

# PRACTICA 6: ESPECTROSCOPIA GAMMA CON DETECTORES DE INa(Tl)

## 6.1. INTRODUCCIÓN

Los detectores de INa(Tl) son detectores de centelleo (la información general sobre los detectores de centelleo se encuentra en la práctica 4), en los que la sustancia luminiscente es el INa(Tl). Para la detección de la radiación gamma, el INa(Tl) constituye la sustancia luminiscente más utilizada, dada su gran transparencia en la banda de emisión luminiscente, su alta razón de conversión de energía a fotones, y que un 80 % está constituido por yodo, lo que propicia un excelente rendimiento de detección, del orden de 60 % para radiación  $\gamma$  de unos 0,5 MeV. Por eso es el detector de centelleo más utilizado en la espectrometría de radiación gamma.

El detector estaría formado por un cristal cilíndrico de INa(Tl) acoplado ópticamente al fotocátodo de un fotomultiplicador de un diámetro adecuado. Véase la fig. 4.1 de la práctica 4.

El espectrómetro de INa(Tl) bajo la acción de una fuente de radiación gamma, produce en su etapa de salida, impulsos cuya amplitud es proporcional a la energía disipada por cada fotón en el cristal. De esta forma con instrumental electrónico adecuado (analizadores multicanales), se puede medir el espectro energético de la radiación incidente. La descripción de los analizadores multicanales aparece en la práctica 5. El esquema del montaje se ve en la fig. 6.1.

El detector de INa es un plástico de centelleo con unas características especiales que le hacen más útil para la detección de la radiación gamma. Tiene una alta eficiencia de conversión luminosa emitida y como está formado por yodo ( $Z = 53$ ), presenta una gran probabilidad de interacción fotoeléctrica con la radiación gamma.

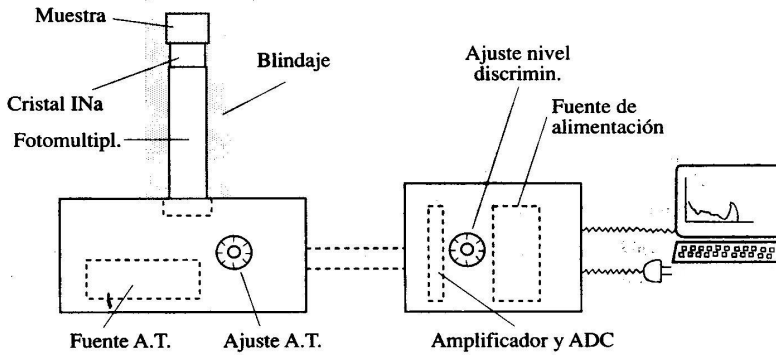


Figura 6.1. Sistema experimental del detector INa(Tl)

### 6.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA DETECCIÓN GAMMA

La radiación gamma interacciona con la materia según tres procesos bien conocidos: *efecto fotoeléctrico*, *efecto Compton* y *creación de pares*, descritos en la práctica 4. La forma del espectro depende del proceso de interacción.

- *Espectro de impulsos para una fuente de energía inferior a 1 MeV*: Solamente intervienen el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton. Para energías bajas es el efecto fotoeléctrico el que predomina, pero a medida que la energía aumenta el efecto Compton adquiere mayor importancia.

El pico del efecto fotoeléctrico o fotopico, corresponde a la absorción total de energía  $E$ . El espectro de los electrones Compton es continuo y va desde 0 hasta  $E_c$ , siendo  $E_c$  la energía máxima del electrón.

En el efecto Compton, la energía de fotón dispersado es:

$$E_d = \frac{0,511}{(1 - \cos \phi) + 0,511/E_i},$$

siendo  $E_d$  = la energía del fotón dispersado,  $E_i = E_\gamma$  = la energía del fotón incidente, 0,511 = equivalente energético a la masa en reposo del electrón (en MeV) y  $\phi$  el ángulo de dispersión.

La energía del electrón:

$$E_e = \frac{E_i}{1 + \frac{0,511}{E_i(1 - \cos \phi)}},$$

y según los casos, tenemos:

- a) Si  $\cos \phi = 1$ ,  $\phi = 0^\circ$ , la dispersión es pequeña y  $E_d \equiv E_i$
- b) Si  $\cos \phi = 0$ ,  $\phi = 90^\circ$

$$E_d = \frac{0,511 \times E_i}{E_i + 0,511} < 0,511 \text{ MeV}$$

Los fotones dispersados en dirección normal no pueden tener energías superiores a 0,511 MeV

- c)  $\cos \phi = -1$ ,  $\phi = 180^\circ$ . El fotón es retrodispersado y su energía es mínima. En cambio el electrón va hacia delante con máxima energía, dada por:

$$E_e = \frac{E_i}{1 + \frac{0,511}{2E_i}}$$

- *Espectro de una fuente de energía superior a 1 MeV*: Para energías elevadas la probabilidad del efecto fotoeléctrico es menor, en cambio la interacción de la radiación gamma por la creación de pares adquiere cada vez mayor importancia. La producción de pares da lugar a un nuevo fotopico en el espectro, situado a 0,511 MeV, que es el que resulta de la interacción fotoeléctrica de los fotones de 0,511 MeV formados por la aniquilación de los positrones en el detector.

### 6.1.2. FORMACIÓN DEL ESPECTRO GAMMA

Para tener una idea primaria de la génesis de un espectro gamma, considerar que sobre el detector incide radiación monoenergética, con lo cual tendremos interacciones debidas a efectos fotoeléctrico, efecto Compton y creación de pares.

Una cierta proporción de los fotones incidentes sufre efecto fotoeléctrico, en cuyo caso se absorbería toda la energía del fotón, y los impulsos correspondientes

serán todos de la misma amplitud. En consecuencia, en este espectro teórico la línea fotoeléctrica vendrá representada por una distribución infinitamente estrecha, que en la fig. 6.2 sería la línea A. Se le llama fotopico.

Otra fracción de fotones experimentará en el detector efecto Compton, en el que como se vió anteriormente se produce un fotón disperso y un electrón Compton. Si el fotón se escapa del cristal sin interacción, en el cristal sólo se deposita una fracción de la energía del fotón, la correspondiente al electrón Compton. Por esta razón, teniendo en cuenta que la energía del electrón Compton varía en forma continua, entre 0 y un valor de energía máxima,

$$E_{\text{máx}} = \frac{E_i}{1 + 0,511/2E_i},$$

resulta que el espectro Compton presenta una distribución continua, como se indica en la fig. 6.2.

Si la energía del fotón es superior a 1,022 MeV ( $2m_0c^2$ ) podremos observar que hay creación de pares, mediante el pico de aniquilación, siempre en 0,511 MeV.

El espectro real obtenido en un detector de centelleo varía sustancialmente respecto al teórico ya visto. Efectos de fluctuaciones estadísticas en las distintas etapas de la detección que contribuyen a la formación del impulso, degradan la línea fotoeléctrica a una distribución con forma de curva acampanada, gaussiana. El continuo Compton también varía su forma debido a las fluctuaciones estadísticas suavizando la caída del borde.

Además hay que tener en cuenta que sobre el continuo Compton puede aparecer también el pico debido al fotón retrodispersado, que en la fig. 6.2 sería la línea B.

Cuando en el efecto Compton el ángulo,  $\phi$ , con el que el fotón sale dispersado vale  $180^\circ$ , el fotón va hacia atrás y su energía es mínima (recordar que cuando esto sucede el electrón va hacia delante con energía máxima, borde Compton). Puede ser que este fotón no escape del cristal depositando su energía en él, así da lugar al pico de retrodispersión superpuesto al continuo Compton.

Si  $\phi = 180^\circ$  la energía del fotón dispersado valdrá (como ya hemos visto en la práctica anterior):

$$E_{rd} = \frac{0,511 \times E_i}{2E_i + 0,511}.$$

Esta expresión se obtiene al sustituir el valor del ángulo en la expresión de la energía del fotón dispersado (que ha aparecido anteriormente).

Si sumamos la energía máxima para un electrón Compton y la energía del fotón retrodispersado tenemos que obtener la energía del fotón incidente.

$$E_i = E_{rd} + E_{\text{máx}} \quad (1)$$

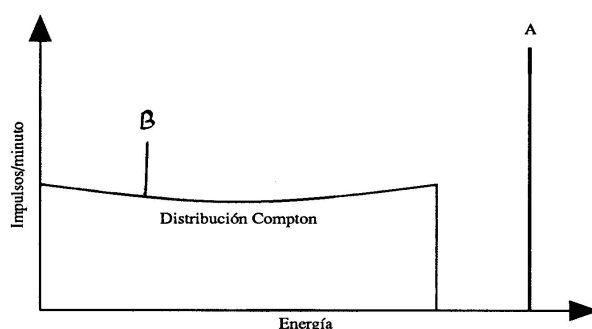


Figura 6.2. Espectro teórico de radiación gamma monoenergética

### 6.1.3. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA

1. Medida del fondo radiactivo con el detector cerrado y abierto.
2. Calibración en energías con una fuente radiactiva.
3. Determinación de la eficiencia del detector. Medir para varias energías. Gráfica de la eficiencia en función de la energía.
4. Medida de la resolución de diferentes picos, anotando sus energías. Gráfica de la resolución en función de la energía.
5. Estudio de espectros. Determinación teórica y experimental del fotopico, la distribución Compton y la retrodispersión, de cada uno de los espectros.
6. Determinación de la actividad de una muestra de actividad desconocida.
7. Determinación de las energías de una muestra desconocida. Determinación de su composición.

## MODO DE OPERAR

### a) Determinación del fondo.

1. Una vez encendidos los aparatos (la alta tensión y el discriminador ya están fijados) y el ordenador, se escribe Espectros-WINDAS para acudir al programa de análisis, que está grabado en el disco duro.
2. La lista con todos los comandos se encuentra junto al ordenador.
3. Se empieza por acumular fondo con el castillete vacío y tapado. Se acumula también sin muestra y con el castillete destapado. Se comparan ambos espectros.
4. Se graban los espectros en el pen-drive que dispondrá cada equipo de trabajo durante la práctica.

### b) Calibración en energías.

1. Para calibrar en energías un espectro gamma, conviene tomar una muestra que tenga al menos dos picos y estén bien separados, para obtener mayor exactitud. Por ejemplo Europio-152. Acumule durante suficiente tiempo. Tiene que salir similar al de la fig. 6.3.

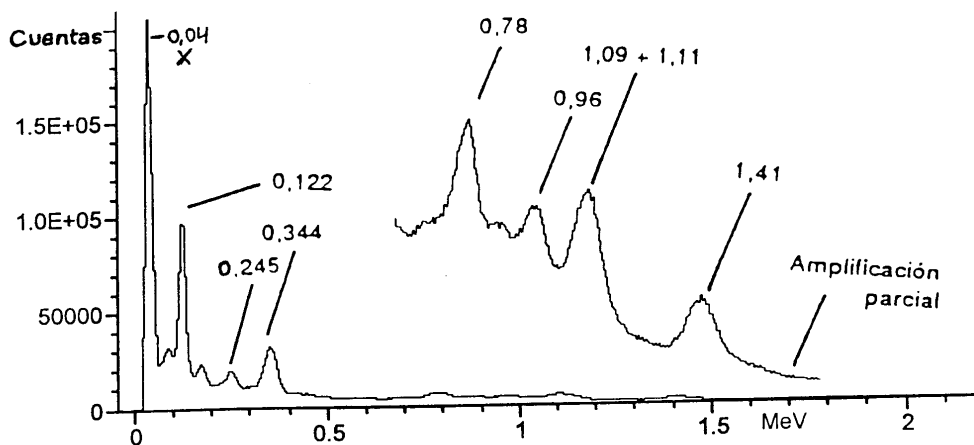


Figura 6.3. Espectro calibrado del  $\text{Eu}^{152}$

2. Una vez que se ha acumulado se anotan los valores del canal donde esté el máximo para dos picos. Para distinguir bien el segundo tramo del espectro es necesario hacer una amplificación de la zona correspondiente.
3. Hay que anotar el centroide de los picos así como sus energías.
4. Conociendo estos datos, se puede calibrar ya.
5. Una vez calibrado el espectro en energías, compruebe que está bien calibrado, comparando todos los picos del espectro con los del  $\text{Eu}^{152}$ .
6. Grabe el espectro calibrado, para poder después acudir a él y recalibrar los demás espectros.

*c) Eficiencia del detector para las gammas.*

1. La actividad gamma de una determinada transición, es decir, el número de fotones/s, no es usualmente equivalente a la actividad de la muestra ( $n^\circ$  de desintegraciones/s) pues sólo una fracción de estos pueden dar lugar a la transición  $\gamma$  específica. Para conocer el tanto por ciento necesario con que contribuye a una transición determinada es necesario consultar el esquema de desintegración del elemento en estudio, y conocer los coeficientes de ramificación.
2. Para determinar la eficiencia del detector también es necesario tener en cuenta el periodo de semidesintegración del elemento, para calcular la actividad que tiene en el momento de la medida,

$$A = A_o \times e^{-\lambda t}$$

siendo  $A_o$  la actividad medida en el tiempo  $t$ , indicado en la muestra calibrada y  $\lambda = \ln 2/T_{1/2}$ .

3. La eficiencia  $\varepsilon$  del detector se puede definir como la fracción de radiación monoenergética e isotrópica, que al interaccionar con él provoca un destello capaz de ser detectado. La eficiencia depende de: la energía de la radiación incidente, de la geometría del detector y de la sustancia luminiscente. El cálculo se puede realizar teóricamente, pero en estas prácticas se determinará utilizando una muestra calibrada ( $\text{Eu}^{152}$ ).

4. La actividad se relaciona con la eficiencia del siguiente modo:

$$A = \frac{A_f}{\varepsilon(E) \cdot C_r}$$

$A$  = Actividad de la muestra calibrada (Bq).

$A_f$  = Área del fotopico (Bq).

$\varepsilon(E)$  = Eficiencia absoluta.

$C_r$  = Coeficiente de ramificación.

El coeficiente de ramificación  $C_r$ , es la relación entre el n<sup>o</sup> de desintegraciones que siguen un proceso determinado y el n<sup>o</sup> total de desintegraciones.

5. La eficiencia no es la misma para todas las energías. Se hará una gráfica de la variación de la eficiencia con la energía con los valores obtenidos para diferentes picos. En nuestro caso, se utilizará el espectro de  $\text{Eu}^{152}$  ya almacenado. Como la determinación de  $C_r$  es más complicado en el  $\text{Eu}^{152}$ , se le da ya calculado. Por lo tanto, los coeficientes de ramificación son los que aparecen en la tabla III de la práctica, junto con las energías correspondientes.

*d) Medida de la resolución.*

1. La emisión luminosa del cristal, la emisión fotoeléctrica del fotocátodo y la emisión de electrones secundarios por los dinodos, son fenómenos aleatorios que introducen fluctuaciones alrededor de su valor medio. Por lo tanto no aparece nunca una línea de absorción total, sino un pico más o menos ancho. La anchura del pico depende de la energía de la radiación.
2. La posibilidad de distinguir la presencia de dos rayos gamma de energías muy próximas, nos define el poder de resolución en energías de un detector. Se caracteriza, por convención, el poder de resolución como la relación entre la anchura del pico a la mitad de su altura (en canales o en MeV) y el número de canales (o la energía) del pico. Es decir,

$$R = \frac{FWHM}{\text{posición del fotopico}} \times 100\% = \frac{\Delta V}{V} \times 100$$

La resolución se mide en %.



3. Como no es la misma para distintas energías, hay que determinarla para diferentes valores de la misma y hacer una gráfica.
4. Para determinar la resolución es necesario utilizar muestras radiactivas que estén preparadas de la misma manera.
5. Acumule durante un tiempo distintas muestras y después de calibrarlas, calcule la resolución de sus picos. Haga una gráfica en escala lineal.

*e) Estudio de espectros*

1. Introduzca una muestra radiactiva y almacene durante un rato. Compruebe el fotopico, la distribución Compton y el pico de retrodispersión. Repita el proceso con distintas muestras radiactivas.
2. Para cada uno de los espectros compruebe que la energía máxima de la distribución Compton se corresponde con el valor teórico dado por la ecuación. Mire también el pico de retrodispersión. Compruebe que se cumple (1).
3. Introduzca la muestra de  $\text{Na}^{22}$  y almacene durante tiempo suficiente. Recalibre con la calibración obtenida con el  $\text{Eu}^{152}$ . Observe los picos. El  $\beta^+$  emitido por el sodio se aniquilará con un electrón del medio, en las proximidades de la fuente y dará lugar a dos  $\gamma$  emitidos en sentido contrario, teniendo cada uno la energía equivalente a la masa en reposo del electrón, es decir 0,511 MeV. La fuente emitirá pues un gamma de 1,276 MeV y dos gammas de 0,511 MeV, que salen en sentido contrario.

*f) Actividad desconocida*

1. Acumule durante un tiempo una muestra de  $\text{Co}^{60}$  de actividad conocida.
2. Acumule durante un tiempo semejante una muestra de  $\text{Co}^{60}$  de actividad desconocida.
3. Comparando los fotopicos se obtendrá la actividad desconocida. La relación entre la actividades es equivalente a la relación del área para picos de la misma energía.

*g) Muestra desconocida*

1. Introduzca una muestra de elemento desconocido y almacene hasta tener una buena estadística que permita distinguir bien los picos.
2. Recalibre en energías y determine las energías de los fotopicos que aparezcan.
3. Con la ayuda de los esquemas de desintegración, determine de qué elemento o elementos se puede tratar.

**RESULTADOS***CALIBRACIÓN*

1º pico - Canal =

Energía =

2º pico - Canal =

Energía =

EFICIENCIAActividad inicial de la muestra:  $A_o =$ 

Fecha:

Periodo  $T_{1/2} =$ Actividad corregida:  $A =$ 

La tabla siguiente proporciona el correspondiente número de fotones gamma por desintegración de  $\text{Eu}^{152}$ ,  $C_r$  dato necesario para calcular la eficiencia.

TABLA III - Coeficientes de ramificación del  $\text{Eu}^{152}$ 

Picos del $\text{Eu}^{152}$ - E(MeV)	$C_r$
0,040	0,567
0,122	0,307
0,244	0,079
0,344	0,272
0,78	0,133
0,96	0,145
1,41	0,214

Energía (MeV)	Área del pico (Bq)	$C_r$	Eficiencia ( $\varepsilon$ )	$\varepsilon$ (%)

RESOLUCIÓN

Fuente	Energía (MeV)	Anchura a semialtura	Resolución (%)

ESTUDIO DE ESPECTROS

**Fuente:**

Energía del borde Compton del espectro = MeV

" " Teórica = MeV

Energía del pico de retrodispersión = MeV

" " Teórica = MeV

**Fuente:**

Energía del borde Compton del espectro = MeV

" " Teórica = MeV

Energía del pico de retrodispersión = MeV

" " Teórica = MeV

**Fuente:**

Energía del borde Compton del espectro =	MeV
" " Teórica =	MeV
Energía del pico de retrodispersión =	MeV
" " Teórica =	MeV

**Fuente:**

Energía del borde Compton del espectro =	MeV
" " Teórica =	MeV
Energía del pico de retrodispersión =	MeV
" " Teórica =	MeV

**Fuente:**

Energía del borde Compton del espectro =	MeV
" " Teórica =	MeV
Energía del pico de retrodispersión =	MeV
" " Teórica =	MeV

**Fuente:**

Energía del borde Compton del espectro =	MeV
" " Teórica =	MeV
Energía del pico de retrodispersión =	MeV
" " Teórica =	MeV

ACTIVIDAD DESCONOCIDA

Co-60 conocido:

Fecha:

Actividad inicial =  $A_0$  =Actividad corregida =  $A$  =Área del 1<sup>er</sup> pico (Bq) =Área del 2<sup>o</sup> pico (Bq) =

Co-60 desconocido:

Área del 1<sup>er</sup> pico (Bq) =Área del 2<sup>o</sup> pico (Bq) =**Actividad** =  $A$  =

MUESTRA DESCONOCIDA

Número de picos:

Energía de los picos:

Se trata de.....

**CONCLUSIONES de la PRÁCTICA 6**

1. ¿Qué se puede deducir del fondo con el detector cerrado y abierto?
2. ¿Es necesario tener en cuenta el fondo del detector en las medidas? ¿Por qué?
3. ¿Es igual la eficiencia del detector para todas las energías? ¿Cómo varía?
4. ¿Es igual la resolución del detector para todas las energías? ¿Cómo varía?
5. El espectro de la radiación  $\gamma$ , ¿Es discreto o continuo? ¿Por qué?
6. ¿Se corresponden las energías del borde Compton y del pico de retrodispersión teóricas con las medidas por Ud?
7. ¿Por qué aparece un pico de 0,511 MeV en los espectros gamma de las muestras radiactivas que emiten positrones?
8. ¿Por qué en el espectro del  $\text{Zn}^{65}$  aparece un pico de aniquilación? ¿Es el  $\text{Zn}^{65}$  emisor de positrones?
9. ¿Por qué en algunos espectros gamma aparecen picos correspondientes a emisión de rayos X?
10. ¿Por qué considera útil calibrar el espectro en energías?
11. ¿Qué otras aplicaciones se le ocurre que pueden darse a esta práctica?