



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid  
Tel.: 91 336 3060  
info.industriales@upm.es

[www.industriales.upm.es](http://www.industriales.upm.es)



Jorge Rangel Sanz

05 TRABAJO FIN DE GRADO

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

# ESTUDIO DE NUEVOS DETECTORES PARA ESPECTROMETRÍA DE RADIACION GAMMA

Junio 2017

**Jorge Rangel Sanz**

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:

**Alfredo Lorente Fillol**



POLITÉCNICA



**POLITÉCNICA**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA NUCLEAR

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**ESTUDIO DE NUEVOS DETECTORES PARA  
ESPECTROMETRÍA DE RADIACIÓN  
GAMMA**

Trabajo realizado por Jorge Rangel Sanz en el Grado en Ingeniería  
de Tecnologías Industriales

---

Supervisado por:  
Alfredo Lorente Fillol

# Índice

<b>I</b>	<b>Introducción</b>	<b>6</b>
1.	Objetivo del proyecto	6
2.	Utilidad de la detección de radiación gamma	6
<b>II</b>	<b>Análisis teórico de un espectro gamma</b>	<b>8</b>
<b>3.</b>	<b>Interacción de la radiación gamma con la materia</b>	<b>10</b>
3.1.	Efecto fotoeléctrico . . . . .	10
3.2.	Efecto Compton . . . . .	11
3.3.	Producción de pares . . . . .	13
<b>4.</b>	<b>Espectro de altura de impulsos</b>	<b>15</b>
4.1.	Forma de los espectros de altura de impulsos . . . . .	15
4.2.	Poder de resolución del detector . . . . .	16
4.3.	Influencia del tamaño del detector en la forma del espectro . . . . .	17
<b>5.</b>	<b>Efectos debidos al medio que rodea al detector</b>	<b>18</b>
5.1.	Producción de rayos X en el blindaje . . . . .	19
5.2.	Efectos del rebote o dispersión . . . . .	20
5.3.	Efecto de la radiación de aniquilación . . . . .	21
<b>6.</b>	<b>Efectos especiales de respuesta en el detector</b>	<b>22</b>
6.1.	Efecto de las partículas beta: Bremsstrahlung . . . . .	22
6.2.	Efecto de la detección de positrones. Radiación de aniquilación . . . . .	24
6.3.	Efectos de suma . . . . .	25
6.3.1.	Suma por coincidencias . . . . .	25
6.3.2.	Suma por azar . . . . .	26
<b>7.</b>	<b>Espectrometría gamma cuantitativa</b>	<b>28</b>
7.1.	Eficiencia del detector . . . . .	28

7.2. Relación área del pico a área total . . . . .	29
7.3. Determinación de actividades absolutas . . . . .	30

### **III Utilización de un detector de centelleo para espectrometría**

#### **31**

<b>8. Descripción del detector de centelleo de NaI</b>	<b>32</b>
8.1. Partes del detector . . . . .	32
8.1.1. NaI . . . . .	32
8.1.2. Grasa óptica . . . . .	32
8.1.3. Tubo fotomultiplicador . . . . .	33
8.2. Instrumentación asociada . . . . .	33
8.2.1. Preamplificador . . . . .	33
8.2.2. Tarjeta de análisis multicanal . . . . .	34
8.3. GENIE-2000 . . . . .	34
<b>9. Calibración de espectros gamma</b>	<b>35</b>
9.1. Calibración en energías . . . . .	35
9.2. Calibración en eficiencia . . . . .	38
<b>10.Experiencia práctica con un detector de centelleo</b>	<b>40</b>

### **IV Utilización de un detector de germanio para espectrometría**

#### **44**

11.Estudio de la detección de radiación gamma por semiconductores	45
12.Descripción del detector de semiconductor de germanio	46
13.Experiencia práctica con un detector de germanio	48
14.Comparación entre detector de centelleo y detector de germanio	52

### **V Estudio de detectores de centelleo**

#### **54**

<b>15.CLYC</b>	<b>55</b>
15.1. Desarrollo de CLYC . . . . .	55
15.2. Creación y evaluación del cristal . . . . .	56
15.3. Detección de radiación gamma . . . . .	57
15.4. Detección de neutrones térmicos . . . . .	59
15.5. Detección de neutrones rápidos . . . . .	61
15.6. Discriminación por tamaño del pulso . . . . .	64
15.7. Comparación con detectores de centelleo tradicionales . . . . .	65
<b>VI Estudio de detectores de semiconductor</b>	<b>66</b>
<b>16.Criostatos</b>	<b>67</b>
<b>17.CZT</b>	<b>68</b>
17.1. Creación y desarrollo de CZT . . . . .	69
17.2. Características principales de CZT . . . . .	70
17.3. Comparación con detectores de semiconductor tradicionales . . . . .	71
<b>VII Presupuesto, conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>73</b>
<b>18.Planificación y presupuesto</b>	<b>74</b>
18.1. Planificación . . . . .	74
18.2. Presupuesto . . . . .	75
<b>19.Conclusiones</b>	<b>77</b>
<b>20.Trabajos futuros</b>	<b>79</b>
<b>VIII Bibliografía</b>	<b>80</b>

## Índice de figuras

1.	Red de vigilancia radiológica nacional . . . . .	7
2.	Gamma Cámara . . . . .	8
3.	Pico de escape producido en el efecto fotoelectrico . . . . .	11
4.	Esquema del efecto Compton . . . . .	12
5.	Diferencia entre espectro real y espectro teórico . . . . .	13
6.	Gráfico sección eficaz-energía del fotón . . . . .	15
7.	Espectros gamma en función de la energía de los fotones . . . . .	16
8.	Espectros gamma en función del tamaño del detector . . . . .	18
9.	Efectos debidos al entorno . . . . .	19
10.	Comparación según el blindaje . . . . .	21
11.	Brehmstrahlung en el espectro del Y-92 . . . . .	23
12.	Efecto de absorción de radiación Br . . . . .	24
13.	Ejemplo de pico suma . . . . .	26
14.	Muestra de suma por azar . . . . .	27
15.	Relación entre la energía y la eficiencia . . . . .	29
16.	Relación entre energía de fotones y $E_p.A$ . . . . .	31
17.	Tubo Fotomultiplicador . . . . .	33
18.	Model 2007B . . . . .	34
19.	Espectro obtenido a partir de la muestra para la calibración . . . . .	36
20.	Fotopicos obtenidos según el espectro . . . . .	37
21.	Recta de calibración en energías . . . . .	38
22.	Curva de calibración de la eficiencia del detector . . . . .	39
23.	Espectro de radiación gamma de la sal común . . . . .	41
24.	Espectro de radiación gamma de la sal yodada . . . . .	42
25.	Fotopicos correspondientes al espectro de la sal comun . . . . .	43
26.	Fotopicos correspondientes al espectro de la sal yodada . . . . .	43
27.	Diferencia de espectros en el detector de centelleo . . . . .	44
28.	Blindaje y refrigeración del detector de germanio . . . . .	47
29.	Panel multicanal del detector de germanio . . . . .	48
30.	Espectro de la sal común en el detector de germanio . . . . .	49
31.	Espectro de la sal yodada en el detector de germanio . . . . .	50

32.	Fotopicos de la sal comun en el detector de germanio . . . . .	51
33.	Fotopicos de la sal yodada en el detector de germanio . . . . .	51
34.	Diferencia de espectros en el detector de germanio . . . . .	52
35.	Diferencia entre resoluciones en función de la energía . . . . .	53
36.	Diferencia entre eficiencia en función ed la energía . . . . .	54
37.	Mejora de resolución de CLYC . . . . .	56
38.	Gráfica tiempo de respuesta-profundidad del cristal CLYC . . . . .	58
39.	Dependencia del tiempo de decaimiento con la temperatura . . . . .	59
40.	Estudio de neutrones térmicos para CLYC . . . . .	60
41.	Grosor de moderador adecuado para CLYC . . . . .	61
42.	Estudio de neutrones rápidos para CLYC . . . . .	62
43.	Gráficas de detección de neutrones rápidos en funcion de la energía	63
44.	Dependencia de la eficiencia con la energía del flujo neutrónico . . .	64
45.	Discriminación por tamaño del pulso en el espectro de Cf-252 . . .	65
46.	Comparación entre NaI y CLYC . . . . .	66
47.	Temperatura alcanzada en función del tiempo de funcionamiento . .	68
48.	Comparación del espectro del Cs-127 a lo largo de los años . . . . .	69
49.	Esquema del método Bridgman vertical . . . . .	70
50.	Comparación CdTe con CdZnTe . . . . .	71
51.	Detector CZT creado por Kromek . . . . .	72
52.	Arriba, espectro obtenido con CZT. Abajo, mismo espectro obtenido con HPGe . . . . .	73
53.	Diagrama de Gantt . . . . .	75
54.	Presupuesto horario . . . . .	76
55.	Tabla comparativa . . . . .	79

## Parte I

# Introducción

## 1. Objetivo del proyecto

El objetivo del proyecto va a versar sobre el estudio de varios tipos de detectores de radiación gamma que existen en el mercado y poder, gracias a la explicación teórica que se expondrá a lo largo del trabajo, decidir cuál o cuáles serían los posibles usos que se le darían a los detectores estudiados y, finalmente, decidir cuál o cuáles serían los mejores según con el objetivo final del proyecto, la elección de un detector más pequeño y compacto que los detectores tradicionales que permita su uso en trabajo de campo al ser más pequeño y compacto sin perder en demasía sus propiedades de detección.

## 2. Utilidad de la detección de radiación gamma

En este apartado se va a explicar cuál es la utilidad de detectar la radiación gamma que produzcan los materiales o elementos que se quieran estudiar. Para ello se van a proponer una serie de ejemplos donde se podrá observar exactamente la gran utilidad que podría tener el uso de detectores para distinguir o detectar elementos según si producen o no radiación gamma.

Uno de los muchos ejemplos donde la detección de radiación gamma es importante es la detección de elementos radiactivos en muestras donde se sospeche que puedan existir. Donde se demuestra este ejemplo es en el estudio de muestras ambientales realizado por la Comunidad de Madrid en el detector de germanio existente en la Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid. En ella, se recojen muestras gaseosas, líquidas y sólidas del medio ambiente y se miden en el detector de germanio en busca de sustancias que puedan producir radiación gamma. En España se ha establecido un sistema de redes de vigilancia radiológica, cuyo objetivo principal es la detección y vigilancia de elementos radiactivos presentes en diversos soportes como el aire, suelo o alimentos.

Para ello, se ha establecido dos redes de vigilancia: redes de vigilancia asociadas a centrales nucleares y redes de vigilancia no asociadas a instalaciones. A su vez, dentro del marco internacional, estas redes se asocian a las distintas redes de otros países para el estudio de la posible contaminación radiológica existente.

En la siguiente imagen, se puede observar la cantidad de puntos que existen en España que forman parte de la red de vigilancia radiológica nacional:



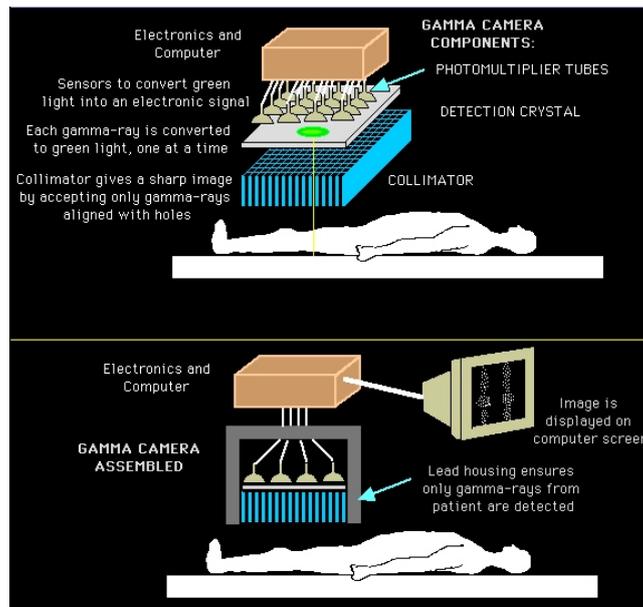
**Figura 1:** Red de vigilancia radiológica nacional

Los puntos azules corresponden con puntos de vigilancia asociadas a instalaciones y los puntos verdes con puntos de vigilancia no asociados a instalaciones. Los puntos azules se reúnen junto a centrales nucleares y a industrias asociadas a ellas.

Según el tipo de muestra que se vaya a vigilar, existen una serie de elementos radiactivos que pueden aparecer en ellos comúnmente y son los que, con mayor relevancia, se estudian.

Si en algún caso se detecta alguna sustancia productora de radiación gamma, el detector y el software asociado permite cuantificar la cantidad de la misma en la muestra. Esto hace que sea fácilmente saber el origen y la posible eliminación del mismo en el ambiente que sea detectado.

Otra posibilidad de uso de estos detectores de radiación gamma es la aplicación médica. La gammagrafía es el uso de radioisótopos que, al ser inyectados en el cuerpo humano y asociarse al órgano o tejido correspondiente, es posible visualizarlo gracias a un detector de radiación gamma que recoge los rayos gamma producidos por los radioisótopos introducidos.



**Figura 2:** Gamma Cámara

Otro de los posibles usos de la detección de radiación gamma es la posibilidad de conocer y cuantificar los elementos que hay dentro de paquetes sospechosos que se puedan requisar en aeropuertos u otros lugares. Esto hace que, sin abrir, se pueda conocer qué hay en el interior de estos paquetes y, así, saber exactamente qué hacer con ellos.

## Parte II

# Análisis teórico de un espectro gamma

La espectrometría gamma se basa en la obtención del espectro de energías de las radiaciones gamma emitidas por los radionucleídos. Existen dos tipos importantes de detectores de radiación gamma: detección de centelleo y detección gracias a un semiconductor.

La detección de centelleo se basa en la obtención de un espectro proporcional a la energía de la radiación gamma recibida. Es un proceso realmente complejo, que depende de factores tales como la posición y distancia del cristal, forma del espectógrafo o el blindaje usado por lo que se van a estudiar estos distintos tipos de factores para poder analizar en profundidad el espectro de radiación gamma. En general, la detección de fotones por un detector de centelleo se basa en la interacción de los fotones con el propio detector que, al reaccionar a los fotones incidentes, emitirá también fotones que podrán ser recogidos por un fotomultiplicador y que este proporciona una señal eléctrica que pueda ser analizada en un ordenador.

La parte más importante de los detectores de centelleo es el material centelleador, en el cual se realizan las interacciones con los fotones emitidos por los radionucleídos de la muestra. Puede ser de un material orgánico o inorgánico. Para poder seleccionar correctamente un material que pueda ser utilizado como centelleador se tienen en cuenta los siguientes parámetros: número atómico alto, gran volumen de detección y buena transparencia luminosa. Además, se pueden usar centelleadores líquidos o centelleadores sólidos.

Los centelleadores más utilizados son los sólidos de cristal inorgánico.

A pesar de que el espectro depende de toda una cadena de sucesos, el proceso fundamental que produce que el espectro tenga una forma u otra es la interacción de la radiación gamma con la materia. Esta interacción es la que producirá fotones que se recogen en el detector.

### 3. Interacción de la radiación gamma con la materia

Existen tres formas fundamentales de interacción de la radiación gamma con la materia: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares [1] [2]. Son efectos que dependen fundamentalmente de la energía del fotón incidente.

#### 3.1. Efecto fotoeléctrico

Se produce efecto fotoeléctrico cuando un fotón cede toda su energía cinética a un electrón del átomo provocando así, que el electrón quede excitado y pueda producirse la ionización del átomo. La energía cinética del electrón arrojado sera igual a la adquirida por el choque del fotón menos la energía de ligadura

$$E_e = E_\gamma - E_l \quad (1)$$

Donde:

$E_e$  = energía cinética del electrón lanzado.

$E_\gamma$  = energía cinética comunicada por el fotón.

$E_l$  = energía de ligadura.

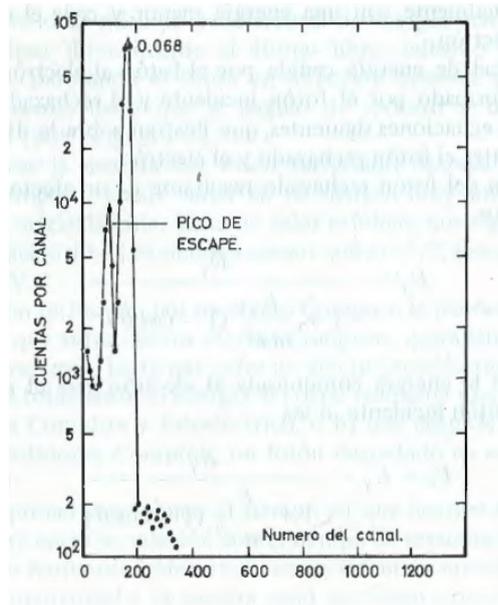
Como resultado de este proceso se crea una vacante en la capa electrónica mas interna del átomo, lo que provoca que electrones decaigan de capas mas exteriores, cediendo así parte de su energía en forma de rayo X. Puede suceder dos fenómenos con este rayo X:

- Sufre un nuevo fenómeno de efecto fotoeléctrico dentro del propio cristal, por lo que la energía del rayo X se reabsorbe. Este fenómeno tiene una alta probabilidad de ocurrir.

- Si el efecto fotoeléctrico se produce en el borde del cristal existe cierta probabilidad de escape del rayo X. Como consecuencia, la energía depositada por el fotón en el cristal será la suya menos la energía característica del rayo X producido por efecto fotoeléctrico. A este fenómeno se le conoce como *pico de escape de rayos X* y se representa como un fotopico menor en el espectro gamma.

Para energías de fotón muy altas, a partir de 160 KeV, este fotopico no se detecta por la falta de resolución de los detectores de centelleo.

El electrón despedido de su órbita cede su energía por colisiones elásticas al



**Figura 3:** Pico de escape producido en el efecto fotoelectrico

resto del cristal. Este fenómeno es demasiado rápido en el tiempo, resultando superior al tiempo de respuesta del detector, lo que hace que este proceso se represente por un fotopico en el espectro gamma, proporcional a la energía del fotón incidente.

### 3.2. Efecto Compton

En este fenómeno, el fotón incidente sufre un choque elástico con el electrón, cediendo así parte de su energía. El fotón sale rebotado con una dirección distinta y una energía menor a la incidente.

La cantidad de energía que tiene el fotón rechazado depende del ángulo entre el fotón incidente y el fotón rechazado y se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{mc^2}(1 - \cos\theta)} \quad (2)$$

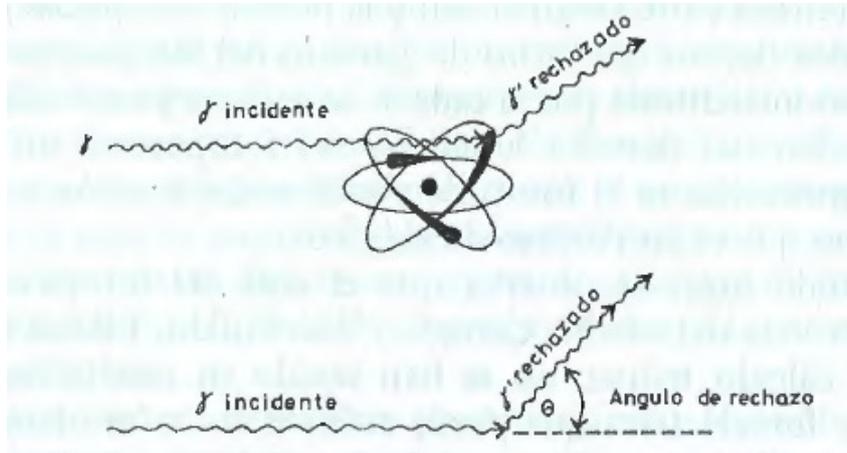
Mientras que la energía que absorbe el electrón es:

$$E_e = E_{\gamma} - \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{mc^2}(1 - \cos\theta)} \quad (3)$$

Donde:

$\theta$  = Ángulo entre fotón rechazado y el electrón.

$mc^2$  = relación de Einstein de la conversión de energía en masa y viceversa.



**Figura 4:** Esquema del efecto Compton

De las expresiones anteriores, se deduce que la energía del fotón y del electrón puede tomar muchos valores, que dependen del ángulo de dispersión, desde cero cuando el ángulo es nulo hasta la energía del fotón incidente cuando el ángulo de dispersión es de  $180^\circ$ .

Cuando el ángulo es prácticamente cero, el fotón sufre una simple dispersión en presencia del electrón de la capa electrónica del átomo. No se produce apenas ninguna interacción. En cambio si el ángulo es de  $180^\circ$ , el fotón sale rebotado en sentido opuesto al incidente. Como conclusión final, se deduce que el margen de energías del fotón rechazado es muy amplio pero siempre menor que  $\frac{mc^2}{2} = 0,257MeV$ .

Al fotón rechazado por efecto Compton puede realizar dos acciones fundamentalmente:

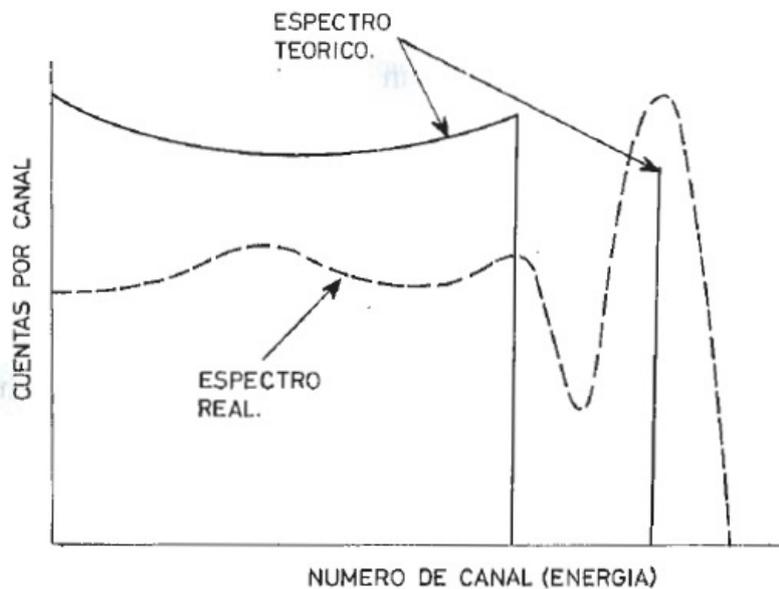
-Sufre otros efectos Compton, por lo que va degradando aún más su energía, y sufre un efecto fotoeléctrico final.

-Tras sufrir un efecto Compton, el fotón degradado escapa del cristal.

En el primer caso, al ser efectos instantáneos los efectos Compton, la energía detectada en el detector sera proporcional a la energía total del fotón y entrará dentro del rango del fotopico. En el segundo caso, se detectará una energía menor

a la del fotopico y, a su vez, un amplio rango de energías diferentes que puede tomar el fotón rechazado.

Existen diferencias significativas entre el espectro teórico y el espectro real obtenido tras un experimento. En la imagen 5, observamos que hay dos cambios fundamentales: la forma gaussiana que tiene el fotopico, ya que en el espectro teórico no se tiene en cuenta los errores introducidos al convertir una señal luminosa en señal eléctrica, y la menor área debajo de la curva producida por efecto Compton, ya que no se tiene en cuenta los efectos Compton que puede sufrir un fotón que ya ha sufrido un efecto Compton anterior.



**Figura 5:** Diferencia entre espectro real y espectro teórico

### 3.3. Producción de pares

La producción de pares solo se produce si la energía del fotón incidente es igual o superior a 1,02 MeV, energía equivalente a la masa en reposo del par electrón-positrón. Consiste en la desaparición de un fotón gamma, que produce un par electrón-positrón, la energía de estas dos partículas será la energía del fotón y su energía cinética será la diferencia de la energía total del fotón con la energía en reposo de estas partículas (1.02 MeV).

El electrón cede su energía al resto de electrones del cristal, excitándoles y produciendo un destello luminoso característico. En cambio, el positrón es inestable y reacciona junto con otro electrón del cristal produciéndose un proceso de aniquilación, que consiste en la unión de un positrón con un electrón para dar lugar a dos fotones de 0,51 MeV cada uno y que salen en sentidos opuestos.

Existen tres sucesos fundamentales que ocurren con la generación de estos dos fotones de aniquilación:

- Los dos fotones son absorbidos por el cristal mediante efecto fotoeléctrico, efecto Compton o una combinación de ambos. El pulso eléctrico caerá dentro de la región del fotopico.

- Los dos fotones escapan del cristal. Se genera una señal eléctrica correspondiente a  $0,51 \text{ MeV} \times 2 = 1,02 \text{ MeV}$  llamada *pico de escape doble*.

- Un solo fotón escapa del cristal. Se genera una señal eléctrica correspondiente a 0,51 MeV llamada *pico de escape simple*.

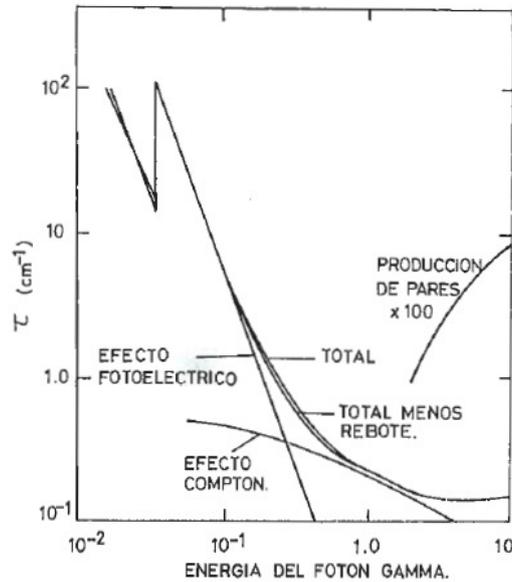
La probabilidad de que se produzca cualquier suceso anterior mencionado depende de un parámetro llamado coeficiente de absorción correspondiente al suceso y el valor del parámetro depende de la energía del fotón. Este parámetro nos da la probabilidad de absorción del fotón por parte del cristal por cualquiera de los sucesos mencionados, por lo que podemos llamar a este parámetro sección eficaz del cristal.

Podemos expresar la sección eficaz de absorción total del cristal mediante la suma de las secciones eficaces de cada suceso:

$$\tau_{total} = \tau_{fotoelectrico} + \tau_{Compton} + \tau_{p.pares} \quad (4)$$

En la siguiente gráfica tenemos una visión mas clara de la contribución de cada suceso a la sección eficaz total en función de la energía del fotón.

Un simple examen a la figura 6 se observa que, a bajas energías, predomina el efecto foto eléctrico mientras que, a energías a partir de 300 KeV, predomina el efecto Compton. La produccion de pares se produce a partir de 1.02 MeV pero no tiene un impacto significativo.



**Figura 6:** Gráfico sección eficaz-energía del fotón

## 4. Espectro de altura de impulsos

Los impulsos electricos debidos a la interacción de los fotones con el detector dependen de la energía depositada. Estos impulsos deben ser analizados y para ello necesitamos un equipo llamado analizador de altura de impulsos.

Este analizador puede ser monocanal, si consta de un solo canal, o multicanal, si posee varias celdas para la detección de impulsos. Con este detector, si analizamos los impulsos provenientes del cristal, obtenemos el espectro de radiación gamma.

El espectro no solo depende de la respuesta del detector si no de varios de los siguientes parámetros

### 4.1. Forma de los espectros de altura de impulsos

Como hemos observado en la figura 5, vemos que la forma del espectro debido al efecto Compton es de forma continua que va desde cero de forma continuada hasta llegar al fotopico, que es de una única energía debida al efecto fotoeléctrico.

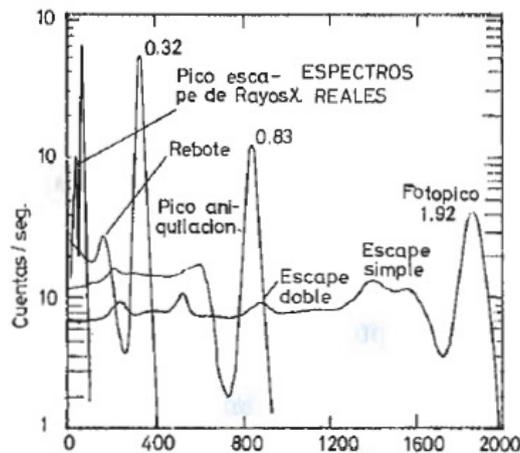
En cambio, en el espectro real, hay dos pequeñas diferencias: bajada de la altura del espectro debido a los efectos Compton producidos y la forma gausiana

del fotopico del espectro. Ya se ha comentado porqué se dan estas diferencias.

El fotopico o pico de absorción total es la característica más importante de los espectros gamma. Su posición determinará la energía del rayo gamma producido.

El aumento de probabilidad de absorción de fotones que han sufrido efecto Compton da un fenómeno denominado sima de Compton, depresión formada antes del fotopico ya que es altamente improbable que un fotón de baja energía pueda abandonar el cristal sin que sufra un efecto fotoeléctrico.

En la siguiente figura se va a comparar diversos espectros dependiendo de la energía de los fotones emitidos.



**Figura 7:** Espectros gamma en función de la energía de los fotones

Podemos observar distintas formas de espectro en función de la energía: para energías muy bajas el espectro se acomoda a un único fotopico, para energías medianas, aparece un espectro continuo debido al efecto Compton y el correspondiente fotopico, y para fotones de alta energía (con mas de 1.02 MeV) aparecen picos de aniquilación, correspondiente al fenómeno de producción de pares.

## 4.2. Poder de resolución del detector

El poder de resolución de un detector es la medida de la capacidad que tiene un detector de distinguir rayos gamma con energías muy proximas. Es dependiente de la anchura del fotopico, si el fotopico es muy ancho el detector tiene poco poder de resolución ya que no podremos distinguir en el fotopico dos rayos gamma con

energías parecidas.

De este modo se expresa la resolución del detector:

$$Resolución = \frac{X}{Y} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

X = Anchura del fotopico a la mitad de su altura.

Y = Energía del fotopico.

No se puede expresar de igual forma el poder de resolución según la energía del fotopico. Para los detectores de INa se realiza con Cs-137 referido al fotopico de 0.66 MeV y depende del tamaño y forma del cristal. En general, se obtienen resoluciones entre 7,5 y 8,5 por ciento .

La anchura del fotopico es consecuencia de cada una de las fluctuaciones estadísticas que se producen en la medida del espectro. Merece la pena mencionar:

- Conversión de energía cinética de los electrones liberados en energía luminosa.
- Eficiencia de captación de la luz y de la transferencia de los fotones en el cátodo.

- Eficiencia en el fotocátodo de convertir fotones luminosos en energía eléctrica.

- Eficiencia del fotomultiplicador.

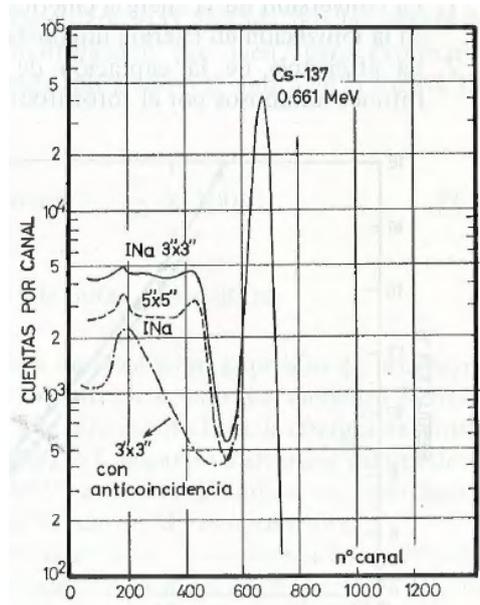
- Eficiencia de multiplicación de electrones secundarios que llegarán al ánodo.

La variación estadística de todos estos procesos contribuyen a aumentar la anchura del fotopico. Lo más adecuado es estudiar cada una por separado.

### **4.3. Influencia del tamaño del detector en la forma del espectro**

Tal y como se ha expuesto antes, el espectro gamma depende de la energía depositada en el cristal por parte del fotón incidente. Por lo que se deduce que, a cristales más grandes, es más probable que el fotón incidente no escape del cristal y, por lo tanto, depositará en su interior toda su energía.

Por lo que, a cristales más grandes, se incrementan los sucesos de absorción de energía completa por lo que disminuye los sucesos Compton y aumenta la altura del fotopico. En la siguiente gráfica tenemos la comparación:



**Figura 8:** Espectros gamma en función del tamaño del detector

Un fenómeno parecido ocurre con los fenómenos de escape. A mayor tamaño del detector, es más improbable que los fotones producidos por el fenómeno de aniquilación escapen del detector y, en consecuencia, los picos de escape disminuye.

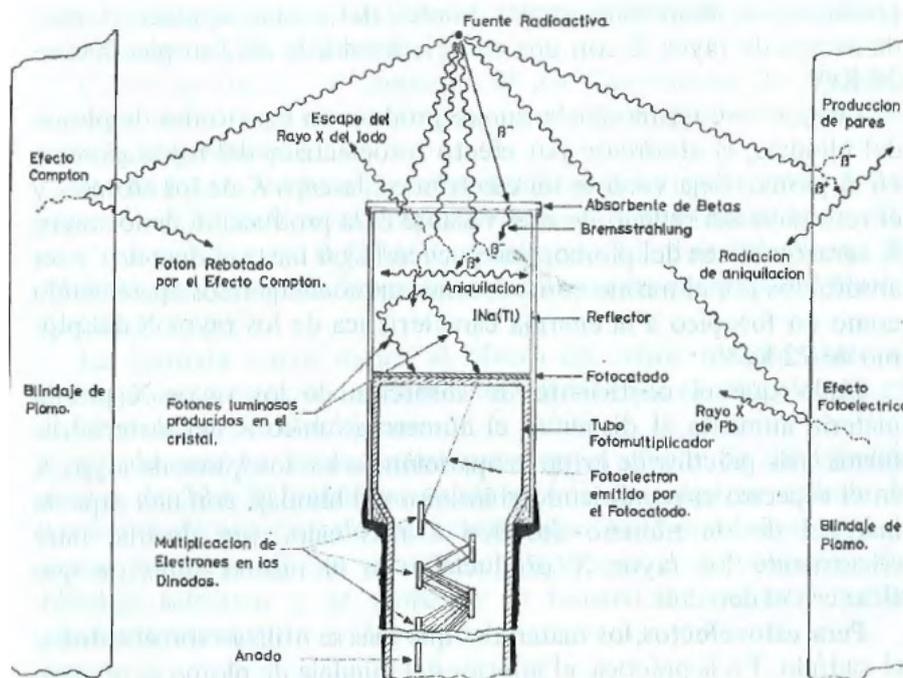
En general, se recomienda usar cristales lo más grandes posibles. Se utilizan en la práctica cristales de 3 x 3 de INa.

## 5. Efectos debidos al medio que rodea al detector

En la práctica es imposible aislar totalmente el detector y la fuente radiactiva, por lo que tanto uno como otro sufre efectos debidos a otros factores que rodean al conjunto.

En primer lugar, el conjunto esta rodeado de un montaje y un aislante que protege de la radiación de fondo del ambiente, por lo que el espectro también tiene una dependencia de los materiales que rodean al conjunto fuente-detector. En la siguiente figura tenemos un esquema detallado de todos los fenómenos que se producen:

El proceso de efecto fotoeléctrico en el blindaje produce una serie de rayos X del material del blindaje. Los efectos Compton que se producen en el material de



**Figura 9:** Efectos debidos al entorno

blindaje produce un espectro de impulsos que se denomina picos de rebote

### 5.1. Producción de rayos X en el blindaje

Para reducir el efecto de la radiación de fondo en el espectro, se utilizan blindajes. Estos blindajes son de un material denso con una Z alta, los más comunes son de plomo.

Si se produce efecto fotoeléctrico en el blindaje de plomo, queda vacante una posición K en la capa electrónica, que se rellena con electrones de capas superiores por lo que desprenden un rayo X de 72 keV.

Dado que el coeficiente de absorción de rayos X aumenta cuando disminuye la Z del material, se suele recubrir el plomo con una capa de un material con una Z menor que la del blindaje.

Los materiales elegidos son el cadmio y el cobre. Se recubre primeramente con 0.8mm de espesor de cadmio. Este cadmio, a su vez, produce rayos X por lo que se coloca una protección secundaria de 0.4 mm de espesor de cobre.

También, al aumentar las dimensiones del blindaje disminuye la posibilidad de interacción de los rayos X con el detector, por lo que disminuye su influencia en el espectro gamma.

## 5.2. Efectos del rebote o dispersión

El pico de rebote aparece superpuesto al efecto Compton en la zona de bajas energías del espectro. Surge por la interacción de fotones de efecto Compton que sufre otro efecto Compton al interaccionar con el blindaje.

A simple vista es evidente que los fotones de efecto de rebote pueden venir desde todos los ángulos y con energías variadas. Sin embargo, tras una serie de experiencias prácticas, observamos que, para ángulos de más de  $120^\circ$  los fotones de rebote no dependen del ángulo de rebote y la anergia de estos fotones es de 200 KeV a 300 KeV.

Luego, en el espectro, los fotones producidos por efecto rebote estarán entre la zona de 200KeV y 300KeV en un pico muy ancho. Esta zona se denomina *zona de rebote*.

Hay dos variables fundamentales que afectan a la zona de rebote:

-Número atómico del blindaje, a mayor número atómico menos probable que se produzca el rebote de los fotones.

-Dimensiones del blindaje, a mayores dimensiones se reduce el ángulo sólido y es menos probable que un fotón alcance el detector

Como se puede observar en la imagen, hay una considerable reducción de la altura del pico de rebote al usar plomo como blindaje en vez de hierro. Esto se debe a que la sección eficaz de efecto fotoeléctrico del plomo es muy elevada en comparación con la del hierro por lo que los fotones no sufren rebote por efecto Compton. En comparación con los dos picos de plomo, se reduce el tamaño al usar un blindaje de mayores dimensiones.

La forma del pico es interesante. Es un pico ancho con sucesivos picos más pequeños. El pico de mayor altura corresponde a un rebote de  $180^\circ$  mientras que los picos más pequeños corresponden a fotones que hayan sufrido varios efectos Compton.

Como conclusión, se elige un material de blindaje con alta Z, como el plomo,

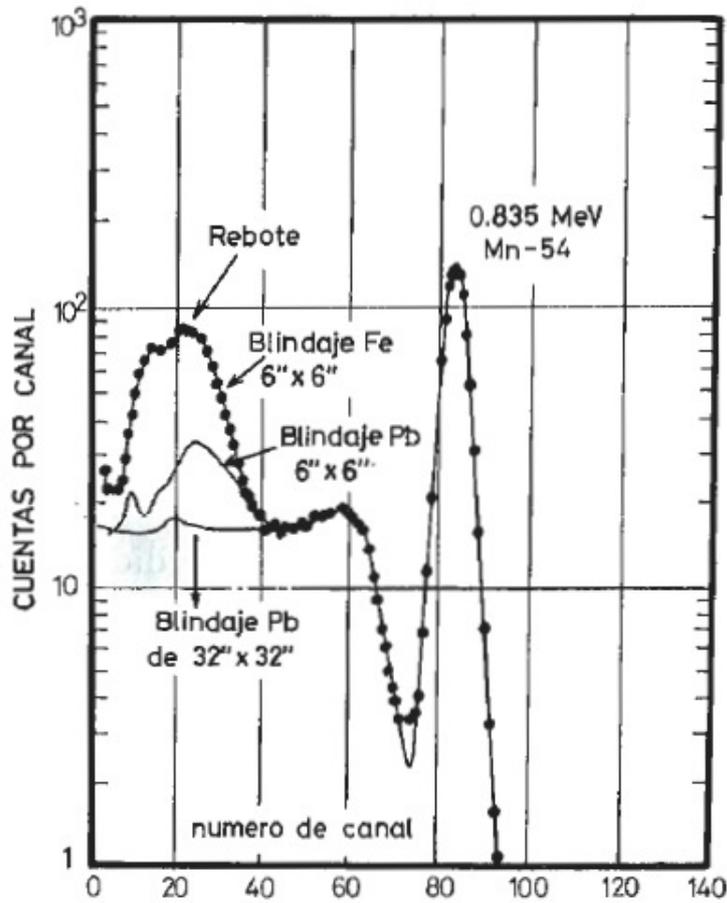


Figura 10: Comparación según el blindaje

y un recinto que rodea al detector lo más grande posible.

### 5.3. Efecto de la radiación de aniquilación

Como efecto analogo a como ocurre con la producción de pares en el detector, se puede producir un pico de aniquilación de 0,51 MeV en el espectro si se produce el suceso de aniquilación en el blindaje y uno de los fotones creados llega al detector. Se disminuye este efecto bajando la Z de los elementos próximos al detector.

## 6. Efectos especiales de respuesta en el detector

En este apartado, se estudiará los efectos especiales que pueden modificar el espectro de radiación gamma.

### 6.1. Efecto de las partículas beta: Bremsstrahlung

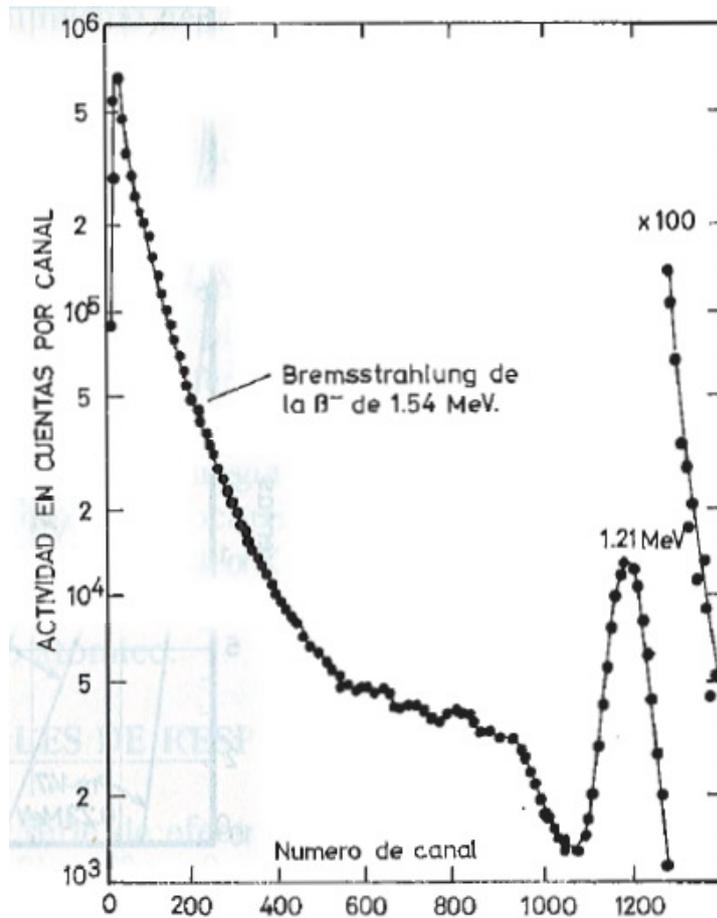
Cuando la fuente radiactiva que estamos midiendo emite, en adición con partículas gamma, partículas beta; estas pueden ser absorbidas por materiales que rodean al detector produciéndose una pequeña fracción de rayos X o radiación de frenado conocida como *Bremsstrahlung*, palabra alemana que significa radiación de frenado.

El espectro de este tipo de radiación decrece rápidamente, es continuo y como energía máxima es la energía de la partícula beta incidente. La probabilidad de que se produzca este proceso varía con la raíz cuadrada de  $Z$  del material.

Cuando esta radiación incide sobre el detector produce un espectro continuo que decrece muy rápidamente hasta la energía de la partícula beta.

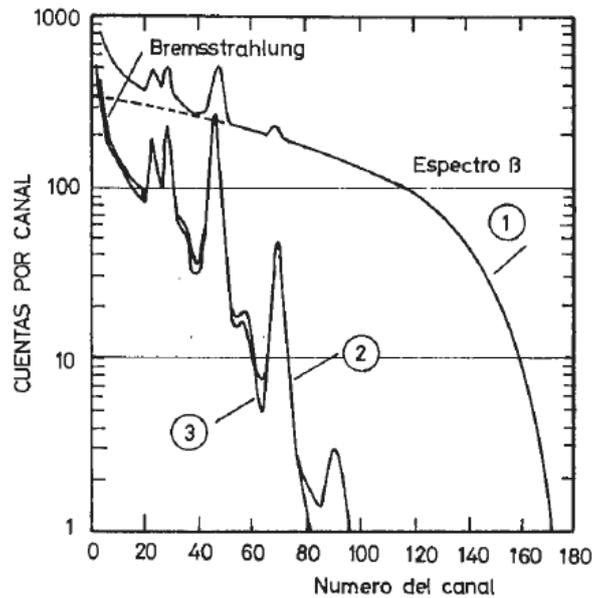
En la práctica, casi todos los espectros gamma tienen radiación de frenado en él, ya que la mayoría de emisores gamma son también emisores beta. El efecto de la radiación de frenado suele ser despreciable en la mayoría de los casos.

Solo cuando la proporción de emisiones beta es mucho mayor que las emisiones gamma se puede apreciar en el espectro, dando lugar a confusiones con la situación del fotopico. Uno de los ejemplos es el Y-92 con una proporción del 2 por ciento de emisiones gamma contra un 100 por ciento de emisiones beta. A continuación tenemos su espectro:



**Figura 11:** Brehmstrahlung en el espectro del Y-92

Por lo que, en la mayoría de los casos, es conveniente frenar las partículas beta a la salida de la fuente radiactiva. Para ello se utiliza un absorbente de bajo Z como puede ser el poliestireno o el berilio, que puede frenar partículas beta de hasta 2,5 MeV. En la siguiente figura se puede observar mejor el efecto de estos absorbentes:



**Figura 12:** Efecto de absorción de radiación Br

En la gráfica 1, vemos el espectro sin absorbentes, por lo que el espectro gamma queda totalmente escondido por la radiación de frenado, mientras que en la gráfica 2 podemos observar los picos característicos de un espectro gamma al poner como absorbente berilio de  $1,25g/cm^3$ .

No obstante, los absorbentes también pueden difuminar el propio espectro gamma. Tiene especial relevancia en la sima de Compton, siendo esta aún más baja con el uso de absorbentes. Esto se puede explicar por la detección de fotones de un ángulo demasiado grande que queda disminuidos por el efecto de los absorbentes.

## 6.2. Efecto de la detección de positrones. Radiación de aniquilación

Cuando se realiza un espectro gamma de un material que decae por generación de positrones se produce en el espectro un pico de aniquilación de  $0,51\text{ MeV}$ .

El proceso que se produce es el siguiente: al caer el positrón en el cristal del detector, este reacciona con los electrones libres que hay produciéndose un proceso de aniquilación al igual que en la producción de pares. También se puede producir el pico suma de  $1,02\text{ MeV}$ .

En la práctica, solo se da el pico de 0,51 MeV ya que la absorción de positrones se produce en la superficie del cristal por lo que la probabilidad de escape de al menos uno de los fotones producidos es muy alta al tener direcciones opuestas y una de ellas sea la de salida del cristal.

Este fenómeno se suele producir solo en generadores de positrones.

### 6.3. Efectos de suma

Los efectos suma se producen como consecuencia del tiempo limitado de respuesta del fotomultiplicador e implica que dos fotopicos muy juntos se unan y se produzca un solo fotopico con la suma de sus energías. Hay dos tipos de efectos suma: suma por coincidencias y suma por azar.

#### 6.3.1. Suma por coincidencias

En la desintegración beta de algunos elementos, tras la aparición de la partícula beta, se producen en cascada dos rayos gamma que pueden ser detectados simultaneamente por el detector. La consecuencia es la aparición de un fotopico en el espectro con la suma de las energías de los rayos gamma detectados. La intensidad del fotopico viene dada por la siguiente expresión:

$$N_{sc} = N_c E_1 E_2 F(\theta) \quad (6)$$

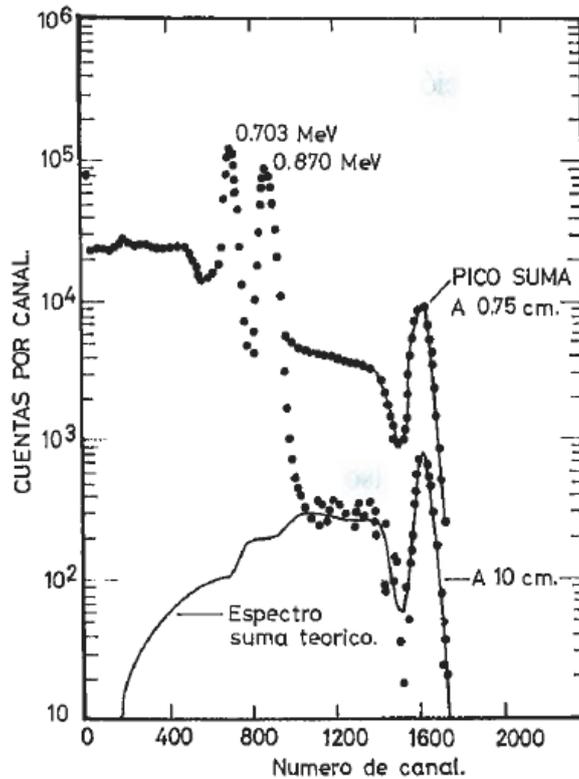
Donde:

$N_c$  = Número de parejas de rayos gamma emitidos por unidad de tiempo.

$E_1$  y  $E_2$  = Eficiencias del detector para los dos rayos gamma.

$F_\theta$  = Factor que incluye la distancia objeto-detector y la correlación angular.

En la siguiente imagen podemos observar un pico producido por efecto suma



**Figura 13:** Ejemplo de pico suma

Como podemos observar, hay dos fotopicos de 0,703 MeV y 0,87 MeV respectivamente y, a su vez, otro fotopico correspondiente a la suma de estas energías. También podemos observar el efecto de la distancia, siendo mayor el fotopico suma a distancias más cortas, por lo que se recomienda realizar la medida lo más alejado del detector posible.

Un caso especial es el fotopico suma por aniquilación de 1,02 MeV estudiado previamente.

### 6.3.2. Suma por azar

En muchas ocasiones, con fuentes muy intensas, se producen coincidencias en el tiempo en la detección de dos rayos gamma. Esto se produce porque la emisión de los rayos gamma por parte de la fuente es totalmente independiente del tiempo y el tiempo de detección es finito por lo que dos sucesos distintos pueden coincidir

en el tiempo y, así, que se considere un único suceso con la suma de sus energías.  
 La probabilidad que se produzca viene dada por la siguiente expresión:

$$N_{sa} = N^2\tau \quad (7)$$

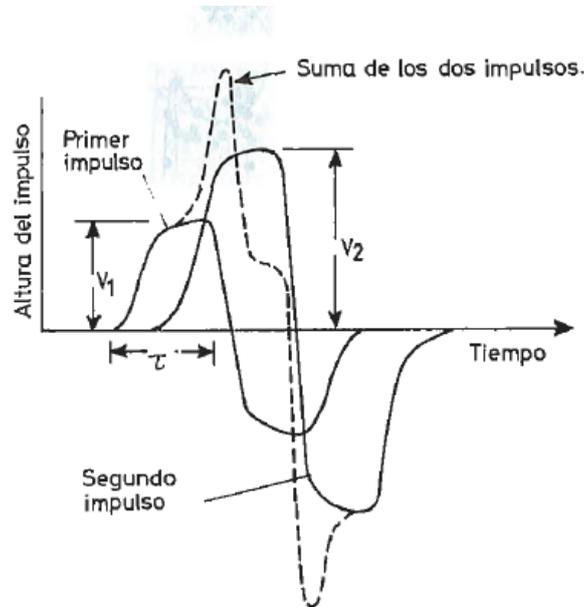
Donde:

$N_{sa}$  = Número total de pulsos que aparecen el pico suma.

$N$  = Número total de pulsos que entran en la unidad electrónica por unidad de tiempo

$\tau$  = Tiempo de resolución

En la siguiente gráfica podemos observar como, si en el tiempo de resolución coinciden dos pulsos distintos, se produce su suma cuando coinciden ambos dos.



**Figura 14:** Muestra de suma por azar

En el caso de la suma por azar, la distancia entre la fuente y el detector no influye. Solo se tiene en cuenta el cuadrado de la velocidad de contaje.

## 7. Espectrometría gamma cuantitativa

La espectrometría gamma cuantitativa consiste en conocer, a través del espectro gamma obtenido, la actividad de la fuente que se está estudiando. Esto se realiza con fórmulas matemáticas que tienen en cuenta diferentes aspectos del detector que se van a exponer a continuación:

### 7.1. Eficiencia del detector

La eficiencia del detector se define como la fracción de rayos gamma emitidos por la fuente que interactúan con el detector. Se define como  $T(E)$ , ya que depende de la energía de los rayos gamma emitidos.

También influyen en la eficiencia del detector la geometría fuente-detector (tamaño, distancia, ...) y el coeficiente de absorción de radiación gamma del INa, dada por  $\tau(E)$ .

Mediante cálculo teórico, se puede derivar los valores de la eficiencia total del detector para unos valores de geometría establecidos y un coeficiente de absorción conocido.

Las ecuaciones de Heath estudiaron la eficiencia del detector para una fuente puntual y para una fuente en forma de cilindro para un detector de INa de 3x3 a distancias de 0cm y 10cm. En la siguiente gráfica podemos observar la correlación existente:

En estos casos no se ha considerado la radiación dispersa en el medio que, como se ha estudiado anteriormente, puede contribuir a la forma del espectro gamma y, por lo tanto, a su eficiencia.

Dado que esta radiación dispersa no afecta al fotopico, podemos definir una eficiencia de fotopico para el detector,  $Ep$ , que nos da la probabilidad de que un fotón gamma con energía  $E$  caiga dentro de la región del fotopico.

El valor de  $Ep$  representa una medida más exacta de los fotones emitidos por la muestra que reaccionan con el detector, ya que viene dada sin la influencia de la radiación dispersa del medio.

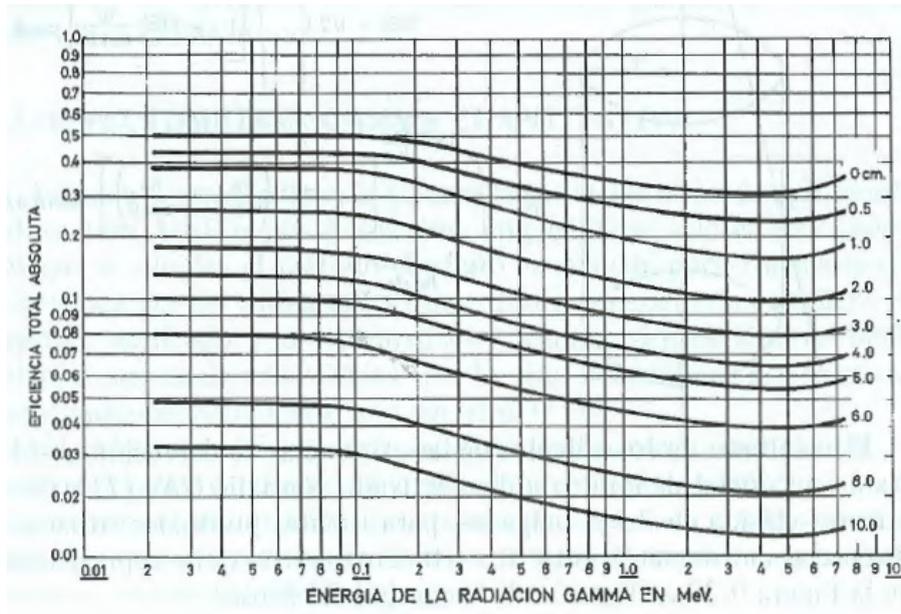


Figura 15: Relación entre la energía y la eficiencia

## 7.2. Relación área del pico a área total

A pesar de que calcular  $T(E)$  es relativamente sencillo, calcular  $Ep$  es muy complicado por el gran número de interacciones posibles que se pueden dar para que el fotón caiga dentro del fotopico.

Ya que  $Ep$  no se puede calcular teóricamente, se calcula de la siguiente expresión:

$$Ep = T(E)P \quad (8)$$

Donde:

$P$  = relación área del fotopico a área total, fracción de sucesos que ocurren en el fotopico en relación con los sucesos totales.

$P$  se calcula minimizando al mínimo la radiación dispersa y depende de la energía del fotón incidente. A mayores energías, mayor probabilidad de escape de los fotones que han sufrido efectos Compton. A su vez también depende del tamaño del detector, que se suele utilizar uno de INa de 3x3, pero no depende de la distancia relativa entre la fuente y el detector.

### 7.3. Determinación de actividades absolutas

La actividad absoluta de una muestra se define como el número de desintegraciones por segundo que sufre los átomos de la muestra. La unidad de medida que se utiliza es el becquerelio, y equivale a una desintegración por segundo. Para obtener la actividad de una muestra basta con dividir el número de fotones gamma emitidos con el número de fotones emitidos por desintegración.

$$\text{Actividad} = \frac{N_0}{\frac{\gamma}{d}} \quad (9)$$

Donde:

$N_0$  = Número de fotones gamma emitidos por la muestra

$\frac{\gamma}{d}$  = Número de fotones por desintegración, obtenibles gracias al espectro de desintegración de núclidos.

$N_0$  se puede conocer a través del espectro gamma. Heath y Lazar crearon dos tipos de correlaciones para conocer este valor.

La formula de Heath se refiere a un detector de centelleo de NaI de dimensiones conocidas:

$$N_0 = \frac{Np}{T(E)xAp} \quad (10)$$

Donde:

$N_0$  = Número de fotones emitidos por la muestra

$Np$  = Área del fotopico correspondiente a la energía de los fotones de la muestra

$A$  = Factor de correlación correspondiente a la utilización de un absorbente para frenar las partículas beta de la fuente. Se calculan experimentalmente.

$T(E)$  = Eficiencia del conjunto fuente-detector

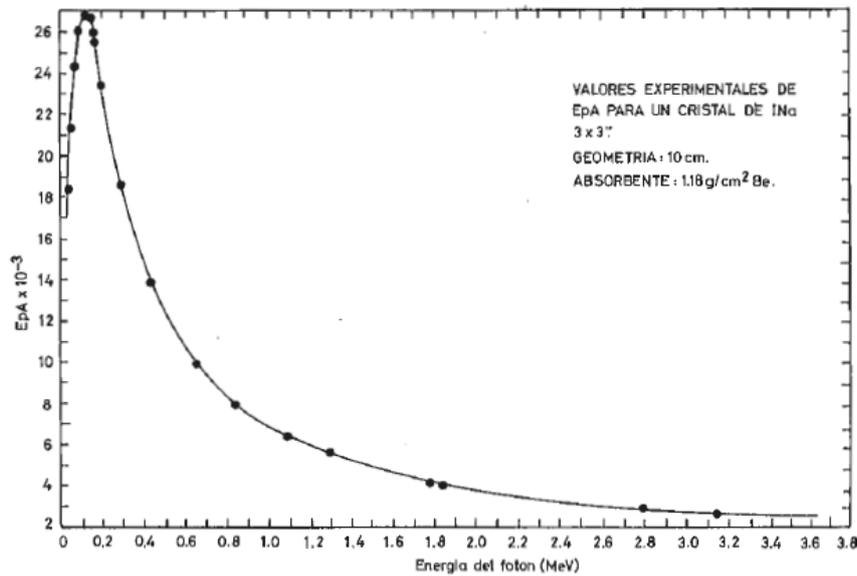
$P$  = Relación área del fotopico a área total del espectro

De igual forma se puede calcular el número de fotones emitidos a través de la eficiencia intrínseca del fotopico con la siguiente expresión:

$$N_0 = \frac{Np}{EpxA} \quad (11)$$

En la práctica se obtienen relaciones entre la energía de los fotones emitidos y

$E_{px}A$ , como en la siguiente gráfica:



**Figura 16:** Relación entre energía de fotones y  $E_{pA}$

La formulación desarrollada por Lazar sigue los mismos principios, pero con notación diferente. Se necesita conocer:

a) Probabilidad de que un fotón emitido alcance al detector. Esto viene dado por el ángulo sólido ( $\Omega$ ) de la configuración fuente-detector.

b) Probabilidad de que un fotón gamma deposite toda su energía en el detector y cause un impulso en la región del fotopico. A esto Lazar lo llamo eficiencia intrínseca del fotopico,  $\varepsilon(\gamma)$ , depende de la energía del fotón incidente. Lazar tabuló las eficiencias en función de su energía.

De acuerdo con esta notación, la expresión de Lazar se define como:

$$N_0 = \frac{N_p}{\omega x \varepsilon(\gamma) x A} \quad (12)$$

Notese que la expresión conduce al mismo resultado que la expresión de Heath para el cálculo del número de fotones emitidos.

## Parte III

# Utilización de un detector de centelleo para espectrometría

## 8. Descripción del detector de centelleo de NaI

Para la espectrometría que se va a relizar durante el desarrollo del estudio se va a utilizar un detector de centelleo de cristal de INa que se encuentra en el laboratorio de Tecnología Nuclear de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.

El detector consta de tres partes fundamentales: el cristal centelleador, la grasa óptica que sirve de acople entre el cristal y el tubo fotomultiplicador. Además, al detector se le suman una serie de instrumentación que permite que se pueda visualizar en la pantalla de un ordenador el espectro de radiación gamma de la muestra que se quiere estudiar. En primer lugar se va a realizar una explicación breve de las partes del detector y también de la instrumentación asociada.

### 8.1. Partes del detector

#### 8.1.1. NaI

Cristal inorgánico centelleador más usado para realizar el estudio del espectro de radiación gamma de una muestra. Tiene buenas características en cuanto a eficiencia y resolución para muestras con alta actividad. Uno de sus desventajas es que resulta ser un cristal higroscópico, lo que hace que necesite ambientes secos para su correcto funcionamiento.

#### 8.1.2. Grasa óptica

Sirve como acople entre el cristal de NaI y el tubo fotomultiplicador. Su función fundamental es redirigir los haces de fotones producidos por el cristal centelleador para que la entrada en el tubo fotomultiplicador sea lo más eficiente posible.

### 8.1.3. Tubo fotomultiplicador

Con objeto de recoger la pequeña cantidad de luz producida por la interacción de la radiación con el cristal de centelleo se utiliza un tubo fotomultiplicador.

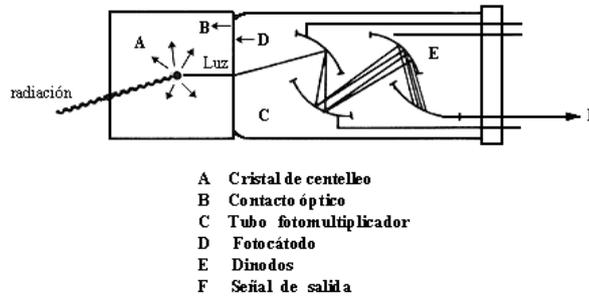


Figura 17: Tubo Fotomultiplicador

El funcionamiento básico del tubo fotomultiplicador es el siguiente: el material en contacto con el cristal de centelleo funciona como fotocátodo, convierte la luz recibida en electrones, estos electrones son acelerados y multiplicados con el objeto de que se pueda obtener una señal eléctrica lo suficientemente alta como para que pueda ser manejada por amplificadores posteriores.

## 8.2. Instrumentación asociada

### 8.2.1. Preamplificador

En el detector escogido se va a utilizar un preamplificador, que aumenta la tensión de la señal eléctrica recibida por el tubo fotomultiplicador para poder enviarla a la tarjeta analizadora multicanal o panel de análisis (según se utilice uno u otro) que se conectará al ordenador para poder analizar la señal eléctrica en señal analógica.

El preamplificador usado en el detector de centelleo es el Model 2007B [3], distribuido por CAMBERRA, que convertirá el pulso que le manda el tubo fotomultiplicador en una señal de voltaje positiva. La amplitud de pico de esta señal eléctrica positiva será proporcional a la señal recibida del fotomultiplicador.

Los preamplificadores necesitan ser alimentados por una fuente externa.



**Figura 18:** Model 2007B

Cabe destacar las dimensiones, siendo estas de 4.45 x 7.62 x 9.86 cm, por lo que podemos considerarlo de un tamaño pequeño en comparación con las dimensiones del blindaje necesario para el detector.

### **8.2.2. Tarjeta de análisis multicanal**

Con el objeto de analizar la señal eléctrica obtenida del preamplificador se instala en el ordenador una tarjeta analizadora. Esta tarjeta analizadora multicanal sirve para digitalizar la señal analógica y poder manejar una serie de parámetros que sirven para poder analizar un espectro de radiación gamma.

Los parámetros que podemos cambiar para conseguir distintos espectros son: el voltaje, el poder de amplificación y la ganancia. La tarjeta que está instalada es Model ASA-100 [4], distribuida por CANBERRA. Todos los parámetros se pueden manejar desde el software asociado, el Genie-2000. También será necesario de una fuente externa, que en este caso será alimentado desde el propio ordenador.

### **8.3. GENIE-2000**

El programa informático utilizado para visualizar, editar/modificar y poder conseguir del detector espectros de radiación gamma es el GENIE-2000 [5], creado por la empresa CANBERRA.

Con este programa se va a obtener todos los espectros necesarios para la realización del estudio teórico de espectros gamma en detectores de centelleo.

Hay varios apartados importantes a desarrollar con referencia a la utilización del programa. En la tarjeta analizadora multicanal asignan un canal a una de las energías establecidas por el usuario dentro del programa, a mayor número de canales disponibles, mayor número de energías de fotones emitidos por la muestra se podrá visualizar a la vez. Para poder asignar adecuadamente un canal a una energía determinada y que el espectro salga con el fotopico en la energía correspondiente a la energía del fotopico real del material de estudio, es necesario hacer una calibración en energías de la tarjeta analizadora.

Del mismo modo en que se realiza una calibración en energías del espectro, será necesario realizar una calibración en eficiencias, que nos permitirá calcular la cantidad de un elemento existente dentro de la muestra que se esta analizando.

Al ser estos dos apartados indispensables para realizar una buena práctica de espectrometría gamma, se ha dedicado un apartado de trabajo donde se expondrá las partes más importantes de la resolución del mismo.

## **9. Calibración de espectros gamma**

### **9.1. Calibración en energías**

El objetivo de la calibración en energías de un detector de radiación gamma es la localización correcta de los fotopicos asociandoles la energía correcta segun en qué canal de la tarjeta multicanal se detecte su energía.

Para poder realizar la calibración se utiliza el software GENIE-2000. Será necesario alimentar el fotomultiplicador y el preamplificador desde la pantalla gracias a los parámetros que se maneja a traves de la tarjeta analizadora multicanal.

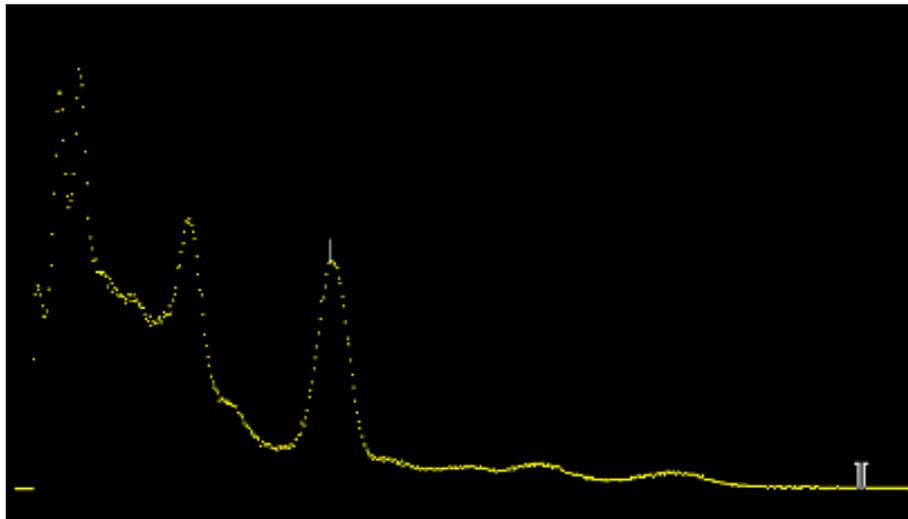
Para poder realizar correctamente la calibración, sera necesario crear una curva de calibración, un polinomio que relaciona los canales con la energía. Para ello se utilizará una muestra con una mezcla de elementos conocidos y con energía del fotopico conocida. Al ser una mezcla, se obtendra varios fotopicos, lo que nos permitirá asociar varios puntos con energía-canal y, así, conseguir una curva característica de calibración lo más precisa posible.

Por lo que la calibración se ha realizado con una muestra cedida por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y contiene una serie de isótopos radiactivos como son el Cesio o el Americio entre otros.

El primer paso para realizar la calibración es la configuración de la tarjeta multicanal. Tal y como se ha explicado en el apartado anterior, las medidas del espectro de la muestra va a depender de los parámetros que tiene el voltaje, amplitud y ganancia de la tarjeta multicanal por lo que el resto de medidas que se realicen con el detector que se quiera utilizar la calibración obtenida se tendran que realizar con los mismos parametros.

Para ello, configuramos los parámetros seleccionando el detector en el programa GENIE-2000 y ajustandolos.

A continuación es necesario realizar una medida del espectro en un tiempo relativamente largo para tener un espectro lo suficiente significativo para poder relacionarlo con los datos de la muestra. Se realiza la medida a 3000 segundos y el espectro obtenido es el siguiente:



**Figura 19:** Espectro obtenido a partir de la muestra para la calibración

Existe una función dentro de GENIE-2000 que te permite localizar los fotopicos a partir del espectro obtenido, así podremos relacionar los fotopicos obtenidos con los fotopicos que se han obtenido de la muestra ya calibrada.

---

**Detector Name:** DET01  
**Sample Title:** Sample title.  
**Peak Locate Performed on:** 5/4/2017 13:02:45  
**Peak Locate From Channel:** 1  
**Peak Locate To Channel:** 1024  
**Peak Search Sensitivity:** 3.00

Peak No.	Centroid Channel	Centroid Uncertainty	Energy (keV)	Peak Significance
1	14.38	0.0632	16.92	68.65
2	27.03	0.0617	39.06	57.73
3	40.16	0.0633	62.04	54.42
4	106.34	0.0353	177.91	79.75
5	135.54	0.2161	229.03	4.66
6	193.43	0.0280	330.38	88.17
7	274.21	0.1032	471.81	7.80
8	318.90	0.0505	550.04	20.25
9	401.69	0.0440	694.98	23.56
10	598.06	0.1245	1038.78	3.07
11	712.20	0.0672	1238.61	7.74

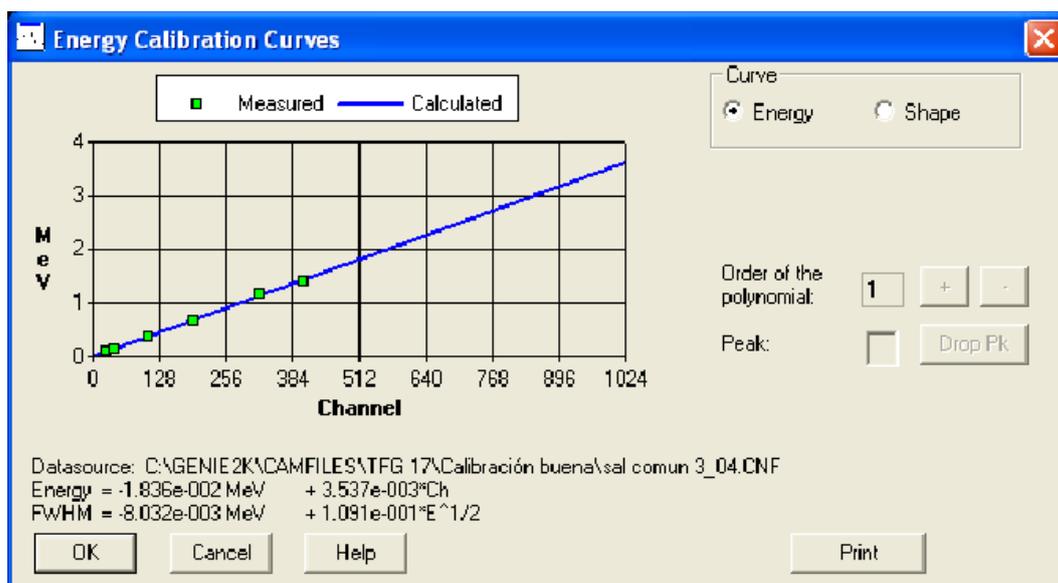
? = Adjacent peak noted

**Figura 20:** Fotopicos obtenidos según el espectro

A continuación, gracias a la significancia de los picos, se podrá deducir perfectamente que picos corresponden a que energía de la muestra. Los datos de la energía de los fotopicos se han sacado de la tabla adjunta a la muestra cedida.

Por el propio uso del detector de centelleo, se han sumado dos picos dos veces formandose por la tanto dos picos dobles. Para calcular la energía exacta que se ha de seleccionar para la recta de calibración se realiza la media ponderada en función de la vida media y la energía del fotopico de los dos elementos.

En conclusión, se establecen 6 puntos característicos correspondientes a 6 elementos que forman la muestra. Con estos 6 elementos tenemos 6 energías de fotopico, que se asignaran a 6 canales en función de la significancia obtenida en la localización de fotopicos por el GENIE-200. Se introducirán a mano los parámetros en GENIE-2000 relacionando energía-canal para así obtener un polinomio de grado 1 y su recta asociada. Como conclusión se establece la recta de calibración en energías:



**Figura 21:** Recta de calibración en energías

Observando la figura se puede observar que la recta pasa muy bien por el cero y los 6 puntos se ajustan muy bien a la recta por lo que podemos considerar como buena la calibración

La ecuación de la recta obtenida es la siguiente:

$$Energy(keV) = -18.36keV + 3.537xChannel \quad (13)$$

Como conclusión, se utilizará esta calibración en el resto de medidas que se querrán analizar.

## 9.2. Calibración en eficiencia

Para poder calcular correctamente la actividad de la muestra es necesario calibrar correctamente el detector en eficiencia. Para ello se va a utilizar la misma muestra que se ha utilizado para la calibración en energías.

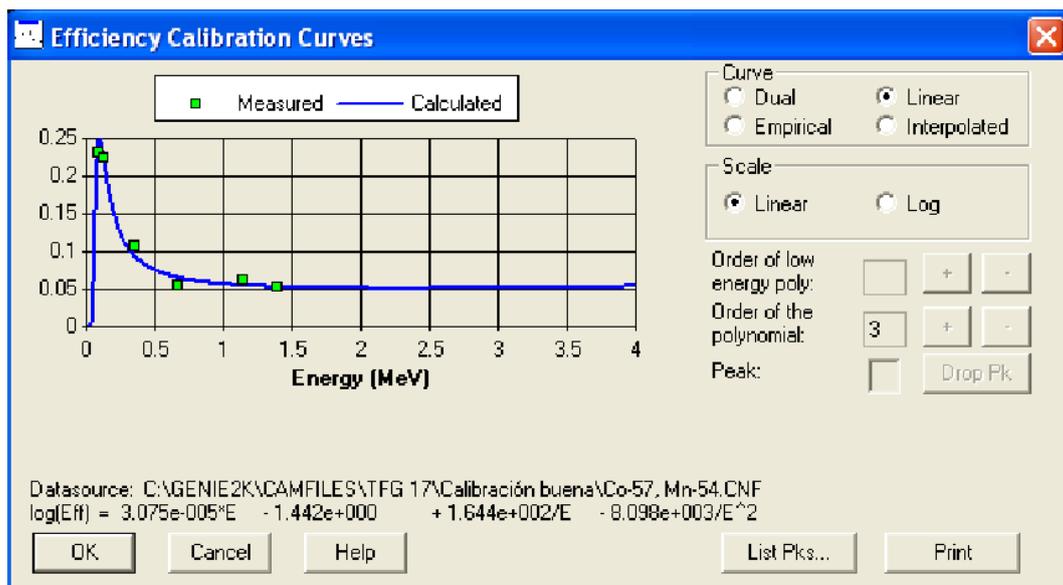
La calibración en eficiencia nos permitirá calcular la actividad que tienen los radionucleidos de la muestra en el momento de la medida. Para poder calibrar correctamente el detector se deben de tener en cuenta la relación de gammas/segundo que emite la muestra en el momento que se realiza la medida, por lo que hay que

corregirlo dependiendo del periodo de semidesintegración y la actividad inicial.

Estos gammas/segundo que, teóricamente, se van a emitir durante la medida se relacionan con el área bajo los fotopicos que se observan en el espectro. El área bajo los fotopicos se relaciona con la actividad de la muestra que es detectada por el cristal centelleador.

Tras calcular la cantidad da gammas/segundo que emiten los productos, se puede calcular automáticamente el área bajo los fotopicos que se muestra en el espectro obtenido. Para ello se usa una función automática del programa GENIE-2000 que saca el área bajo los fotopicos.

A continuación se relaciona los gammas/segundo que deberían emitir los productos estudiados con los gammas/segundo recogidos por el detector. Con esta relación se consigue la eficiencia en una serie de puntos, los mismos puntos tomados anteriormente. Con la eficiencia y la energía del fotopico es posible conseguir una curva de eficiencia del detector.



**Figura 22:** Curva de calibración de la eficiencia del detector

Tras observar la curva obtenida, se pueden sacar varias conclusiones. La primera conclusión es la diferencia de eficiencias que existe para distintas energías de los fotones emitidos. Para fotones de bajas energías, la eficiencia del detector es alta mientras que, para energías mayores, se recogen menos fotones dentro del detector.

Esto hace que los detectores de centelleo sean muy útiles para calcular la cantidad de elementos en una muestra que produzcan fotones de baja energía.

Otra conclusión útil que se puede extraer es la forma de la curva de calibración. Al contrario con el polinomio de grado uno para la recta de calibración en energías, esta curva de calibración se define por un polinomio de grado dos ya que necesita de mayor precisión en su definición para poder calcular actividades de muestras que se quieran estudiar.

## 10. Experiencia práctica con un detector de centelleo

Tras conseguir la recta de calibración en energías y la curva de calibración en eficiencias, se va a realizar una experiencia práctica para comprobar la fiabilidad de las mismas y observar un uso real de un detector de radiación gamma.

Como ejemplo de medida en un detector de centelleo, se va a estudiar la diferencia que hay entre la sal común y la sal yodada que son vendidas en establecimientos comerciales.

Para poder estudiar esta diferencia, hay que conseguir radionucleidos en ambas sales para que produzcan radiación gamma y puedan ser detectados por el detector. Los radionucleidos que se van a obtener tras un bombardeo con neutrones van a ser los siguientes: Cl-38, Na-24 y I-128.

Para el Cl-38, el periodo de semidesintegración es 37.2 minutos y emite gammas de 2.16 MeV y 1.64 MeV.

Para el Na-24, el periodo de semidesintegración es de 15 horas y emite gammas de 1.37 MeV y 2.75 MeV.

En la sal yodada además aparecerá I-128, cuyo periodo de semidesintegración es de 25 minutos y emite gammas de 0.443 MeV y 0.526 MeV.

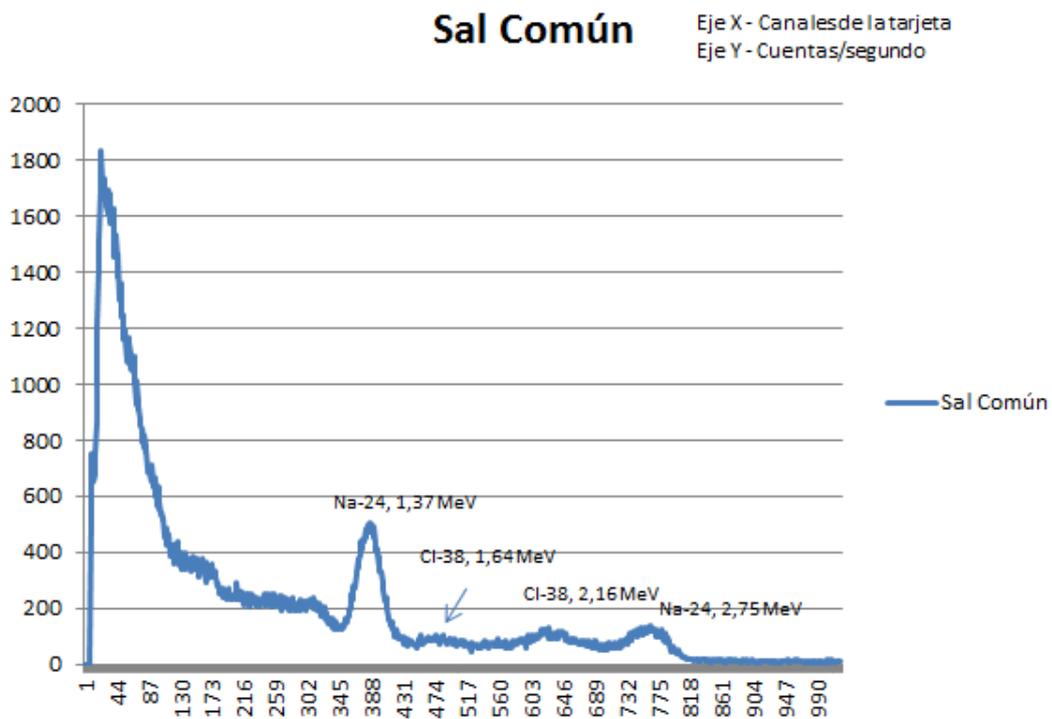
Los radionucleidos activados se van a obtener gracias a un bombardeo de neutrones con el tiempo suficiente para alcanzar la actividad de saturación, que es aquella actividad que se obtiene después de 5 periodos.

Al tener un radionucleido con 15 horas de periodo como radionucleido de mayor periodo, se va a tomar este como periodo para alcanzar la actividad de saturación. Luego el tiempo necesario va a ser alrededor de 90 horas para alcanzar la actividad de saturación.

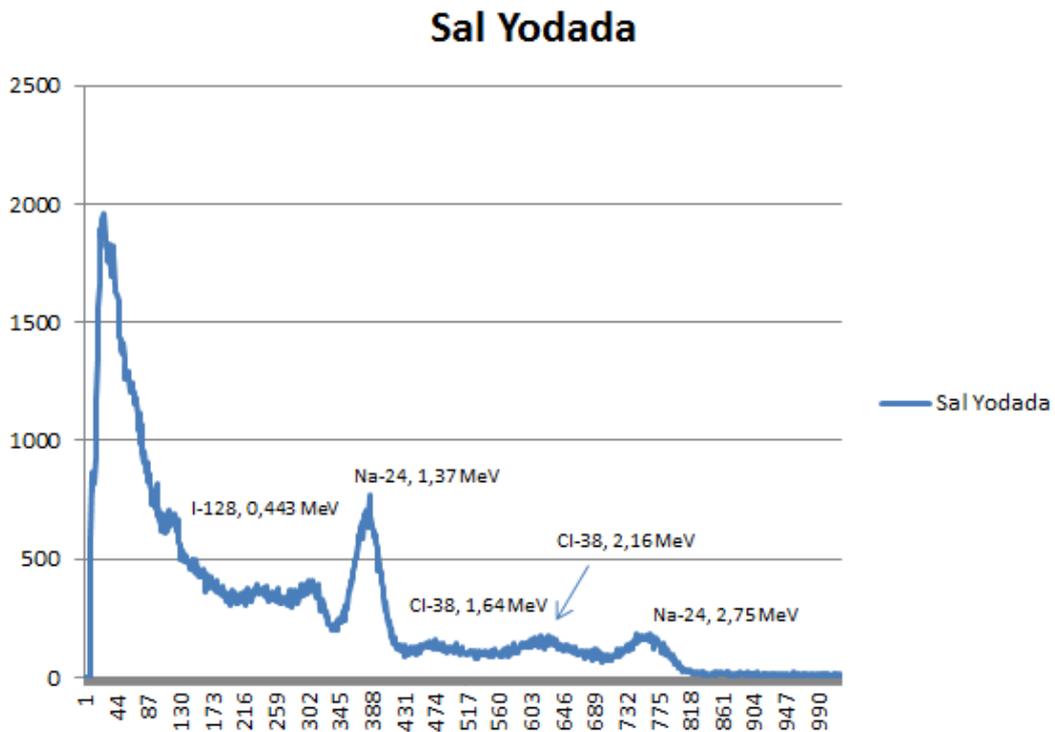
Tras obtener las dos muestras irradiadas y activadas, se va a proceder a la obtención de los espectros de radiación gamma. Se va a utilizar las calibraciones realizadas con anterioridad para la obtención de los fotopicos y el área bajo ellos de forma correcta.

Es importante comentar que las condiciones en las que se realiza la medida en cuanto a ganancia, amplitud y voltaje deben ser las mismas en las que se ha realizado la calibración, al igual que la geometría de la medida. Estos parámetros se pueden ajustar desde el GENIE-2000 mediante la tarjeta multicanal, tal y como se ha explicado con anterioridad.

A continuación se presentan los dos espectros:



**Figura 23:** Espectro de radiación gamma de la sal común



**Figura 24:** Espectro de radiación gamma de la sal yodada

A simple vista se puede observar la principal diferencia entre los dos espectros: el fotopico que existe en el espectro de la sal yodada. Este fotopico corresponde al yodo que ha sido activado durante el proceso de bombardeo de neutrones de la sal yodada.

Para poder observar mejor esta diferencia se va a localizar los fotopicos de ambos espectros.

```

Detector Name:  DET01
Sample Title.   Sample Title.
Peak Locate Performed on:  5/4/2017   19:14:33
Peak Locate From Channel:   1
Peak Locate To Channel:    1024
Peak Search Sensitivity.    3.00

```

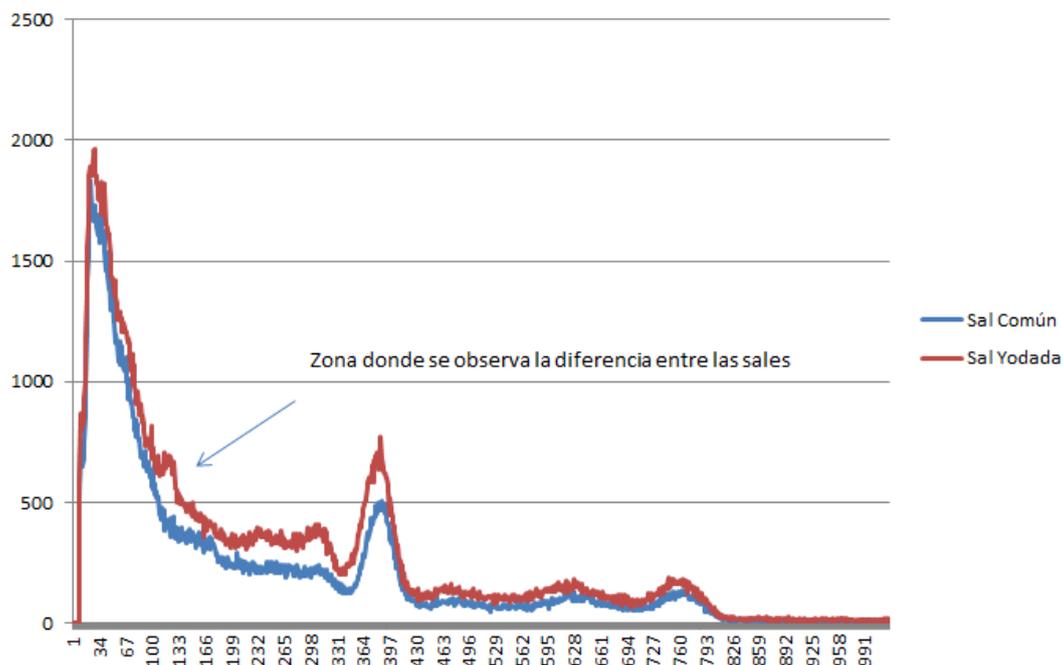
Peak No.	Centroid Channel	Centroid Uncertainty	Energy (keV)	Peak Significance
1	29.25	0.0630	81.54	27.25
2	172.19	0.1260	590.63	4.94
3	311.55	0.0775	1083.47	8.86
4	388.20	0.0268	1354.57	52.05
5	462.70	0.0821	1688.78	5.84
6	630.89	0.0472	2212.91	11.96
7	766.15	0.0304	2691.25	28.09

**Figura 25:** Fotopicos correspondientes al espectro de la sal comun

Peak No.	Centroid Channel	Centroid Uncertainty	Energy (keV)	Peak Significance
1	26.35	0.0674	74.82	25.64
2	43.12	0.1725	134.15	4.64
3	72.13	0.2047	236.75	3.05
4	124.77	0.0983	422.90	9.82
5	240.06	0.1056	830.65	4.94
6	309.24	0.0543	1075.32	17.80
7	386.10	0.0256	1347.16	55.74
8	476.66	0.0786	1667.43	7.53
9	623.79	0.0453	2187.77	12.04
10	764.33	0.0281	2684.81	32.12

**Figura 26:** Fotopicos correspondientes al espectro de la sal yodada

Y, además, se puede observar gráficamente la diferencia entre gráficas en la siguiente imagen:



**Figura 27:** Diferencia de espectros en el detector de centelleo

Tras comparar la localización de ambos fotopicos se puede observar que existen una serie de fotopicos intermedios entre los dos fotopicos de mayor significancia en la sal yodada que no existen en el mismo intervalo en la sal común. Estos fotopicos corresponden cuantitativamente al fotopico que se observa físicamente en los espectros.

Se puede concluir que la sal yodada contiene un porcentaje de yodo en su interior y, gracias a la detección de radiación gamma ha sido posible visualizar ese porcentaje.

## Parte IV

# Utilización de un detector de germanio para espectrometría

Con objeto de estudiar el detector de germanio, se va a realizar la misma experiencia práctica que se ha realizado con el detector de centelleo.

Se va a describir brevemente las partes y el funcionamiento del detector, se va a realizar el espectro de las mismas muestras que las realizadas en el detector de centelleo y, por último, se van a explicar las características principales de este detector comparando ambos espectros.

## 11. Estudio de la detección de radiación gamma por semiconductores

En los detectores de semiconductor se producen las tres interacciones descritas anteriormente que se producen entre fotones y la materia. En el caso de materiales semiconductores, la energía de ionización que deposita el foton en el semiconductor sirve para crear un par electron-hueco. Hay una energía mínima necesaria para producir este par de electrón-hueco, dependiendo a su vez de la temperatura a la que está el semiconductor.

Para el Ge(detector de semiconductor tradicional) a 80K se necesita una energía mínima de 2.95 eV, lo que hace que estos detectores sean superiores a los detectores de centelleo en cuanto a resolución en energía.

La creación de par electrón-hueco forma un circuito eléctrico equivalente que permite enviar una señal eléctrica al software y reconozca la señal como la detección de una partícula gamma y, al ser el potencial equivalente a la energía depositada por el fotón, puede cuantificar la energía de las partículas gamma que se han recogido.

Es posible observar la principal diferencia entre los dos detectores a la hora de producir la señal eléctrica. Los detectores de centelleo necesitan de un fotomultiplicador

para pasar la señal luminosa a señal eléctrica, mientras que en los detectores de semiconductor se realiza la conversión directamente en el semiconductor.

## **12. Descripción del detector de semiconductor de germanio**

El detector de germanio usado para esta experiencia práctica es el existente en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid. Este detector es usado para realizar estudios sobre muestras medioambientales tales como aire, tierra, agua o alimentos. Se usa este tipo de detector por su alta eficiencia o, lo que es lo mismo, su alta capacidad de captura de fotones.

La descripción de un detector de germanio se va a realizar, por tanto, sobre este detector utilizado.

Existen partes comunes entre los dos tipos de detectores, que son la tarjeta multicanal y el software de visualización en el ordenador. Sin embargo, por las características propias del detector se van a necesitar de una serie de elementos que no van a estar presentes en el detector de centelleo.

El primer elemento auxiliar usado en un detector de germanio es la refrigeración. Al ser un detector de semiconductor, se van a necesitar altos voltajes negativos para poder poner en funcionamiento el semiconductor y que sea capaz de captar fotones. En el detector de germanio usado en la experiencia práctica se va a utilizar nitrógeno líquido que va a refrigerar el circuito electrónico que maneja los altos voltajes negativos.

El segundo elemento auxiliar usado es el blindaje. En todos los tipos de detectores se usa algún blindaje que no permita a la radiación exterior penetrar en el detector y que falsee la muestra, pero en los detectores de germanio, al ser muy importante la eficiencia, se utiliza un mayor grosor de blindaje y con elementos químicos de alto número atómico como son el hierro o el plomo.

Estos dos elementos auxiliares se pueden visualizar en la siguiente foto.



**Figura 28:** Blindaje y refrigeración del detector de germanio

La refrigeración se sitúa en la bombona en la parte inferior del detector.

Es importante apuntar que las muestras del detector, al ser de distintas naturalezas y en distintos estados, se usan varios tipos de envases para poder contener las muestras. Para las muestras medioambientales gaseosas se usan contenedores de carbón activo que recogen los gases presentes en la atmósfera. Para las muestras líquidas se usan unos contenedores de tipo Marinelli que envuelven mejor al líquido alrededor del semiconductor. Para las muestras sólidas se pueden usar contenedores normales o, para mejorar la eficiencia por factores geométricos, se pueden calcinar y usar el Marinelli con las cenizas.

El último elemento auxiliar es el panel multicanal. En lugar de usar una tarjeta

multicanal adosada al ordenador, se usa un panel multicanal para controlar los mismos parámetros que con la tarjeta.



**Figura 29:** Panel multicanal del detector de germanio

El software y la calibración es la misma que en el detector de centelleo.

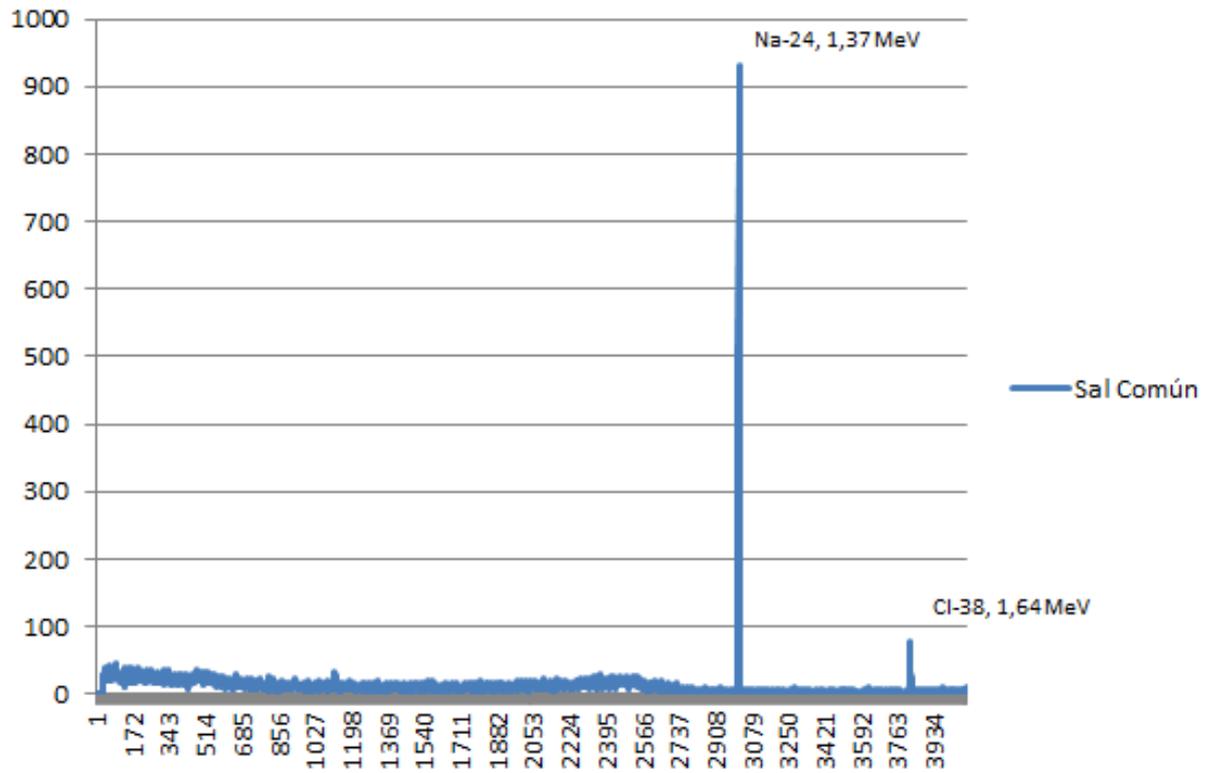
### 13. Experiencia práctica con un detector de germanio

A continuación se va a realizar el espectro de las dos muestras de sal común y sal yodada. Es importante resaltar que, al ser la vida media de los productos activados de una media hora, los espectros solo se podrán comprobar cualitativamente ya que los gammas/segundo no se van a parecer con las gammas/segundo obtenidas en el espectro de centelleo.

El contenedor de la sal es el mismo utilizado para el detector de centelleo.

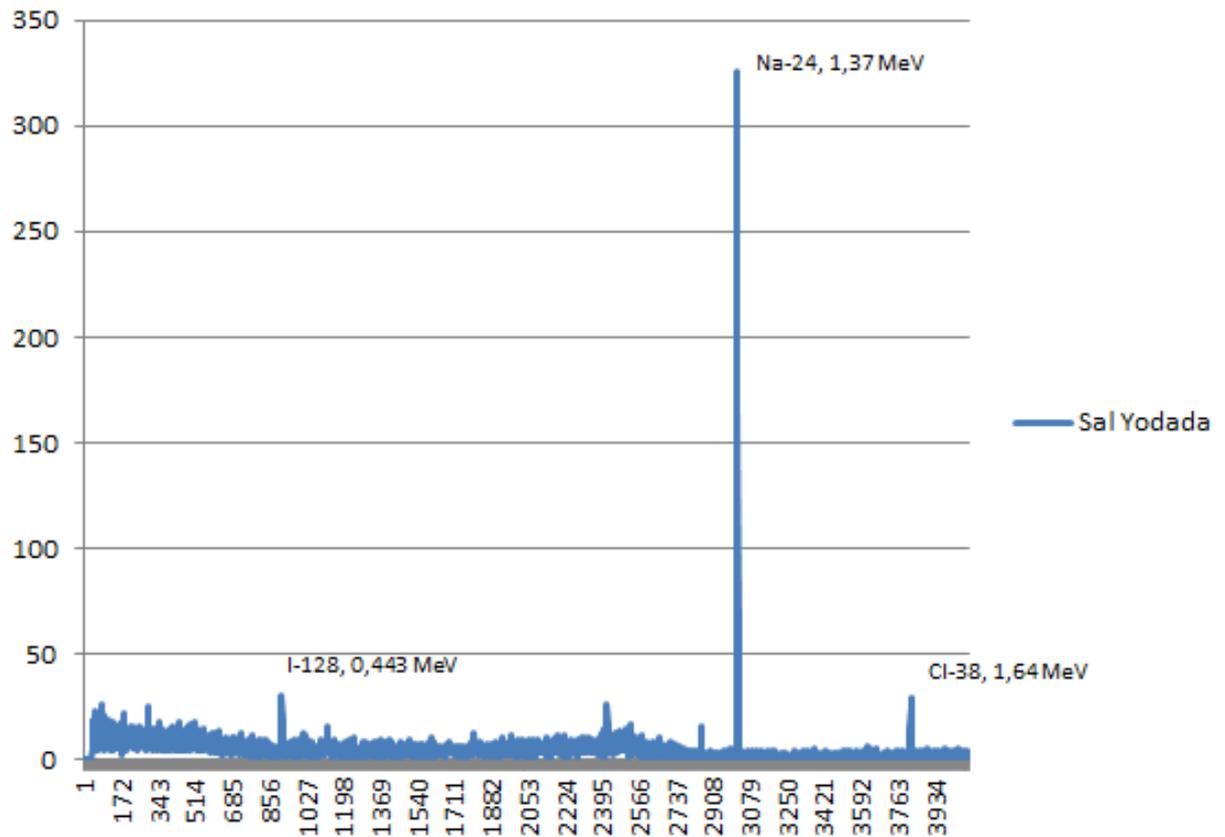
Los espectros son (los ejes X e Y son iguales que en el espectro del detector de centelleo):

## Sal Común



**Figura 30:** Espectro de la sal común en el detector de germanio

## Sal Yodada



**Figura 31:** Espectro de la sal yodada en el detector de germanio

En el detector de germanio es muy difícil distinguir los fotopicos a simple vista, pero esos fotopicos son muy parecidos a las gaussianas que deberían ser teóricamente. Para poder distinguir los fotopicos se puede calcular gracias al GENIE-2000.

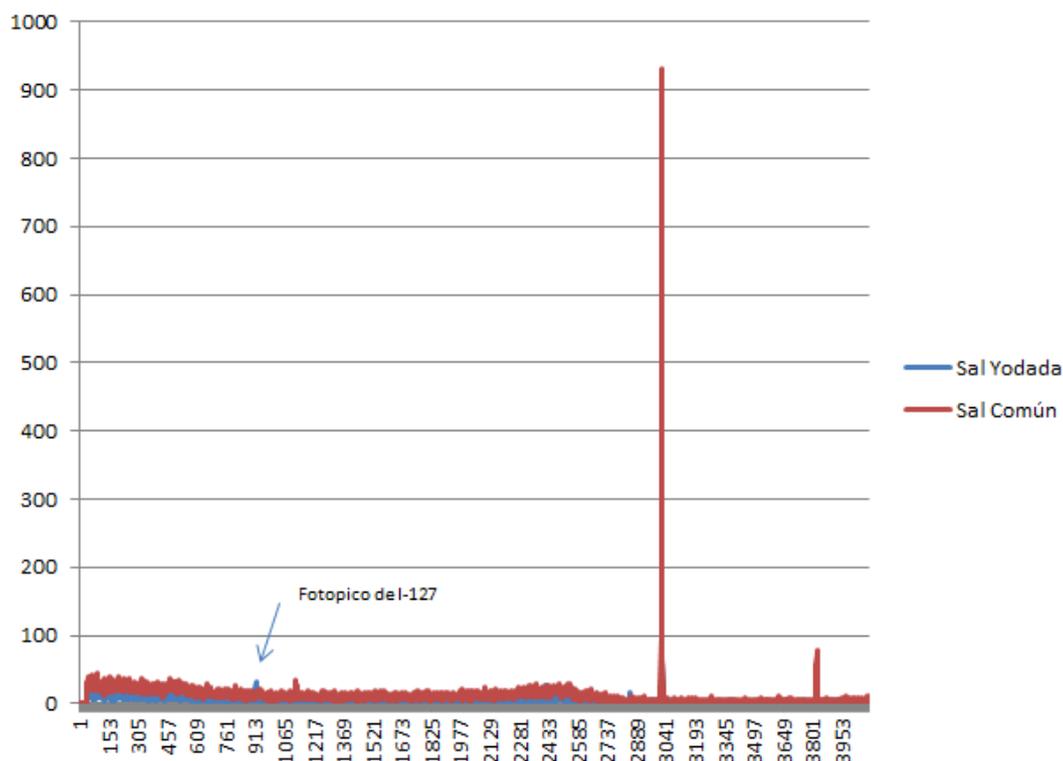
Peak No.	Centroid Channel	Centroid Uncertainty	Energy (keV)	Peak Significance
1	100.83	0.4308	46.69	3.12
2	2374.36	0.3423	1081.71	3.06
3	3023.97	0.0906	1377.44	36.98
4	3536.16	0.3581	1610.62	3.07
5	3827.62	0.1720	1743.30	9.50

Figura 32: Fotopicos de la sal comun en el detector de germanio

Peak No.	Centroid Channel	Centroid Uncertainty	Energy (keV)	Peak Significance
1	784.80	0.4179	358.06	3.06
2	919.98	0.2975	419.61	4.95
3	2423.51	0.2885	1104.08	4.24
4	2858.58	0.2808	1302.15	3.65
5	3024.76	0.1170	1377.80	22.14
6	3828.75	0.2144	1743.82	5.45

Figura 33: Fotopicos de la sal yodada en el detector de germanio

Además, graficamente, se puede disntiguir el fotopico del I-127



**Figura 34:** Diferencia de espectros en el detector de germanio

Al igual que en el detector de centelleo, es fácil poder distinguir la sal común de la sal yodada, ya que ambas tienen el pico de mayor significancia a la misma energía sin embargo para la sal yodada existen varios picos intermedios correspondientes al yodo presente en la sal yodada.

## 14. Comparación entre detector de centelleo y detector de germanio

Tras haber realizado la misma experiencia práctica en ambos detectores se pueden sacar una serie de conclusiones de ambos detectores.

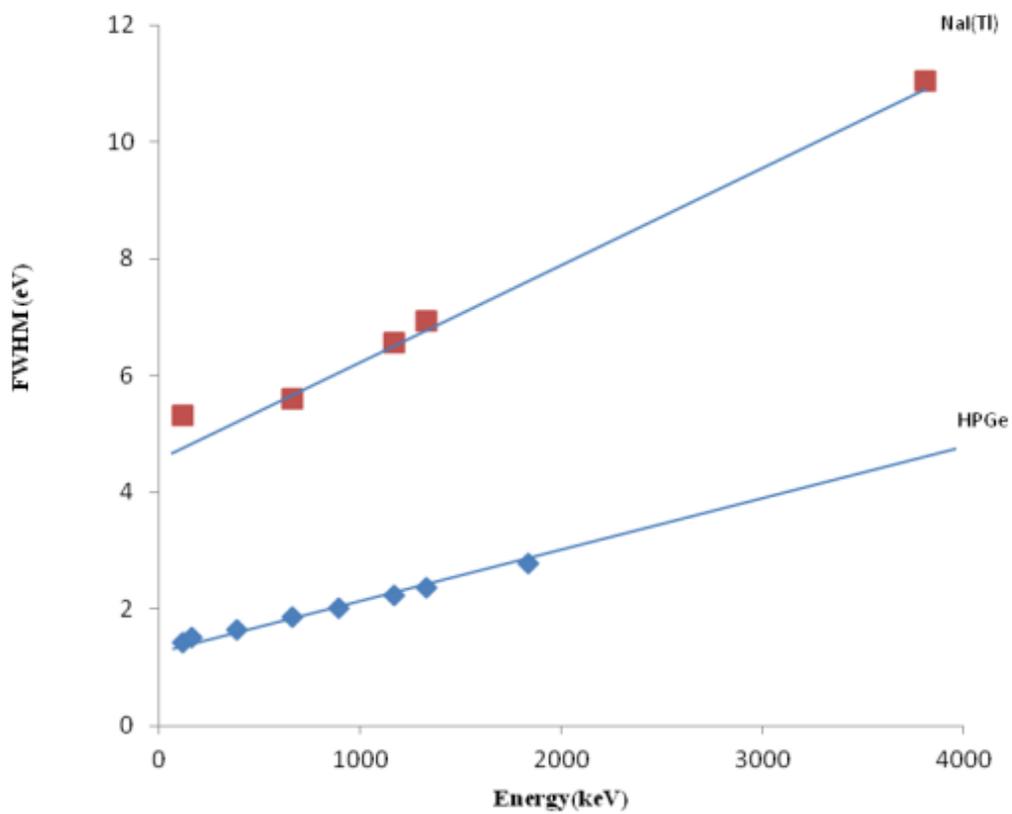
En primer lugar, con referencia a la estructura y componentes, se necesitan más componentes y elementos auxiliares para el detector de germanio. Al ser este un detector que se usa para muestras ambientales o para muestras de baja actividad se necesita un alto espesor de blindaje para aislarlo de la radiación de fondo que pueda

contaminar la medida y, también, refrigeración externa para el circuito electrónico del detector. El detector de centelleo usa un castillete de hormigón como blindaje contra la radiación externa.

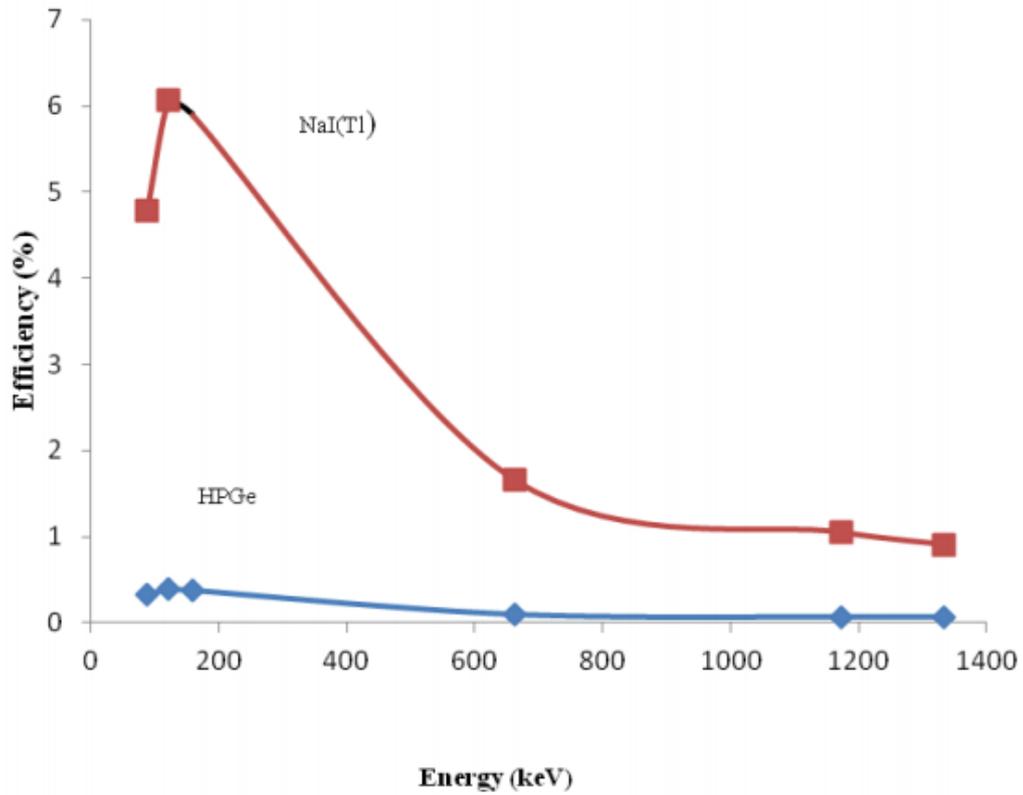
En segundo lugar, el software usado es el mismo para ambos detectores, el GENIE-2000.

En tercer lugar, el uso que se le puede dar a cada detector. Tras ver la diferencia que existe entre los distintos detectores se puede discutir el distinto uso que se le puede dar a los dos detectores.

En las siguientes gráficas [16] se obtiene la comparación entre ambos detectores en cuanto a su resolución en energías y su eficiencia:



**Figura 35:** Diferencia entre resoluciones en función de la energía



**Figura 36:** Diferencia entre eficiencia en función ed la energí

En cuanto a la resolución, que se refiere a la posibilidad de distinguir dos fotopicos muy juntos en energías, se mide en FWHM (full width half maxium). En la gráfica se observa una mejor resolución en los detectores de Ge ya que es capaz de identificar dos fotopicos con menor diferencia de energías entre ellas.

En cuanto a la eficiencia, la cantidad de radiación gamma que el detector es capaz de medir entre la cantidad de radiación gamma total que emite la muestra, el detector de NaI es mucho más eficiente a bajas energías que el detector de Ge.

## Parte V

# Estudio de detectores de centelleo

En esta parte del proyecto, se pretende estudiar nuevos cristales de centelleo que puedan resultar una mejora con respecto a los detectores de centelleo tradicionales, ya estudiados. El trabajo se va a centrar en el estudio del cristal CLYC.

## 15. CLYC

$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$  , CLYC [6] [7] [8] [9] [10] [11], Es uno de los nuevos detectores de centelleo desarrollados en los últimos 15 años. Fue descubierto en 1999 en la Universidad Tecnológica de Delft en Holanda. En 2003, la empresa RMB se encargó de su desarrollo comercial, estableciendo que el detector es un buen detector de radiación gamma (con 4 por ciento de resolución para el fotopico del Cs-127) a la vez que podía funcionar como detector de neutrones. Recientemente, la Universidad Tecnológica de Bubble, Canada, ha descubierto que CLYC puede funcionar también como detector de neutrones rápidos, aumentando así las posibilidades de uso de este detector.

### 15.1. Desarrollo de CLYC

CLYC surgió con la necesidad de encontrar detectores de neutrones alternativos al He-3, ya que este existen en poca cantidad en la Tierra y existe la urgente necesidad de ser reemplazado. Con esta intención, la colaboración entre la Universidad de Delft y la Universidad de Bern hizo que surgiese este detector.

Los primeros estudios establecieron una resolución del 7 por ciento para 662 KeV, los siguientes estudios establecieron que el detector mostraba luminiscencia nucleo-valencia (CVL) entre 220nm y 300 nm. Esto hizo que se demostrase la posibilidad de detectar radiación gamma y neutrones a la vez al existir discriminación entre los pulsos de ambos fenómenos.

También, a la vez que los estudios de las universidades, la empresa creó en 2003 cristales de CLYC de 1x1 cm con malos resultados en cuanto a resolución al

resultar estos higroscopicos. Pero, en 2007, se presentaron nuevos cristales CLYC que mejoraban considerablemente la resolución a 662 KeV ( 5 por ciento) al tener una buena curva de proporcionalidad, incluso mejor que detectores de centelleo tradicionales, estableciendose así como un detector dual de buenas prestaciones.

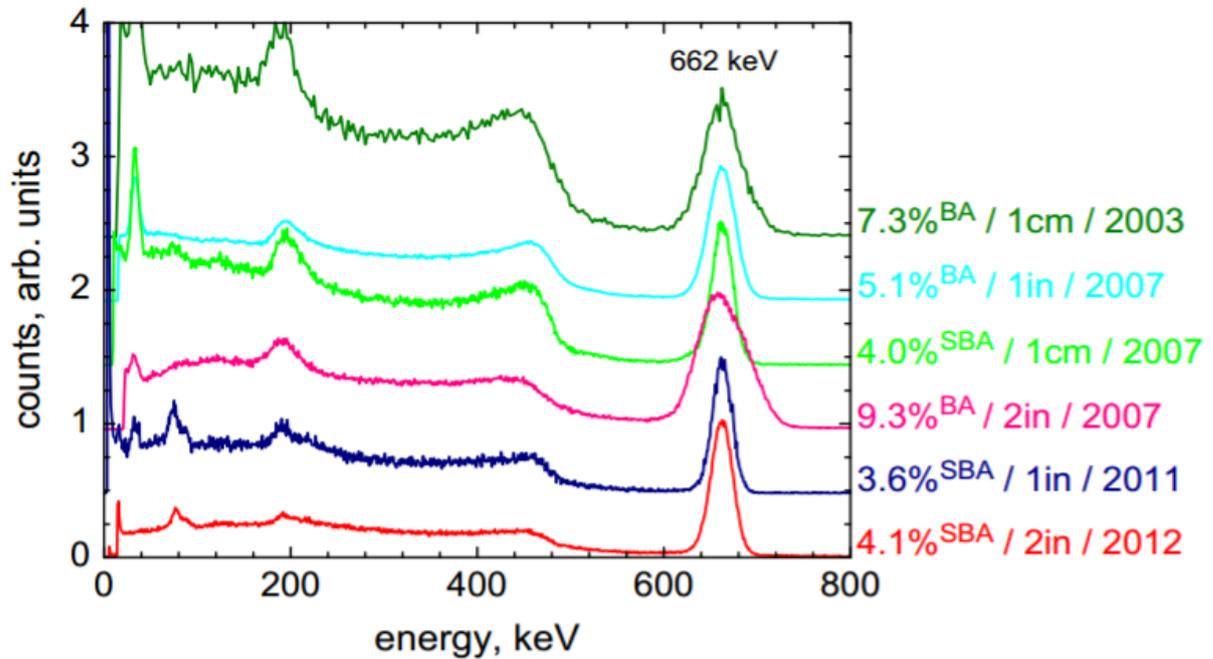


Figura 37: Mejora de resolución de CLYC

## 15.2. Creación y evaluación del cristal

Los cristales se fabrican en la empresa RMB con el método vertical Bridgman. Mezclas estequiométricas de CsCl, LiCl, YCl<sub>3</sub> y CeCl<sub>3</sub> se juntan en una ampolla de cuarzo. Se añade como dopante el Ce y una cantidad muy alta de Li-6 (cerca del 95 por ciento). A continuación se purifica el cristal en una serie de pasos, mejorados con los años, con el objeto de eliminar los posibles haluros de oxígeno formados.

El cristal, al ser higroscopico, se corta en una atmósfera de oxígeno con refrigeración de aceite. La técnica de corte también ha mejorado con los años.

La evaluación de CLYC se realiza en el laboratorio de centelleo de RMB. se comprueba parámetros del cristal como el espectro de radioluminiscencia, su espectro energético y el tiempo de decaimiento con el fin de asegurar sus buenas

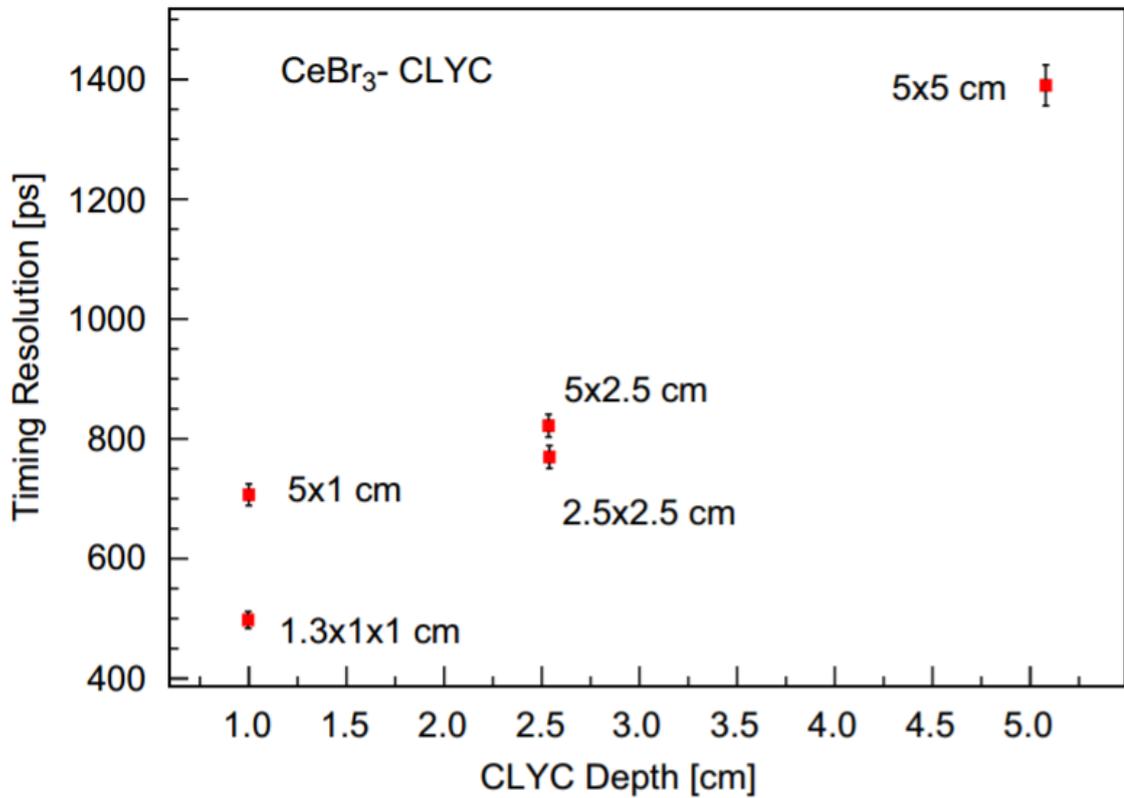
propiedades.

### 15.3. Detección de radiación gamma

El principal objeto de este apartado es analizar la detección de radiación gamma de CLYC. Tal y como se ha explicado anteriormente, se descubrió que CLYC, pese a haber sido desarrollado como detector de neutrones, tiene una muy buena curva de proporcionalidad (mejor incluso que los detectores tradicionales), lo que le permite tener un 4 por ciento de resolución a 662 KeV.

CLYC tiene diversos métodos para centellear al recoger un fotón gamma en su interior. El dopante  $Ce_{+3}$  contribuye especialmente al centelleo, siendo su concentración uno de los parámetros del cristal. Además de la captura de radiación gamma por parte del Ce, existen otros métodos como CVL o la captura de fotones por creación de huecos  $V_{k-}$  entre dos aniones.

Uno de los parámetros importantes en la detección de radiación gamma es el tiempo de respuestas del detector. Se ha estudiado el tiempo de respuesta en función del tamaño del detector y se ha comparado con el tiempo de respuesta de un detector de 2.5x2.5 cm de  $Ce_3Br$ , que posee un tiempo de respuesta de entre 100-200 ps. Se ha realizado una gráfica comparando el tiempo de respuesta con la profundidad del cristal.



**Figura 38:** Gráfica tiempo de respuesta-profundidad del cristal CLYC

Se observa que para detectores de menos de 5x5 cm tenemos tiempos de respuesta de sub-nanosegundos, lo que hace un muy buen tiempo de respuesta, pero siguen siendo altos comparado con el detector de  $Ce_3Br$ . Es importante reseñar que para aplicaciones donde se utilice el detector para detectar radiación gamma y neutrones, el tiempo que rige la detección es el tiempo de respuesta de la detección de neutrones.

Otro parámetro importante del que depende las medidas de la radiación gamma es la temperatura. Al igual que los detectores de centelleo tradicionales, las medidas que se realizan dependen de la temperatura ambiental ya que cambia las condiciones en el que los fenómenos de captura de radiación gamma en el cristal.

Especialmente importante es la variación de las condiciones de  $V_{k-}$  con la temperatura. Se observa en el siguiente gráfico.

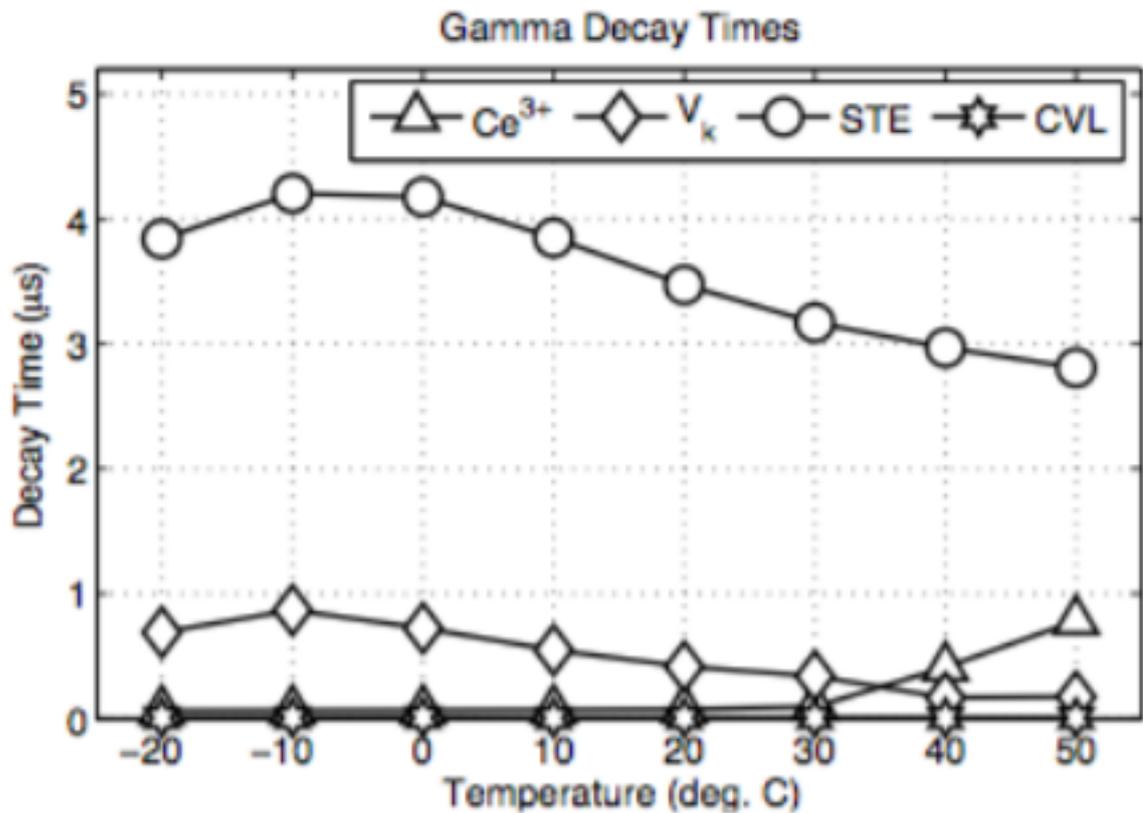
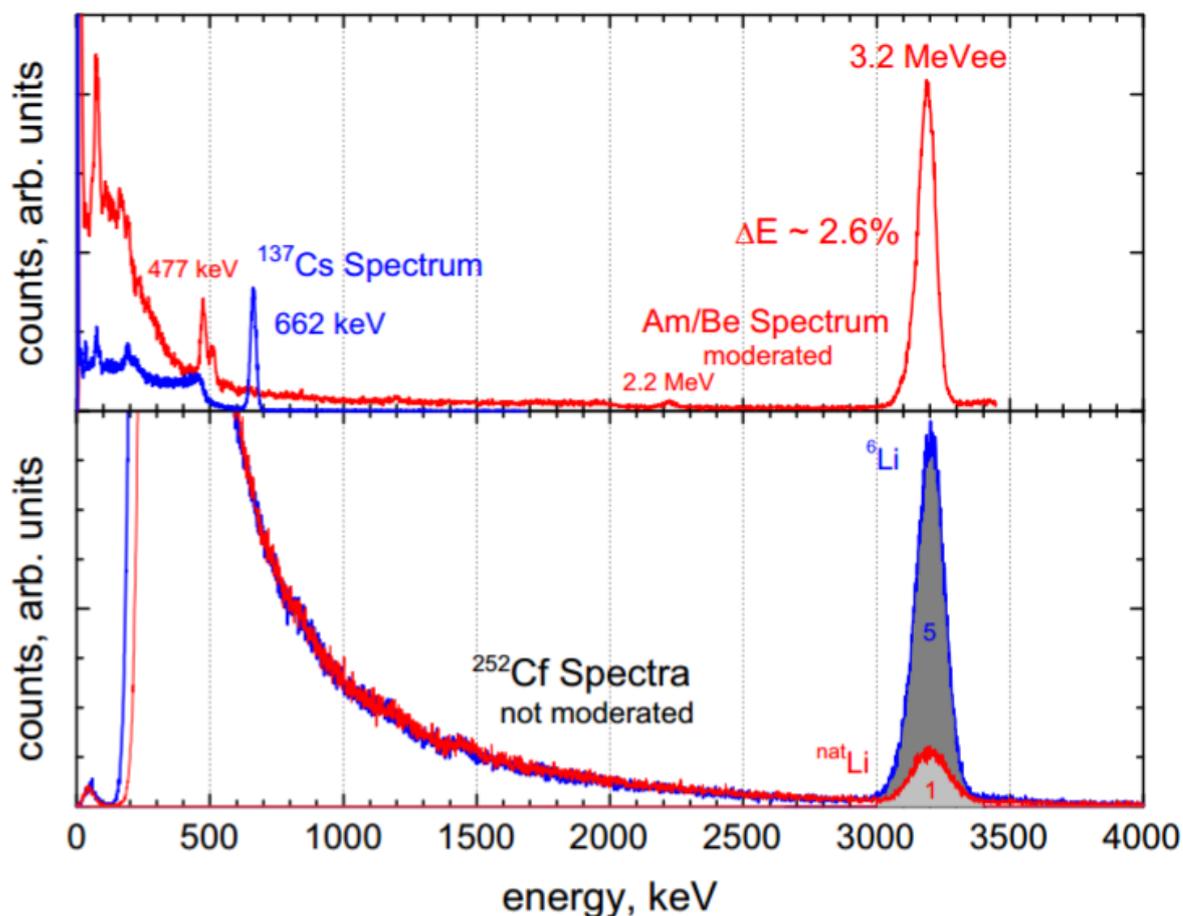


Figura 39: Dependencia del tiempo de decaimiento con la temperatura

#### 15.4. Detección de neutrones térmicos

El principal fin del estudio inicial de CLYC era su uso como detector de neutrones. Esta detección se realiza gracias al Li-6. Este reacciona en presencia de un neutrón creando un protón y un tritón, con una energía de 3.2-3.5 MeV que se deposita en su totalidad dentro del cristal. A esta energía se le conoce como equivalente a energía gamma (GEE) que, al ser un valor alto, asegura la discriminación entre la detección de radiación gamma y neutrones.

La detección de neutrones depende del enriquecimiento del Li-6 a cristales del mismo tamaño. Se ha comprobado mediante el espectro de Cf que el enriquecimiento de Li-6 mejora considerablemente el número de cuentas a igualdad de tamaños.



**Figura 40:** Estudio de neutrones térmicos para CLYC

Se ha caracterizado la resolución y el grosor adecuado de medio moderador para la detección de neutrones por parte del  $\text{Li-6}$ . Para ello se ha utilizado una fuente de  $\text{Cf-252}$  a una distancia de 46 cm del detector de  $2 \times 2 \text{ cm}$  de CLYC. Durante una hora y media se han interpuesto grosores de polietileno delante del detector y se cuantifican los neutrones depositados en el detector dependiendo del grosor del moderador de polietileno usado. El grosor adecuada para interponer en el detector es de 7.6 cm. Se han obtenido resultados parecidos simulando el experimento.

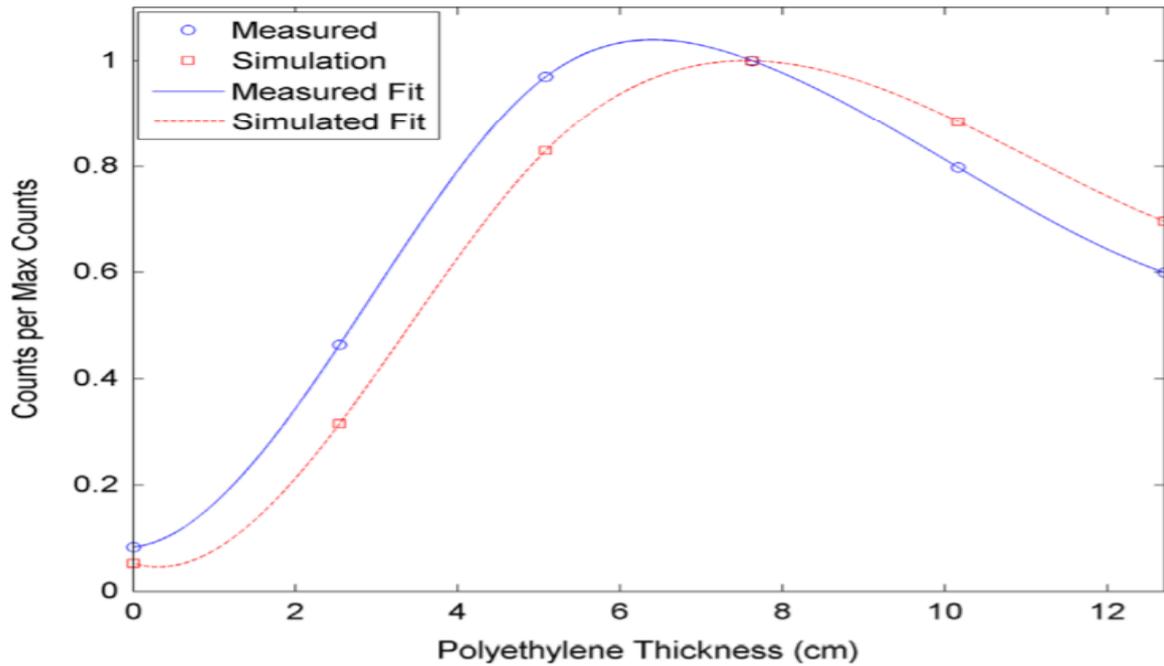
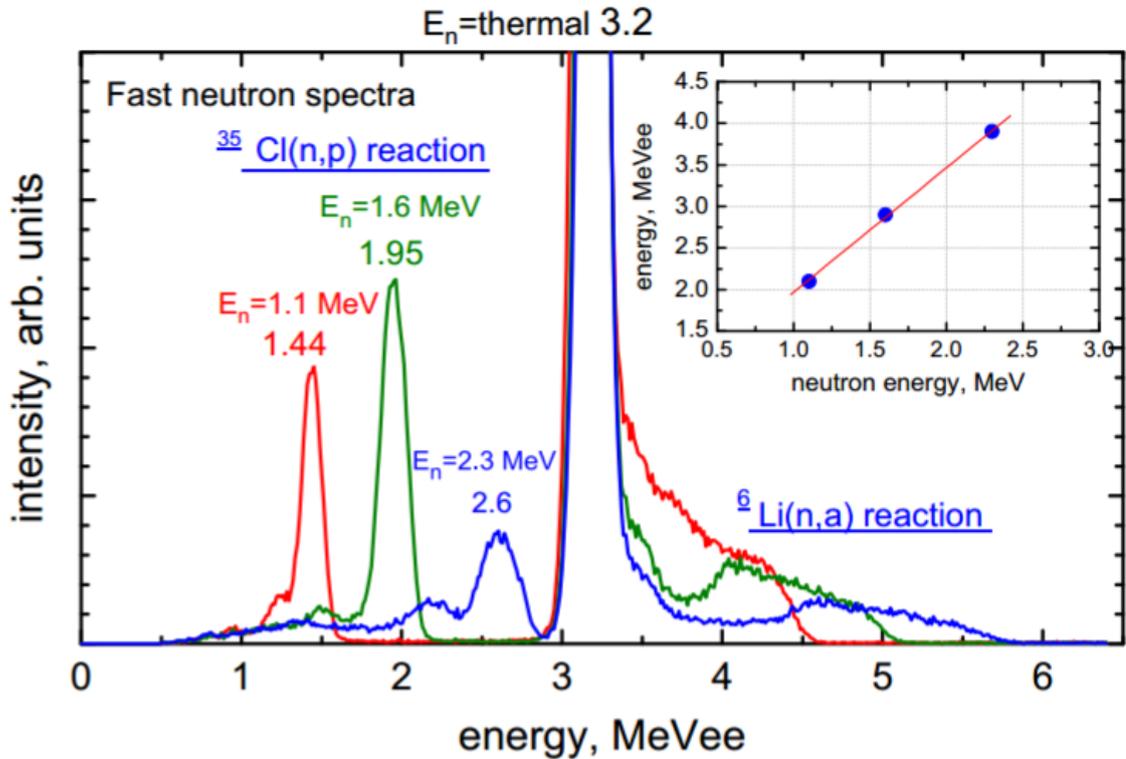


Figura 41: Grosor de moderador adecuado para CLYC

### 15.5. Detección de neutrones rápidos

Recientemente, se ha descubierto que se puede aprovechar la reacción  $\text{Cl}_3(n,p)$  para detectar neutrones rápidos. Esta reacción proporciona picos energéticos que son proporcionales a la energía de los neutrones rápidos capturados. Además, se ha comprobado que los iones del  $\text{Li-6}$  también son capaces de capturar neutrones rápidos y depositar la energía en el cristal con la posibilidad de detectarlos. Es importante explicar que el tamaño del cristal es crucial para esta reacción. Al aumentar su tamaño, se mejora la eficiencia de detección por lo que es crucial poder desarrollar cristales cada vez más grandes.

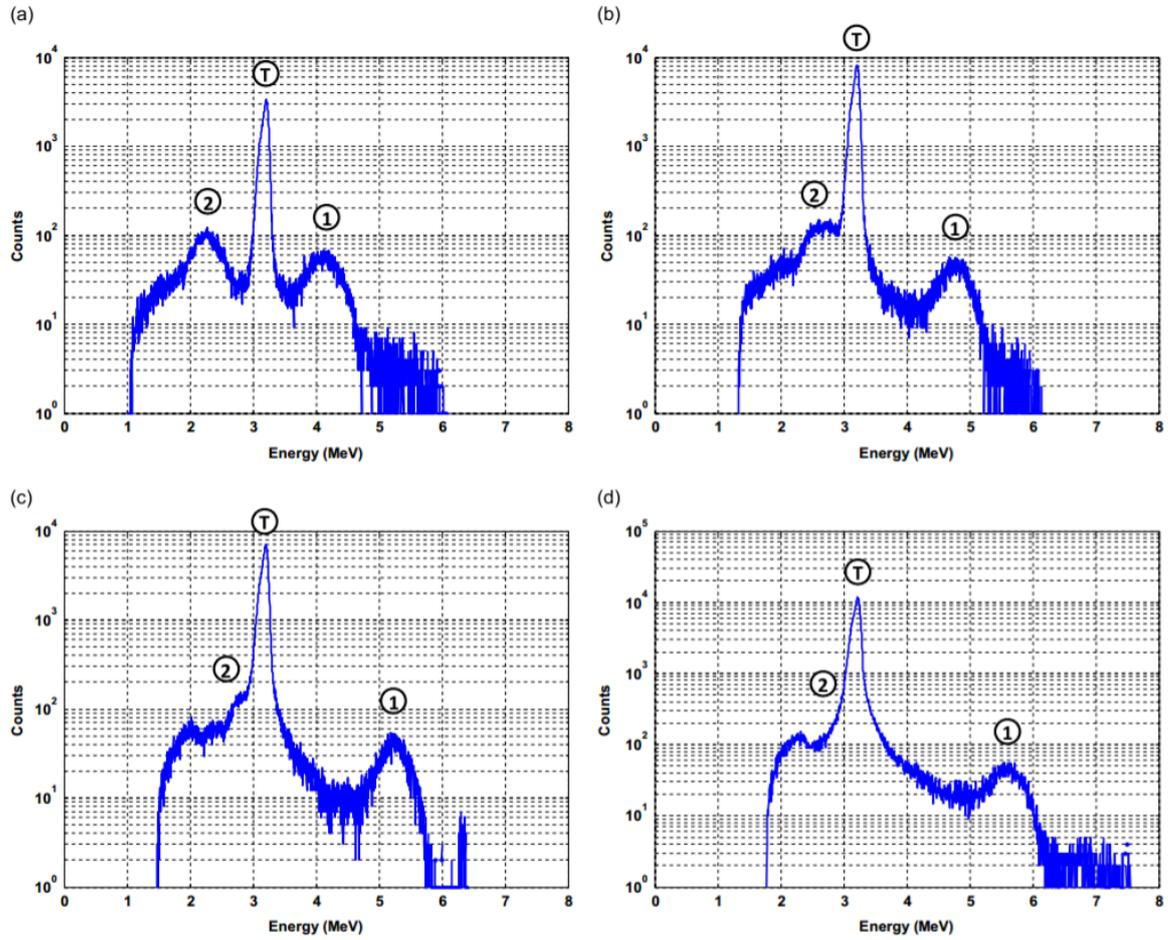
En la siguiente gráfica se muestra los picos formados por la captura de neutrones de energía conocida y, además, los picos que se forman al capturar neutrones rápidos por iones de  $\text{Li-6}$ . Por último se observa el fotopico de neutrones termalizados detectados por el  $\text{Li-6}$ .



**Figura 42:** Estudio de neutrones rápidos para CLYC

Es importante estudiar la eficiencia de captura de neutrones rápidos y que energías son las más eficientes de capturar por el detector. Para ello se estudian distintos tamaños y distintas concentraciones de Li-6 en un acelerador Van de Graaf. La sección de captura de neutrones rápidos coincide mayormente con la sección de captura del Cl-35 que forma el cristal.

Se toma un cristal CLYC de 1x1 cm con Li-6 natural sin enriquecer y se realizan cuatro experiencias irradiando el cristal con 4 fuentes neutrónicas de distintas energías. En los 4 gráficos observamos el detección de neutrones termalizados con la letra T, la detección de neutrones rápidos por captura del Cl-35 con un 1 y la detección de neutrones rápidos por los iones del Li-6 con un 2



**Figura 43:** Gráficas de detección de neutrones rápidos en función de la energía

Es importante comparar la eficiencia de detección de neutrones rápidos en función de la energía del flujo neutrónico. Tal y como es esperable teóricamente, la eficiencia de detección disminuye al aumentar la energía del flujo neutrónico.

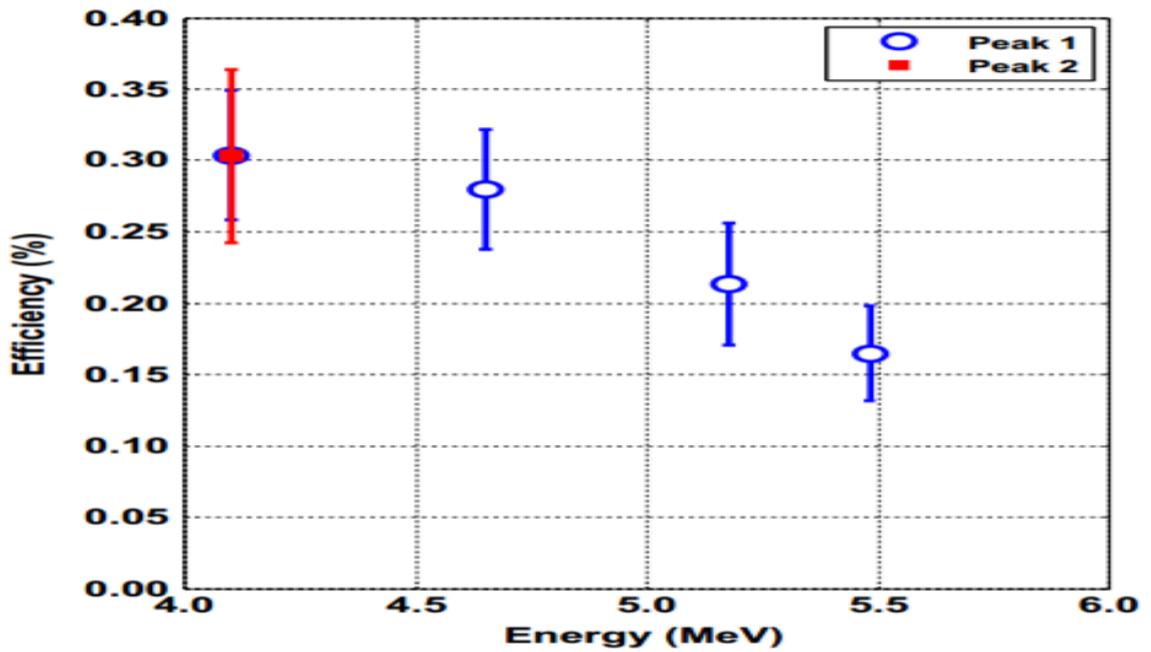
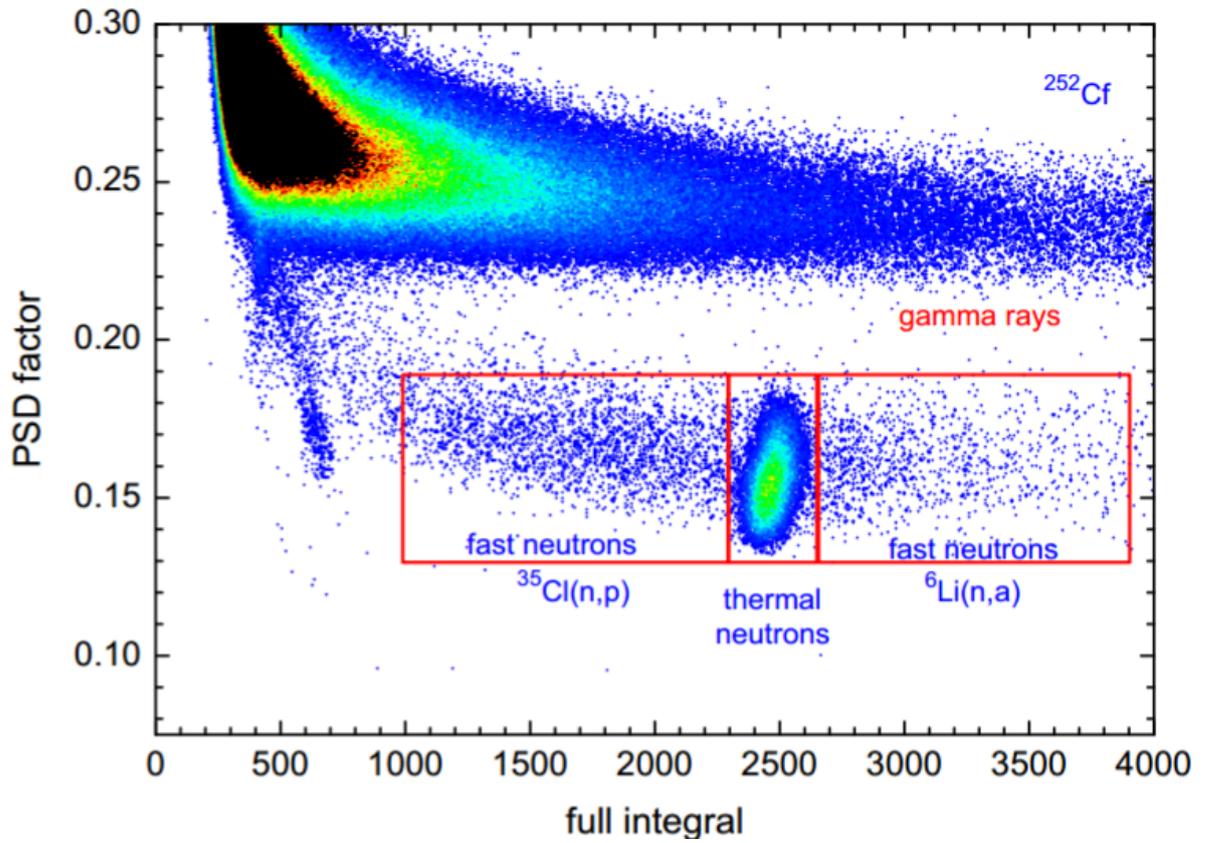


Figura 44: Dependencia de la eficiencia con la energía del flujo neutrónico

### 15.6. Discriminación por tamaño del pulso

Una de las principales ventajas que tiene CLYC sobre el resto de detectores de neutrones y de radiación gamma es la posibilidad de discriminar la procedencia de los pulsos detectados por el cristal. Esto se puede hacer gracias a que el CVL de CLYC aparece bajo excitación de radiación gamma con un tiempo de decaimiento de sub-nanosegundos. Esto hace que se puedan distinguir con facilidad la procedencia de los pulsos. En la siguiente gráfica se muestra el espectro de Cf-252 donde se podrá observar con claridad la procedencia de los pulsos.

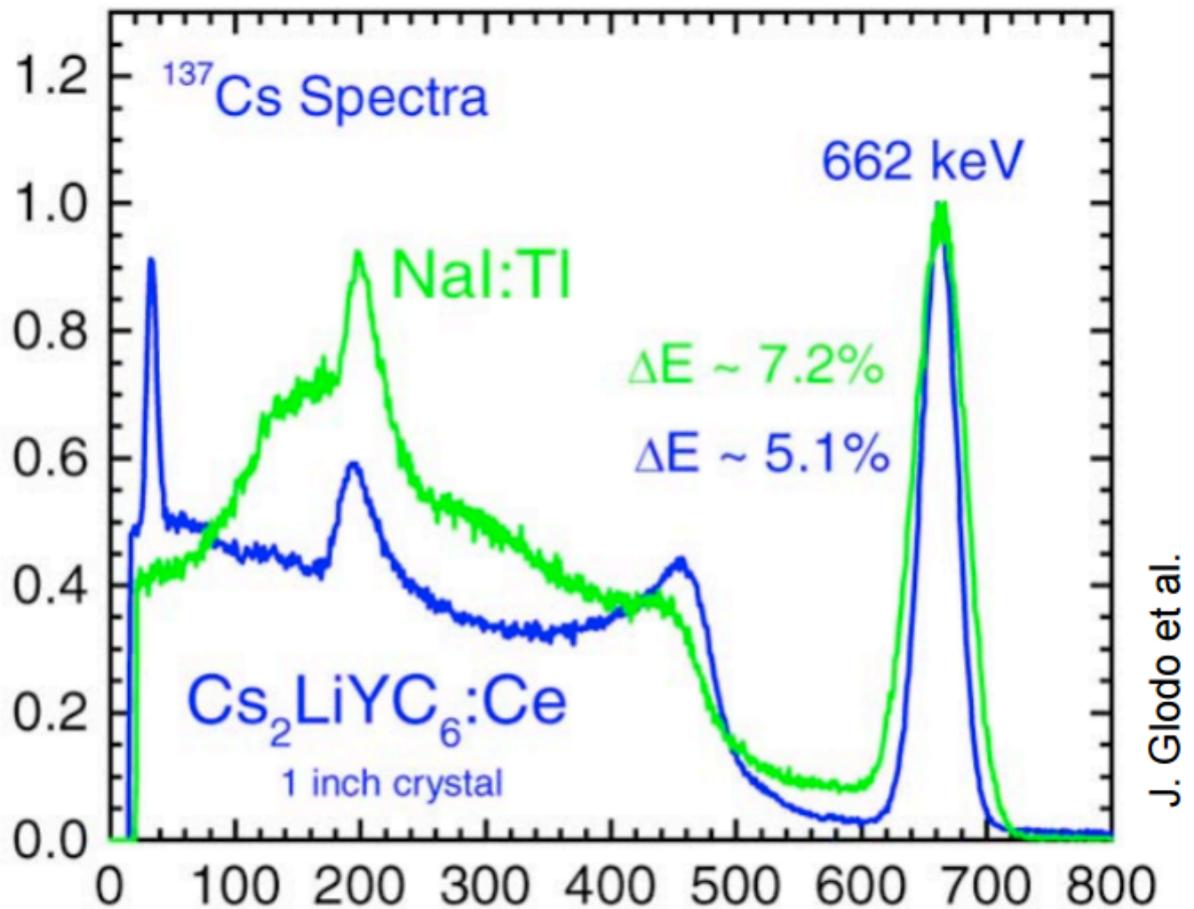


**Figura 45:** Discriminación por tamaño del pulso en el espectro de Cf-252

### 15.7. Comparación con detectores de centelleo tradicionales

Tras haber estudiado todas las características principales del cristal CLYC es necesario comparar la detección de radiación gamma con la detección de radiación gamma del detector NaI, al ser este el detector de centelleo más usado.

Anteriormente se explicó que, al tener una muy buena curva de proporcionalidad, el detector CLYC es mejor detector de radiación gamma que los detectores de centelleo tradicionales al tener un 4 por ciento de resolución para 662 KeV, también se puede comprobar con la siguiente gráfica la diferencia de espectros entre el NaI y el CLYC para el Cs-127.



**Figura 46:** Comparación entre NaI y CLYC

Tal y como se observa, los fenómenos Compton son menores en el CLYC, por lo que se puede deducir que más fotones dejan toda su energía dentro del cristal. Esto hace que el cristal recoja con mayor exactitud las cuentas por segundo que los detectores tradicionales.

Se puede concluir que el cristal CLYC, un nuevo cristal centelleador, reúne muchas buenas cualidades tales como la mejora de detección de radiación gamma, detección de neutrones termalizados y detección de neutrones rápidos. Esto le hace ser una clara mejora con respecto a los detectores de centelleo anteriores.

## Parte VI

# Estudio de detectores de semiconductor

En este apartado del trabajo se va a estudiar nuevos detectores de semiconductor existentes, más concretamente se va a centrar en CZT.

Además, al ser una condición intrínseca a los detectores de semiconductor tradicionales, se va a estudiar los nuevos métodos de refrigeración eléctrica que se pueden utilizar como son los criostatos.

## 16. Criostatos

Un criostato es un aparato que se utiliza para mantener a temperaturas muy bajas dispositivos que necesiten estarlo. Se basa en diversos ciclos de compresión y expansión sobre un fluido criogénico que, normalmente, es helio gas o nitrógeno gas. La principal particularidad de estos aparatos es que funcionan con electricidad y no necesitan renovar el fluido criogénico con el uso, al tener un ciclo cerrado de compresión-expansión con trampa para el retorno al ciclo del fluido criogénico si escapa de él.

Este nuevo método de refrigeración es importante que sea reseñado, ya que uno de los principales inconvenientes de los detectores de semiconductor basados en el germanio necesita de un refrigerante que actúe sobre él para que sus propiedades semiconductoras se mantengan intactas durante la operación de medida.

Los criostatos no necesitarían renovar el fluido refrigerante, no como los tanques de nitrógeno líquido que, tradicionalmente, se utilizan para el uso de los detectores de germanio.

Además, a pesar de necesitar corriente eléctrica para su funcionamiento, pueden ser manejados en trabajo de campo y ser transportados con facilidad.

Se utiliza, tradicionalmente, helio como fluido criostático por sus altas prestaciones, llegan a refrigerar hasta a 2k tal y como se muestra en la siguiente gráfica. Dependiendo de las condiciones ambientales la energía y el número de ciclos para

alcanzar temperaturas muy bajas variará.

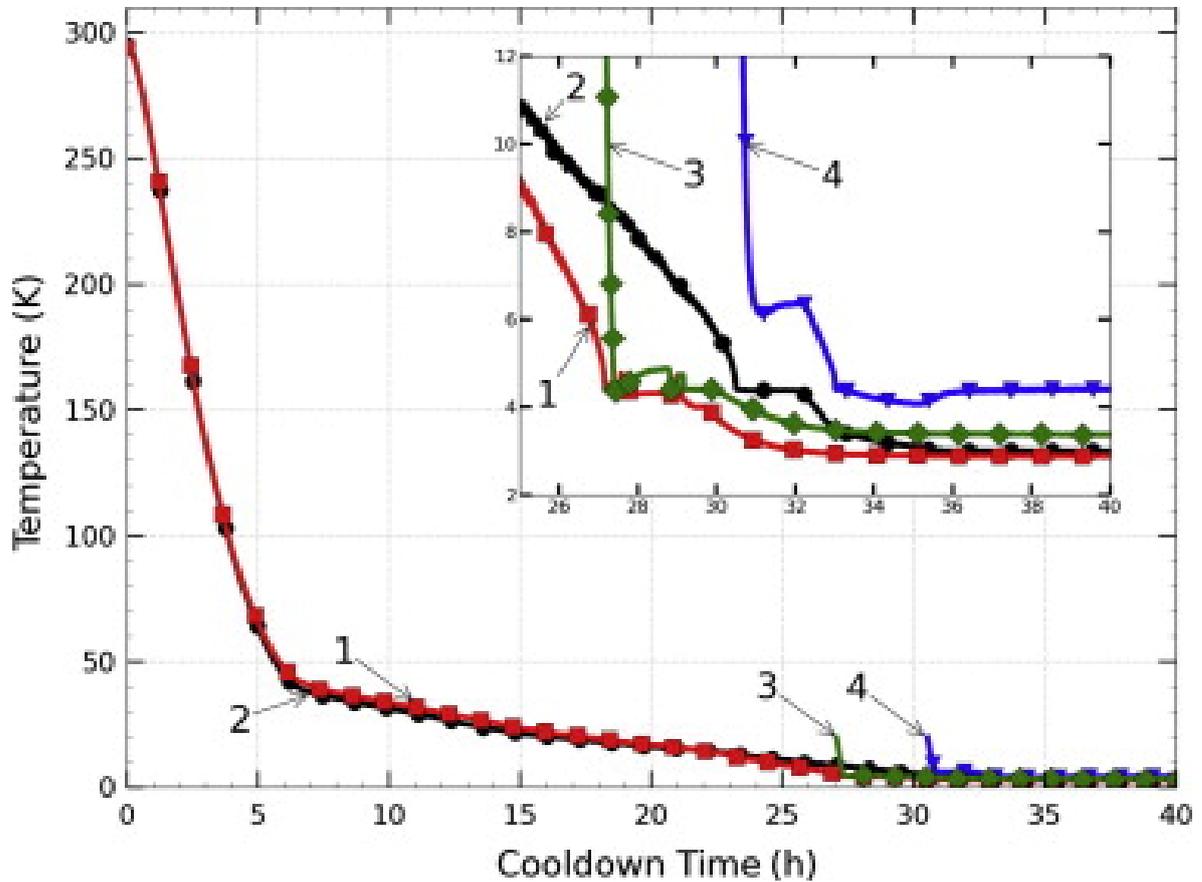


Figura 47: Temperatura alcanzada en función del tiempo de funcionamiento

## 17. CZT

CdZnTe, CZT [12] [13] [14], es un semiconductor con una buena banda de valencia y su alto número másico que, gracias a una serie de características que se van a mencionar, mejora considerablemente a los detectores de semiconductor tradicionales al poder realizar medidas a temperatura ambiente sin necesitar de refrigeración por los altos voltajes usados.

Además su resolución espacial y su resolución en energía es mejor que los detectores de semiconductor tradicionales. Sin embargo, existen detectores de

germanio ultra puro que mejoran las características de CZT.

### 17.1. Creación y desarrollo de CZT

Los cristales de CZT surgieron como mejora de los cristales de CT (CdTe), a los que se añadía a la mezcla una pequeña porción de Zn para aumentar el ancho de la banda de valencia además de otra serie de propiedades eléctricas que permiten mejorar las prestaciones a la hora de detección de radiación gamma. Durante los años el desarrollo de los CZT ha sido paulatino, pero constante ya que una de las características que empeoran sus propiedades son los defectos que pueden hacer que la banda de valencia y la transferencia del par electrón-hueco no sea lo suficientemente buena.

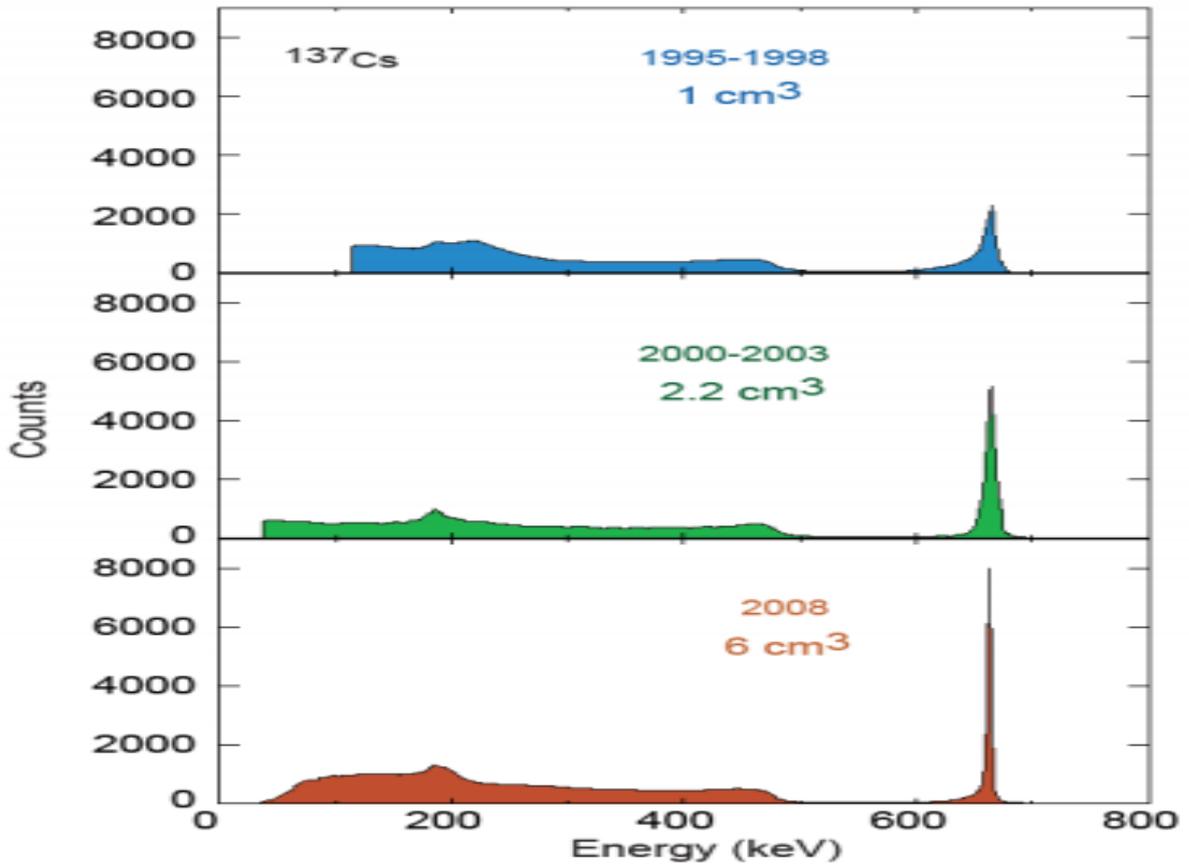
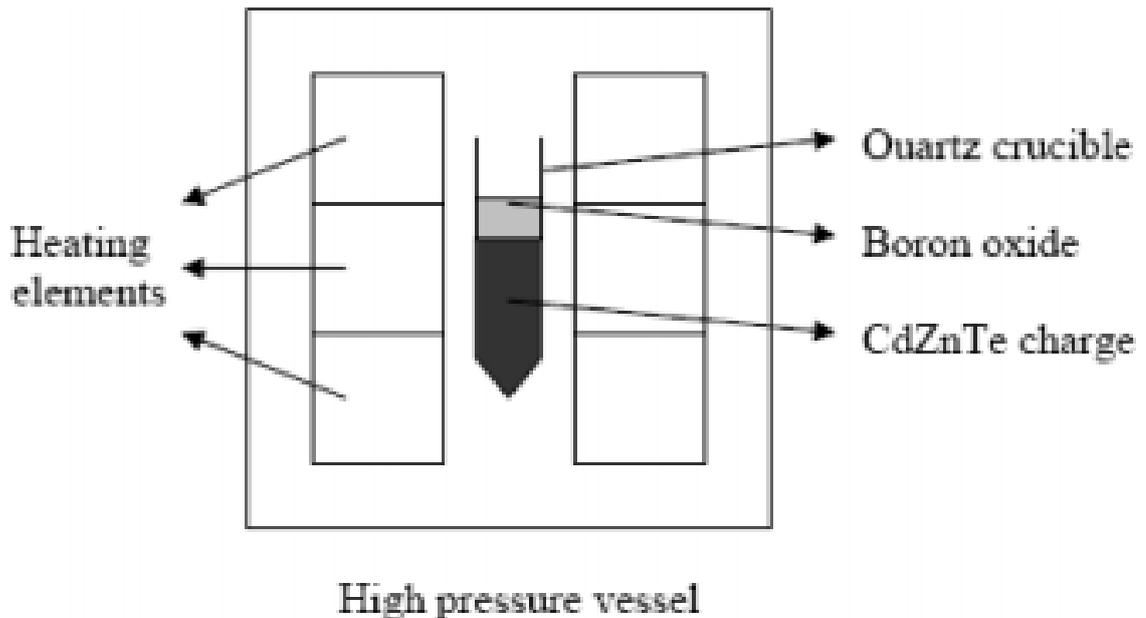


Figura 48: Comparación del espectro del Cs-127 a lo largo de los años

La creación de los cristales de CZT se realizan por el método Bridgman vertical. Sin embargo este método tiene una serie de inconvenientes intrínsecos al método de fabricación, lo que ha hecho que se mejore el método y desarrollandose otro añadiendo óxido de boro al proceso Bridgman para reducir las temperaturas necesarias para la creación.



**Figura 49:** Esquema del método Bridgman vertical

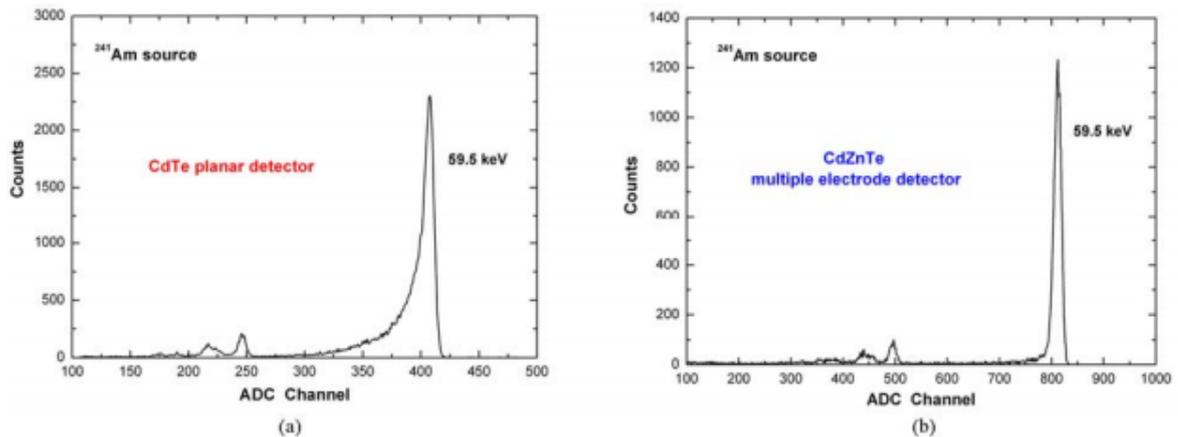
## 17.2. Características principales de CZT

Las características principales que hacen que este detector de semiconductor sea superior a los detectores tradicionales de semiconductor es la posibilidad de operar a temperatura ambiente en lugar de tener que refrigerar al semiconductor para acercar la banda de valencia a la banda de conducción. Además, mejora las propiedades características de estos detectores como son la resolución intrínseca y la resolución en energías.

En comparación con los detectores de centelleo, la capacidad de ser un detector compacto, al no necesitar fotomultiplicador, le permite ser un detector perfecto para trabajo de campo. Además el espacio muerto necesario alrededor del semiconductor

es mucho menor que en los detectores tradicionales, lo que hace que el blindaje pueda ser de menor espesor y aumente la compactación de estos detectores.

Comparandolo con su predecesor, se puede observar que la adición de trazas de Zn aumenta la resolución en energía del cristal.



**Figura 50:** Comparación CdTe con CdZnTe

A pesar de su capacidad de trabajar a temperatura ambiente, es cierto que comparar la resolución en energía con los nuevos detectores de HGe (Germanio ultra puro) se obtienen resultados peores. Sin embargo es cierto que se necesitan métodos de refrigeración para poder trabajar con detectores de Ge. Estos métodos pueden ser con nitrógeno líquido o con criostatos.

Con todo, se obtiene un detector con una muy buena resolución en energías, sin necesidad de refrigeración para acercar las bandas de valencia y conducción y con una alta compactación lo que hace que sea un detector pequeño, perfecto para uso de campo.

### 17.3. Comparación con detectores de semiconductor tradicionales

En el caso del CZT, las dos principales diferencias que le hace ser superior a los detectores de semiconductor tradicionales son: poder trabajar sin refrigeración auxiliar y el tamaño compacto del detector al no ser necesario grandes tamaños ni blindajes.

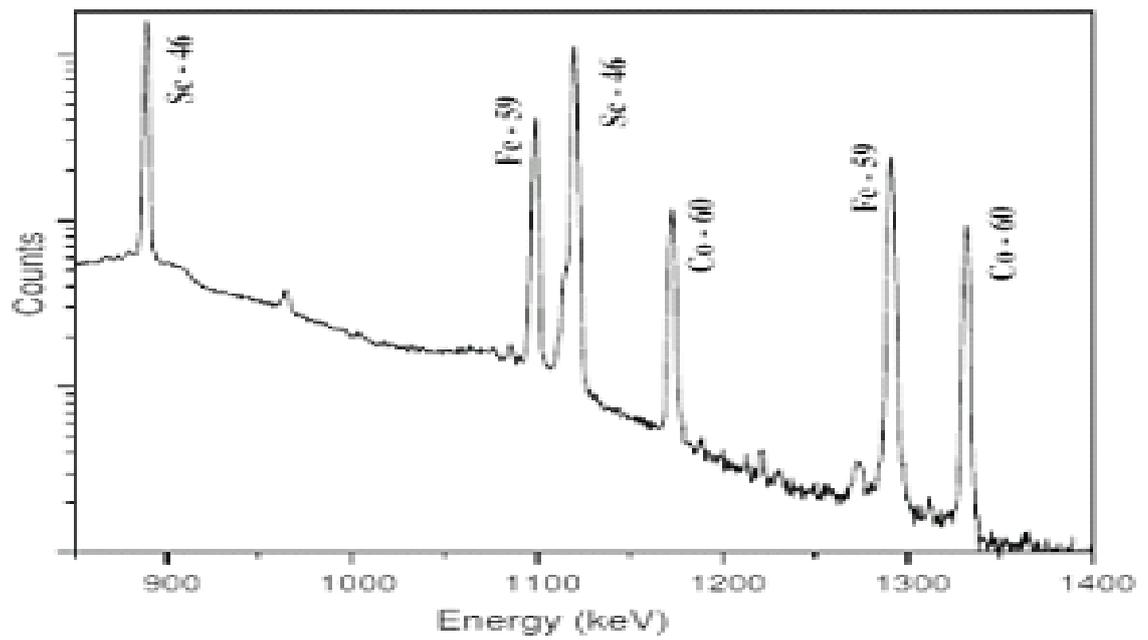
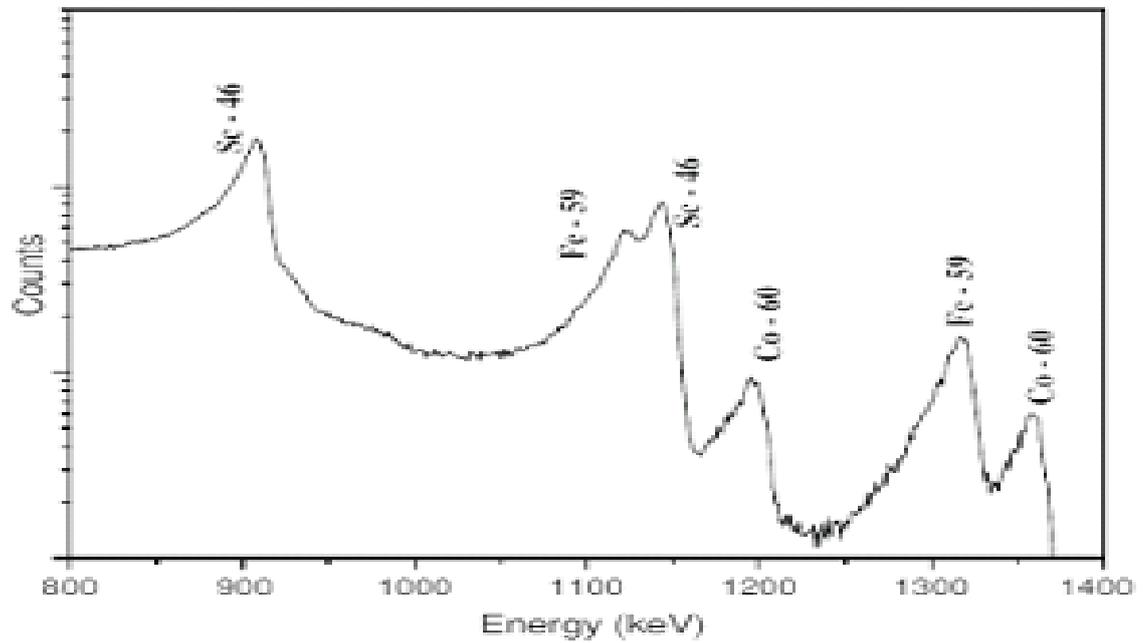
Tal y como se muestra en el aparatado donde se utiliza un detector de Ge para una experiencia práctica, el tamaño del blindaje es considerable comparado con el tamaño de un detector de CZT:



**Figura 51:** Detector CZT creado por Kromek

Además, el gasto en refrigeración auxiliar que tienen los detectores tradicionales de semiconductor es considerable al ser necesario nitrógeno líquido para poder trabajar en condiciones óptimas. Sin embargo, no es necesaria esta refrigeración para detectores CZT.

Sin embargo, existen inconvenientes al usar un detector CZT en lugar de un detector de HPGe [17]. El principal de ellos es la resolución, ya que la resolución de CZT es menor que la resolución de HPGe y para algunos usos específicos puede ser determinante:



**Figura 52:** Arriba, espectro obtenido con CZT. Abajo, mismo espectro obtenido con HPGe

## Parte VII

# Presupuesto, conclusiones y trabajos futuros

## 18. Planificación y presupuesto

### 18.1. Planificación

Resumidamente, se va a llevar a cabo un estudio del tiempo del desarrollo del proyecto.

En primer lugar, el proyecto se ha realizado durante los meses de octubre 2016 hasta junio 2017, lo que supone una duración total de 9 meses.

La planificación del proyecto se ha realizado en 4 fases que abarcan la totalidad del mismo. Estas son:

En primer lugar, se desarrolló una fase de formación teórica. Esta tuvo lugar entre los meses de octubre 2016 hasta enero 2017. Las tareas principales de esta fase fueron el estudio teórico de detección de radiación gamma y la redacción del estudio hecho durante esta fase.

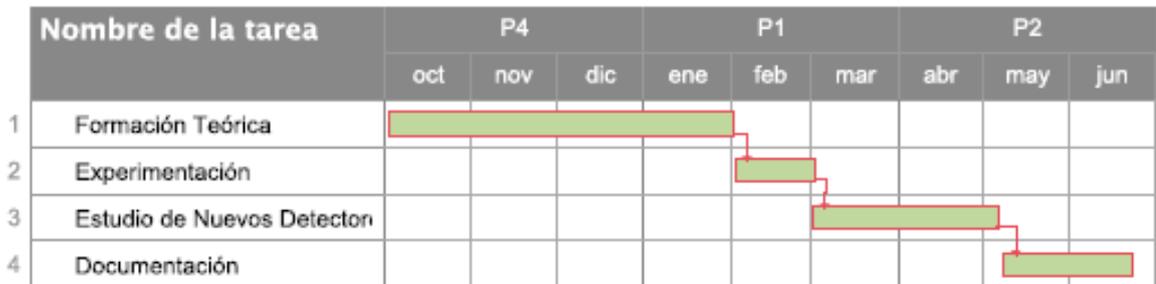
En segundo lugar, se desarrolló una fase de experimentación. Esta tuvo lugar entre enero 2017 y abril 2017. En ella, se estudió el uso del GENIE-2000 y la obtención de espectros de radiación gamma de forma práctica en un detector de centelleo y en un detector de semiconductor. Además, fue posible visitar la Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos donde se desarrolló una formación teórica en detección de radiación gamma por detectores de semiconductor.

En tercer lugar, se desarrolló una fase de estudio de nuevos detectores de radiación gamma, que tuvo lugar entre abril 2017 y mayo 2017. En ella, se investigó nuevos detectores de radiación gamma que, por sus características, pueden ser interesantes según en qué aplicaciones serian necesarios.

Y, en último lugar, se desarrolló una fase de documentación, que tuvo lugar entre mayo 2017 y junio 2017. En esta fase se compiló todo el trabajo hecho en el resto de las fases en un documento que servirá como análisis y conclusiones de

nuevos detectores para la detección de radiación gamma.

Para ilustrar las fases del proyecto, se ha añadido un diagrama de Gantt donde se observa el desarrollo del proyecto:



**Figura 53:** Diagrama de Gantt

## 18.2. Presupuesto

Como parte del objetivo del trabajo se va a realizar un estudio de mercado de los detectores anteriormente descritos, CLYC y CZT.

Para ello, se va a conocer los principales fabricantes de detectores CLYC y CZT, así como los distribuidores. En el caso del detector CLYC esta siendo desarrollado por 1 empresa RMDinc. en exclusividad y para el detector CZT esta siendo desarrollado y distribuido por varias empresas: Ritec y Kromek como empresas fabricantes y varias distribuidoras como CANBERRA o ATI.

En el caso del detector CLYC, al estar aún en proceso de desarrollo es complicado saber con exactitud un presupuesto cerrado para su compra e instalación. Sin embargo, se puede deducir, al ser uno de los detectores más completos y desarrollados del mercado, se puede suponer el mayor presupuesto de instalación con respecto al resto de detectores.

En el caso del detector CZT, ha sido más fácil conseguir un presupuesto cerrado para su compra e instalación. Al ser un detector altamente comercializado a través de varias distribuidoras se ha conseguido tres presupuestos diferentes:

Primero, distribuido y fabricado por Ritec, se tiene un coste de **16.830 euros** por la compra, transporte e instalación del detector CZT y los elementos asociados a él.

En segundo lugar, fabricado por Kromek y distribuido por CANBERRA, se tiene un coste de **21.402 euros** por la compra, transporte e instalación del detector. Añadir que existe una versión más barata de 16.196 euros que no abarca todas las propiedades que se consigue con el detector de Ritec.

Y por último, si el detector es fabricado por Ritec y distribuido por ATI, el precio del detector asciende a un total de **17.783 euros**.

Luego se puede concluir que, la mejor opción para la compra e instalación de un detector CZT es de **16.830 euros** siendo fabricado y distribuido por la empresa Ritec.

Además, se va a realizar una estimación en relación a las horas invertidas en realizar el proyecto. La estimación presupuestaria se va a estimar en horas-humano (hh).

En la siguiente tabla se tiene desglosado el conjunto de horas-humano, tanto del alumno como del tutor del proyecto:

<b>Fase</b>	<b>J.Rangel</b>	<b>A.Lorente</b>
<b>Formación Teórica</b>	<b>60 hh</b>	
<b>Experimentación</b>	<b>80 hh</b>	<b>40 hh</b>
<b>Estudio de Nuevos Detectores</b>	<b>50 hh</b>	<b>5 hh</b>
<b>Documentación</b>	<b>200 hh</b>	<b>5 hh</b>
<b>TOTAL</b>	<b>390 hh</b>	<b>50 hh</b>

**Figura 54:** Presupuesto horario

También, gracias a las estimaciones recomendadas por la Universidad Politécnica de Madrid para la propuesta de proyectos europeos en el marco de HORIZON 2020, se puede considerar el presupuesto necesario por las horas invertidas en la realización del proyecto.

Considerando que el precio por hh de alumno es de 10 euros/hh y el de tutor es de 28 euros/hh, se obtiene que por el trabajo realizado se deben abonar 3900 euros al alumno y 1400 euros al tutor del proyecto.

## 19. Conclusiones

Teniendo presente cuál es el objetivo global del trabajo, que es el estudio de nuevos detectores de radiación gamma en el mercado y, sin una gran pérdida de propiedades, conseguir un detector compacto que sustituya a los detectores tradicionales más voluminosos.

En primer lugar, tras haber explicado los fundamentos teóricos de la detección de radiación gamma, donde se desarrollan todos los temas dedicados a la interacción de fotones con la materia y su respuesta, se llega a la conclusión de que no vale cualquier material para la detección de radiación gamma porque es indispensable tener una serie de propiedades para poder obtener medidas adecuadas y no vale cualquier medio o blindaje para aislar al detector de la radiación exterior ya que este también interactúa con los fotones de la muestra y puede llegar a modificar la medida que se está llevando a cabo. Además, el blindaje debe ser el adecuado para poder aislar el detector de la radiación de fondo que puede contaminar la medida. Se llega a la conclusión de que existen dos materiales fundamentales: centelleadores y semiconductores, cuyas principales características han sido desarrolladas a lo largo del trabajo, y la instrumentación que los rodea debe ser la correcta para poder aislar al detector de la radiación de fondo para realizar las medidas con la exactitud requerida. Fundamentalmente, se necesita tubo fotomultiplicador y una grasa óptica que una el centelleador y el tubo fotomultiplicador para centelleadores y, para ambos materiales detectores, se necesita instrumentación que nos proporcione un soporte para el detector, sirva de blindaje y conecte correctamente al detector con el software que nos permitirá estudiar el espectro de radiación gamma de la muestra. En el caso de detectores de semiconductor tradicionales, se necesita refrigeración auxiliar para poder utilizar correctamente este tipo de detectores, comúnmente se utiliza nitrógeno líquido.

En segundo lugar, tras haber realizado una experiencia práctica con ambos tipos de detectores, en este caso con NaI (centelleo) y Ge (semiconductor); se observan diferencias fundamentales entre ambos detectores. Refiriéndose únicamente a propiedades intrínsecas al detector, las dos principales diferencias son la eficiencia de detección y la resolución en energías. Al hablar de eficiencia de detección, se refiere a la cantidad de fotones recogidos dividido por la cantidad de fotones

emitidos por la muestra a esa energía. Al hablar de resolución en energías, se refiere a la capacidad que tiene el detector de distinguir dos fotopicos muy próximos en energías entre si. En el caso del detector de NaI se puede observar, gracias a los espectros obtenidos de la sal común y sal yodada, la buena eficiencia a bajas energías que posee, sin embargo, la resolución en energías no es adecuada para medidas muy precisas (esto se puede observar en la calibración realizada, ya que no era capaz de distinguir dos picos muy próximos entre sí). Por lo que se ha deducido en este apartado que, para bajos contenidos de radionucleidos en la muestra es necesario utilizar un detector de semiconductor para poder realizar correctamente el estudio del espectro gamma, ya que este sí que posee una buena resolución en energías. En cambio para muestras con contenidos altos de radionucleidos se puede realizar su estudio con conductores de centelleo ya que proporcionan medidas con la suficiente exactitud.

Además, en cuanto a diferencias puramente físicas, concuerdan con las diferencias físicas teóricas previamente explicadas: mayor volumen de blindaje para semiconductores y la necesidad de refrigeración auxiliar para estos mismos detectores. Además de que no se usa un tubo fotomultiplicador en detectores de semiconductor por su propia naturaleza de detección.

Y, por último lugar, como principal objetivo del proyecto, se ha realizado un estudio de dos nuevos detectores de radiación gamma: CLYC y CZT. CLYC se trata de un detector de centelleo y CZT se trata de un detector de semiconductor. Estos dos detectores reúnen propiedades interesantes en cuanto al objetivo del proyecto, la sustitución de detectores tradicionales por uno que sea más compacto y manejable y que no pierda en demasía sus propiedades de detección.

Las principales diferencias de CLYC con los detectores típicos de centelleo se trata de la posibilidad de medir y conocer a la vez radiación gamma, neutrones térmicos y neutrones rápidos que puede emitir una muestra, lo que lo hace perfecto para actividades donde sea necesario este caso. Además mejora las prestaciones de los detectores de centelleo.

Las principales diferencias de CZT con los detectores típicos de semiconductor son la posibilidad de tamaños más compactos en cuanto al blindaje y, lo que es más importante, no es necesario refrigerar para usar correctamente el detector. Estas diferencias hacen que este detector sea compacto, pequeño y de un uso perfecto

para trabajo de campo.

En cuanto a sus propiedades de detección, se resumen en la siguiente tabla comparativa donde, además, se han incluido las propiedades de otros detectores como comparación [19] [20] [21] [22] [23] [24]:

Material Centelleador	NaI	HPGe	CZT	CLYC	LaBr3:Ce	Bi4Ge3O12 (BGO)
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3,67	5,32	5,8	3,3	5,29	7,13
Número atómico	51	32	49,6	44	48	75
Resolución en energía @662keV (%)	7	1	1,1-2	3,4	2,85	10
Eficiencia de detección (2cm, 511 KeV)	0,0527	0,001	0,0758	0,002	0,06	0,279
Tiempo de decaimiento (ns)	200	140	100	2	25	480

**Figura 55:** Tabla comparativa

En cuanto a la elección de un único detector entre los dos nuevos detectores de radiación gamma, es imposible quedarse con uno solo ya que las características, el precio y los materiales no son parecidos, pero tras haber realizado un estudio de ambos se esta en capacidad para poder elegir uno para la aplicación deseada, escoger un detector pequeño cuyas propiedades no disminuyan demasiado.

## 20. Trabajos futuros

Como continuación del proyecto, se sugiere diversos apartados que puede ser extendidos. Por ejemplo, según nuevos artículos científicos [15], se puede usar el detector CZT como detector de neutrones térmicos.

Además del uso que se le puede dar como detector de neutrones térmicos, el detector CZT sirve también como detector de rayos X en el espacio [18].

Como posible uso adicional, si se quiere conocer los elementos que componen material ilícito o explosivos incautados que hayan sido activados con neutrones, sería interesante saber la eficiencia y resolución necesaria para estudiar todos los posibles elementos que se pueden distinguir para conocer con exactitud el contenido del material sin tener que abrirlo.

Se puede concluir que el campo de estudio es complejo y se puede extender por diversas ramas que permite tener una visión aún más global de la detección de radiación gamma.

## Parte VIII

# Bibliografía

## Referencias

- [1] GNELL F. KNOLL, *Radiation Detection and Measurement*, tercera edición, Wiley John Sons, 2000.
- [2] ANTONIO TRAVESÍ, *Análisis por activación neutronica: teoría, practica y aplicaciones*, Servicio de Publicaciones de la J.E.N, 1975.
- [3] CANBERRA INDUSTRIES, *Model 2007B Scintillation Preamplifier Users Manual*, CANBERRA Industries, 1999.
- [4] CANBERRA INDUSTRIES, *Model ASA-100 NaI MCA Board Users Manual*, CANBERRA Industries, 2001.
- [5] CANBERRA INDUSTRIES, *Genie<sup>TM</sup> 2000 Spectroscopy Software Operations*, CANBERRA Industries, 2006.
- [6] BOURNE, M. M. AND C. MUSSI AND MILLER, E. C. AND CLARKE, S. D. AND POZZI, S. A. AND A. GUEORGUIEV, *Characterization of the CLYC detector for neutron and photon detection*, Elsevier, 2014.
- [7] LAURA C. STONEHILL *A New Scintillator for Neutron and Gamma Detection: Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>:Ce<sup>3+</sup> (CLYC) Overview and Selected Applications*, Space Science and Applications, Los Alamos National Laboratory, 2012.
- [8] J. GLODO , R. HAWRAMI, K.S. SHAH *Development of Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub> scintillator*, Radiation Monitoring Devices, Inc, 2013.
- [9] N. D'OLYMPIA, P. CHOWDHURY , C.J. LISTER , J. GLODO , R. HAWRAMI , K. SHAH , U. SHIRWADKAR *Pulse-shape analysis of CLYC for thermal neutrons, fast neutrons, and gamma-rays*, University of Massachusetts y Radiation Monitoring Devices Inc., 2013.

- [10] M.B. SMITHA, T. ACHTZEHNA, H.R. ANDREWSA, E.T.H. CLIFFORDA, P. FORGETA, J. GLODOB, R. HAWRAMIB, H. INGA, P. O'DOUGHERTYB, K.S. SHAHB, U. SHIRWADKARB, L. SOUNDARA-PANDIANB, J. TOWERB *Fast neutron measurements using Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>:Ce (CLYC) scintillator*, Bubble Technology Industries y Radiation Monitoring Devices Inc., 2014.
- [11] A. GIAZA, N. BLASIA, C. BOIANOA, S. BRAMBILLAA, F. CAMERA, C. CATTADORIC, S. CERUTIA, F. GRAMEGNAD, T. MARCHID, I. MATTEIA, A. MENTANAA, B. MILLIONA, L. PELLEGRIA, M. REBAIE, S. RIBOLDIA, F. SALAMIDAC, M. TARDOCCHIF *Fast neutron measurements with Li-7 and Li-6 enriched CLYC scintillators*, Università degli Studi di Milano, Physics Department, 2016.
- [12] V.IVANOV; J. MINTCHEVA, A. BERLIZOV , A. LEBRUN *Performance evaluation of new generation CdZnTe detectors for safeguards applications*, ZRF RITEC SIA, 2013.
- [13] STEFANO DEL SORDO, LEONARDO ABBENE, EZIO CAROLI, ANNA MARIA MANCINI, ANDREA ZAPPETTINI AND PIETRO UBERTINI *Progress in the Development of CdTe and CdZnTe Semiconductor Radiation Detectors for Astrophysical and Medical Applications* , Dipartimento di Fisica e Tecnologie Relative, Università di Palermo, 2009.
- [14] KROMEK *Manual de productos CZT de Kromek*, Kromek, 2016.
- [15] MARTIN-MARTIN, A.; IÑIGUEZ, M. P.; LUKE, P. N.; BARQUERO, R.; LORENTE, A.; J.VMORCHÓIN; GALIEGO, E.; QUINCOES, G.; MARTÍ-CLIMENT, J. M. *Evaluation of CdZnTe as neutron detector around medical accelerators.*, Radiation Protection Dosimetry, 2009.
- [16] I. HOSSAIN, N. SHARIP AND K. K. VISWANATHAN *Efficiency and resolution of HPGe and NaI(Tl) detectors using gamma-ray spectroscopy*, Department of Physics, Universiti Teknologi Malaysia, 2011.
- [17] SANHITA CHAUDHURY, CHHAVI AGARWAL, A. GOSWAMI, MANOHAR GATHIBANDHE *Comparison between HPGe and CdZnTe detector for the*

*correlation between calculated radioactivity and measured dose using an activated concrete sample*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2011.

- [18] H. KRAWCZYNSKIA, I. JUNGA, J. PERKINS, A. BURGER, M. GROZAB *Thick CZT Detectors for Space-Borne X-ray Astronomy*, Washington University in St. Louis, Department of Physics, 2011.
- [19] MARÍA PINTO MONEDERO *Evaluación de semiconductores como detectores de radiación para PET. Detectores de CZT.* , Máster en Física Biomédica, Universidad Complutense de Madrid.
- [20] LEE SOBOTKA *Cadmium Zinc Telluride (CZT) Detectors* , Oak Ridge, 2003.
- [21] JONAS NILSSON *Using the LaBr<sub>3</sub>:Ce scintillation detector for mobile-spectrometry* , Department of Medical Radiation Physics, Lund University, 2010.
- [22] PETER JANSSON, SOPHIE GRAPE, STEPHEN J. TOBIN, HENRIK LILJENFELDT *Comparing HPGe and Scintillator Detectors for Gamma Spectroscopy Assay of Used Nuclear Fuel* , Los Alamos National Laboratory, USA.
- [23] K. S. SHAH, J. GLODO, M. KLUGERMAN, W. W. MOSES, S. E. DERENZO, AND M. J. WEBER *LaBr<sub>3</sub>:Ce Scintillators for Gamma Ray Spectroscopy* .
- [24] F.HUESO-GONZÁLEZ *Comparison of Scintillation Detectors based on BSO and LSO*, National Center for Radiation Research, Dresden.