media

En la figura 2.2.1, supongamos que la muestra tiene  $N_0$  número de partículas en  $t = 0$ , después de algún tiempo  $t$  tiene  $N$  número de partículas y después de algún tiempo  $t'$  tiene aún menos número de partículas, estos son los mismos tipos de átomos donde el núcleo están experimentando el mismo tipo de desintegración nuclear sin embargo, la vida útil o principal de cada átomo individual es diferente, lo que significa que si tomamos una partícula del contenedor de en medio para un tiempo  $t$  tiene una vida útil más corta que una partícula que sufre desintegración en el contenedor de la derecha para un tiempo  $t'$ , aunque estamos hablando de la misma especie nuclear algunos de estos átomos sufrirán desintegración en muy poco tiempo y algunos de los átomos sufrirán desintegración en un período de tiempo muy largo. Esto significa que la vida útil de todos estos átomos no es la misma, se sabe de sobra que  $t < t'$  y  $N < N'$  entonces, ¿cuál es la vida útil promedio de todos estos átomos?. Podemos calcular el promedio de la vida útil al observar la vida útil total de todas estas partículas dividida por el número total de partículas presentes, por lo que esta cantidad es conocida como vida principal o vida útil promedio. La probabilidad de decaimiento se puede expresar como una función de



**Figura A.3:** Podemos ver una muestra radioactiva  $N_0$  en el tiempo  $t = 0$  y en medio podemos ver la muestra radioactiva con un número menor de partículas  $N(t)$  después de un periodo  $t$  y finalmente vemos en la parte derecha la muestra después de un periodo de tiempo  $t'$  y con número aún menor de partículas  $N'(t')$ , para  $t < t'$

distribución;

$$F(t) = Ae^{-\lambda t} \quad (\text{A.7})$$

Donde podemos normalizar esta función

$$[h] \int_0^{\infty} F(t) dt = \int_0^{\infty} A e^{-\lambda t} dt = -\frac{1}{\lambda} A e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} \quad (\text{A.8})$$

$$[h] = \frac{A}{\lambda} = 1 \quad A = \lambda \quad (\text{A.9})$$

La probabilidad de que una partícula dada se desintegre en el tiempo  $t$  está dada por la integral de la función de distribución de desintegración de 0 a  $t$ . Esta no es la cantidad que deseamos calcular; queremos el tiempo promedio e el que la partícula existirá sin desintegrarse. La probabilidad de que una partícula no se desintegre es uno menos la probabilidad de que se desintegre. La probabilidad de que una partícula permanezca en el tiempo  $t$  es entonces:

$$[h]P(t) = 1 - \int_0^t \lambda e^{-\lambda t'} dt' = 1 + e^{-\lambda t'} \Big|_0^t = e^{-\lambda t} \quad (\text{A.10})$$

El tiempo de supervivencia promedio es el valor medio del tiempo entonces podemos utilizar la siguiente función de probabilidad

$$[h]\langle t \rangle = \tau = \frac{\int_0^{\infty} t P(t) dt}{\int_0^{\infty} P(t) dt} = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt} \quad (\text{A.11})$$

$$[h] = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{\frac{1}{\lambda} [-e^{-\lambda t}]_0^{\infty}} = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt \quad (\text{A.12})$$

Esta integral puede evaluarse mediante integración por partes. Se hace un poco más directo mediante la sustitución  $x = \lambda t$ :

$$[h]\langle t \rangle = \tau = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} x e^{-x} dx \quad (\text{A.13})$$

La cual puede ser integrada por partes usando;

$$[h]udv = dw - vdu \quad (\text{A.14})$$

$$[h]u = x du = dx \quad (\text{A.15})$$

[h]

$$dv = e^{-x} dx \quad v = -e^{-x} \quad (\text{A.16})$$

Entonces la integral se convierte:

$$[h]\langle t \rangle = \tau = -xe^{-x} \Big|_0^\infty - \frac{1}{\lambda} \int_0^\infty -e^{-x} dx \quad (\text{A.17})$$

$$[h] = 0 + \frac{1}{\lambda} [-e^{-x}]_0^\infty = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{A.18})$$

la vida principal para una partícula viene dada por:

$$[h]\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \approx \frac{T_{1/2}}{0.69} \quad (\text{A.19})$$

donde  $\lambda$  es la constante de decaimiento radioactivo, básicamente estamos escribiendo que la vida principal es inversamente proporcional a la constante de decaimiento, es algo obvio debido a que si la constante de desintegración es grande, la desintegración ocurrirá rápidamente, la vida útil promedio será pequeña, ahora si la constante de desintegración tiene un número pequeño, la descomposición ocurrirá lentamente y la vida útil promedio de todas las partículas aumentarán, por lo que este es otro parámetro en el que vemos cómo se comportará la muestra radioactiva. podemos encontrar una correlación entre la vida principal y la vida media por lo que ya sabemos de la expresión A.19 de la vida media

$$[h]t_{1/2} = \frac{0.69}{\lambda} = \tau \cdot 0.69 \quad (\text{A.20})$$

$$[h]\tau = 1.44 \cdot t_{1/2} \quad (\text{A.21})$$

Esto quiere decir que la vida principal es mayor que la vida media de una muestra dada.

### A.6.2. Actividad Radioactiva

Como hemos visto anteriormente la velocidad a la que ocurre la desintegración radioactiva es directamente proporcional al número de partículas presentes, podemos obtener otra expresión que nos diga cómo va a cambiar la tasa con el tiempo, esto se conoce como ley de desintegración con respecto a la actividad. La velocidad a la que ocurre este tipo de proceso de desintegración viene dada por la tasa de desintegración, esto también se conoce como la actividad de la muestra

$$[h]R = -\frac{dN}{dt} \equiv \text{Actividad} \quad (\text{A.22})$$

introducimos un signo negativo aquí porque esto es una disminución de la muestra radioactiva, por lo tanto es una cantidad negativa.

Esta actividad también cambia con el tiempo a medida que el número de la muestra disminuye, la actividad también disminuye con el tiempo, esta es una cantidad específica y tiene una unidad la cual llamamos Becquerels o Bq (unidad de la actividad) ([Kenneth S Krane [Ken88]]) de donde

$$[h]1\text{Bq} = 1\text{dps} \quad (\text{A.23})$$

1dps (desintegraciones por segundo). Otra unidad asociada con los Becquerels es el Curie (Kenneth S Krane [Ken88])

$$[h]1\text{Curie} = 3.7 \times 10^{10}\text{dps} \quad (\text{A.24})$$

Podemos encontrar una relación con la actividad y la constante de decaimiento:

$$[h]\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (\text{A.25})$$

$$[h]R = \lambda N \quad (\text{A.26})$$

Donde  $N$ , ya lo obtuvimos de la ley de decaimiento, reescribiendo la ecuación anterior tenemos

$$[h]R = \lambda N = \lambda N_0 \exp(-\lambda t) \quad (\text{A.27})$$

Reescribiendo

$$R = R_0 \exp(-\lambda t) \quad (\text{A.28})$$

Donde definimos la constante  $R_0 = \lambda N_0$  la ecuación 2.3.6 nos da básicamente la actividad en cualquier tiempo  $t$  y  $R_0$  es la actividad en el tiempo  $t = 0$ , por lo que esta es la ley de desintegración radioactiva con respecto a la actividad.

## A.7. Cálculo de la Eficiencia Absoluta

Comencemos con el cálculo para fuente estándar  $^{152}\text{Eu}$  para la primera fecha y las 4 distancias correspondientes a ella, primero calcularemos la parte constante de la ecuación 8.2.5  $C_\gamma$  para esto contamos con el tiempo transcurrido el cual comprende desde 01/05/1983 hasta el 19/06/2014 el resultado de esto es 31 años 5 meses y 15 días al pasarlos a segundos obtenemos que han 982,540,000 s entre la fecha de fabricación y el la fecha en la que se utilizo la muestra, otro dato es la vida media para el  $^{152}\text{Eu}$  es de 13.537 años lo que queremos saber su constante de decaimiento para esto utilizamos la ecuación 2.2.3, poniendo esto en segundos tenemos que la vida media es 42,690,2832s

$$[h]\lambda = \frac{0.69}{t_{1/2}} = \frac{0.69}{426902832s} = 1.61629E - 9 \text{ 1/s} \quad (\text{A.29})$$

También tenemos los datos para la actividad de la muestra en el tiempo que se fabricación  $A_0 = 47,4619dps$ . Ahora si estamos listos para el calculo

$$[h]C_\gamma = \frac{1}{A_0 \exp(-\lambda(t - t_0))} = \frac{1}{474619dps \exp(-1.61629E - 9 \text{ 1/s}(982540000s))} \quad (\text{A.30})$$

$$[h]C_\gamma = 1.0312E - 05 \text{ dps} \quad (\text{A.31})$$

os falta calcular  $\frac{N_p(E)}{I_\gamma t_c}$  tenemos que el tiempo de conteo  $t_c = 2511s$  para las 14 intensidades de rayos gamma este se muestra en la tabla 4 esto primero el caso de la distancia  $d = 1\text{cm}$  y así hasta  $d = 4\text{cm}$  los resultados se encuentran en la tabla A.4, la Eficiencia Absoluta no depende de la distancia, sin embargo para cada distancia tendremos espectros diferentes por lo tanto la actividad de la muestra cambia, la siguiente figura tenemos los tiempo de conteo para cada distancia

## A.8. Distribución Gaussiana

En matemáticas, una función gaussiana, a menudo denominada simplemente gaussiana, es una función de la forma:

$$[h]f(x) = a \cdot \exp\left(\frac{(x - b)^2}{2c^2}\right) \quad (\text{A.32})$$

para constantes arbitrarias reales  $a$ ,  $b$  y no de cero  $c$ . El parámetro  $a$  es la altura del pico de la curva,  $b$  es la posición del centro del pico y  $c$  (la desviación estándar, a veces llamada ancho gaussiano) controla el ancho de la "campana". Las funciones gaussianas se utilizan a menudo para representar la función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria distribuida normalmente con valor esperado  $\mu = b$  y varianza  $\sigma^2 = c^2$ . La Gaussiana es una distribución simétrica continua cuya densidad viene dada por

$$[h]P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (\text{A.33})$$

Los dos parámetros  $\mu$  y  $\sigma^2$  corresponden a la media y la varianza de la distribución donde  $\mu$  es:

$$[h]\mu = E[x] = \int xP(x)dx \quad (\text{A.34})$$

$E[x]$  es el valor esperado de  $x$ . La varianza  $\sigma^2$  es:

$$[h]\sigma^2 = E[(x - \mu)^2] = \int (x - \mu)^2 P(x)dx \quad (\text{A.35})$$

La raíz cuadrada de la varianza se conoce como desviación estándar  $\sigma$ . La desviación estándar  $\sigma$  es una medida de la cantidad de variación o dispersión de un conjunto de valores. Una desviación estándar baja indica que los valores tienden a estar cerca de la media (también denominada valor esperado) del conjunto, mientras que una desviación estándar alta

indica que los valores se distribuyen en un rango más amplio.

$$[h]\sigma = \sqrt{E[(x - \mu)^2]} \quad (\text{A.36})$$

A partir de la ecuación anterior podemos encontrar la altura máxima cuando  $x = \mu$

$$[h]f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\mu - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (\text{A.37})$$

$$[h]H = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (\text{A.38})$$

donde H es la altura máxima. Otro concepto importante es el FWHM (Anchura máxima a media altura). En una distribución, FWHM es la diferencia entre los dos valores de la variable independiente en la que la variable dependiente es igual a la mitad de su valor máximo. FWHM se encuentra al encontrar los valores de x a la mitad de la altura máxima.

$$[h]f(x_0) = \frac{1}{2}f(\mu) \quad (\text{A.39})$$

$$[h]\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{1}{2\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (\text{A.40})$$

$$[h]\exp\left[-\frac{(x_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{1}{2} \quad (\text{A.41})$$

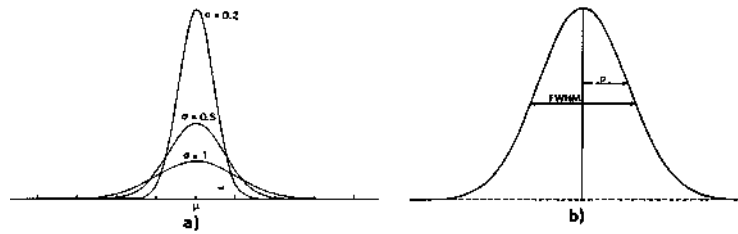
resolviendo para  $x_0$  tenemos

$$[h](x_0 - \mu)^2 = 2 \ln(2)\sigma^2 \quad (\text{A.42})$$

$$[h]x_0 = \pm\sigma\sqrt{2 \ln 2} + \mu \quad (\text{A.43})$$

Por definición de FWHM tenemos

$$[h]FWHM = x_{0+} - x_{0-} = \sqrt{2 \ln 2} \sigma = 2.355\sigma \quad (\text{A.44})$$



**Figura A.4:** a) La distribución gaussiana para varios  $\sigma$ . La desviación estándar determina el con de la distribución b) Relación entre la desviación estándar y la anchura maxima a media altura (FWHM)

La desviación estándar la podemos escribir como:

$$[h]\sigma = \frac{FWHM}{2.355} \quad (A.45)$$

Ahora tenemos una relación entre FWHM y la desviación estándar. El ancho no depende del valor esperado  $x_0$  es invariante bajo traslaciones

## A.9. Origin y CANDLE

CANDLE (Collection & Analysis of Nuclear Data using Linux nEt-work) Es un paquete de análisis de datos desarrollado por New generation Instrumentation and Acquisition Systems (NIAS) dependencia del Inter-University Accelerator Centre IUAC (Nuclear Science Centre), New Delhi. India, un software exclusivo para su uso en Linux soporta varios tipos de extensiones de texto, cuenta con su propia extensión .all o .All para el análisis de datos, es un programa muy amigable, convierte de una manera sencilla los número de canal en energía, es multitareas, muy potente, se utiliza para varias áreas como físico nuclear, radiación, partículas entre otras cosas (Corporation [Cor21] Y B. Ajith Kumar [B A01]).

## A.10. Detectores de Silicio

Un detector de silicio funciona con polarización inversa, por lo que la corriente de saturación inversa es relevante (corriente de fuga). Esta corriente está dominada por el par  $e^- h^+$  generado térmicamente. Debido al campo eléctrico aplicado, no pueden recombinarse y se separan. La deriva de  $e^- h^+$  a los electrodos provoca la corriente de fuga. El voltaje de agotamiento es el voltaje mínimo al que la mayor parte del sensor está completamente agotado. El voltaje de funcionamiento generalmente se elige para que sea un poco más alto (agotamiento excesivo). El material de alta resistividad (es decir, bajo dopaje) requiere un bajo voltaje de agotamiento. La señal generada en un detector de silicio depende esencialmente solo en el espesor de la zona de agotamiento y en el  $dE/dx$  de la partícula. El ruido en un sistema detector de silicio depende de varios parámetros: geometría del detector, el esquema de polarización, la electrónica de lectura, etc. El ruido se da típicamente como ENC de “carga de ruido equivalente”. Este es el ruido a la entrada del amplificador en cargas elementales. La resolución de la posición, el parámetro principal de un detector de posición, depende de varios factores, algunos debido a limitaciones físicas y algunos debido al diseño del sistema (parámetros externos).

- Procesos físicos:
  - Fluctuaciones estadísticas de la pérdida de energía
  - Difusión de portadores de carga
- Parámetro externo:
  - Lectura binaria (contador de umbral) o lectura de valor de la señal analógica
  - Distancia entre tiras (paso de tira)
  - Relación señal / ruido

Después de que la partícula ionizante ha pasado el detector,  $e^+ h^-$  los pares son cerca de la pista original. Mientras que la nube de  $e^+ h^-$  deriva a los electrodos, la difusión ensancha el distribución del portador de carga.

# Bibliografía

---

- [Art08] S. Venkatramanan Arti Gupta. *Technical Report of Charge Sensitive Preamplifier for Neutron Detector Array*. English. <https://www.iuac.res.in/themes/iuac/images/pdf/NAND-CSPreamp.pdf>. 2021-05-10. Ago. de 2008 (vid. pág. 34).
- [B A01] E. Subramaniam B. Ajith Kumar. *CANDLE*. English. <http://www.iuac.res.in/NIAS/>. 2021-05-10. Ago. de 2001 (vid. pág. 115).
- [Cor21] OriginLab Corporation. *Origin*. English. <https://www.originlab.com>. 2021-05-10. Ago. de 2021 (vid. pág. 115).
- [Faj13] Kasimir Fajans. **Radioactive transformations and the periodic system of the elements**. 1:1 (1913), 422-43 (vid. pág. 100).
- [Ken88] David Halliday Kenneth S Krane. **Introductory nuclear physics**. English. 2nd. Vol. 1. 2. 2021-05-10. Michigan: John Wiley, ago. de 1988 (vid. págs. 7, 10, 35, 99, 109).
- [Leo94] William R. Leo. **Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments**. English. 2nd. Vol. 1. 2. 2021-05-10. Mich: Springer, ago. de 1994 (vid. págs. 9, 24, 28, 32).
- [M K11] F. Hartmann M. Krammer. **Silicon Detectors**. 1:1 (2011), 5-20 (vid. pág. 13).
- [Mou95] F. Richard Mould. **A century of X-rays and radioactivity**. 1:12 (1995), 1-5 (vid. pág. 100).
- [ORT99] ORTEC. *Guidelines for Low Level Gamma Spectrometry – Air Filters, Water, and Soils*. English. <https://www.ortec-online.com/-/media/ametektortec/application-notes/guidelines-low-level-gamma-spectrometry.pdf?la=en&revision=fd436984-c8c7-42d4-9fa1-2d88d26f62a7&hash=0256BC206B630957A8D4860C2198C15E>. 2021-05-10. Ago. de 1999 (vid. pág. 71).
- [Son21] Alejandro Sonzogni. *NutDat*. English. <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/chartNuc.jsp>. 2021-05-10. Ago. de 2021 (vid. págs. 32, 39, 42).

- [U R17] C. Andreoiu U. Rizwan A.B. Garnsworthy. **Characteristics of high-purity germanium clover detectors**. 1:1 (2017), 1-5 (vid. pág. 33).