

ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LAS EMISIONES GAMMA DE UNA MUESTRA DE ^{226}Ra

GUIÓN DEL LABORATORIO

CURSO 2006-2007

0. - ESTUDIO TEÓRICO DE LA CADENA DE DESINTEGRACIONES DEL ^{226}Ra

Antes de iniciar el estudio experimental del espectro de emisión de una determinada muestra radiactiva, en nuestro caso ^{226}Ra , conviene conocer de antemano cómo será ese espectro y a qué es debido. Este punto servirá como punto de partida para la práctica.

El primer punto que debemos tener en cuenta en el estudio del espectro de una muestra que originalmente contenía únicamente un determinado isótopo radiactivo, es que pasado un cierto tiempo, la muestra contendrá no sólo ese tipo de núcleos, sino toda la cadena de núcleos que se vayan originando tras sucesivas desintegraciones del núcleo-padre. Es decir, en nuestro caso el núcleo-hijo originado tras la desintegración del ^{226}Ra al ser también radiactivo, quedará en la muestra hasta que se desintegre a su vez en otro núcleo... y este proceso finalizará cuando uno de los productos generados sea estable (^{206}Pb).

Por lo tanto, como tarea inicial hay que realizar el estudio teórico de la cadena de desintegraciones originada a partir del ^{226}Ra . Este estudio comprenderá no sólo las energías de las partículas emitidas, sino también su intensidad relativa, su probabilidad de emisión...

Para ello se pueden consultar diversas fuentes:

- Tabla de Isótopos – Disponible en la biblioteca de la facultad y en el laboratorio
- Base de datos sobre desintegraciones nucleares
(<http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/nucSearch.asp>)
- Programa “Isotope Explorer” – Descargable desde Internet (Ver sección de links)

[1] -En el cuestionario final de la práctica se pedirán una serie de datos básicos sobre la desintegración del ^{226}Ra .

- Núcleos presentes en una muestra antigua como la del laboratorio que originalmente sólo contenía ^{226}Ra . Estos núcleos se habrán ido generando a lo largo del tiempo fruto de las distintas desintegraciones que se dan en la cadena.
- Esquema de la cadena de desintegraciones que se origina a partir del ^{226}Ra .
- Semivida(Half-Life = $T_{1/2}$) y Tiempo de Vida Medio (Mean Life) de cada especie
- Energía disponible para la emisión de cada partícula radiactiva (Q).
- En el caso de las desintegraciones alfa, por conservación del momento, la Energía Cinética T con la que son emitidas las partículas no es igual a la energía Q, sino que: $T = Q / (1 + m_{\alpha}/m_{N^*})$.
- En el caso de que un núcleo pueda desintegrarse de más de un modo (por ejemplo, que pueda desintegrarse alfa o beta, ver en qué proporción (Branching Ratio) lo hace en cada uno de ellos.

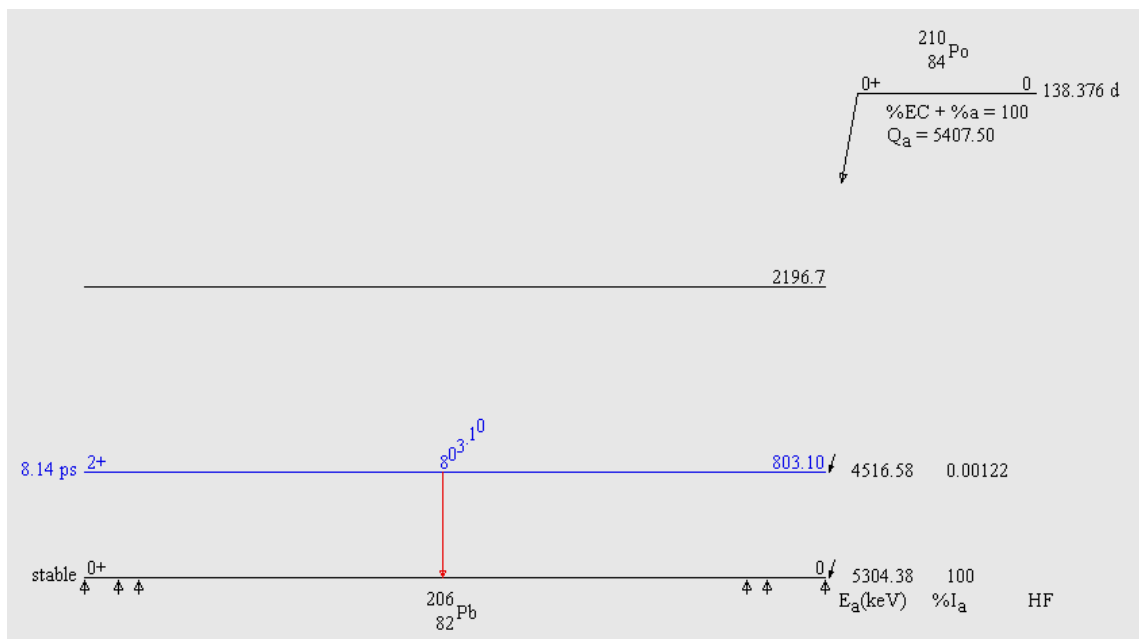
LABORATORIO DE NUCLEAR – GUIÓN DE PRÁCTICA GAMMA – CURSO 2006/2007

En muchas ocasiones, tras la desintegración de un determinado núcleo, **el núcleo hijo que queda tras la desintegración puede no encontrarse en su estado fundamental, y se desexcita emitiendo radiación gamma**. La energía y el número de rayos gamma emitidos dependerán de la estructura de niveles de energía del núcleo hijo (de manera análoga a como sucede en la emisión de fotones en las transiciones atómicas).

Puede suceder que la desexcitación no se de en único salto, y se emita más de un rayo gamma en cascada. En muchos núcleos estas cascadas llegan a ser muy complejas. La probabilidad de cada una de estas transiciones entre niveles nucleares depende de las propiedades (paridad, momento angular) de cada nivel. Puedes repasar o ampliar estos conceptos a través de la sección de Links (<http://nuclear.fis.ucm.es/Links>)

Como ayuda mostraremos un ejemplo de una de las desintegraciones que tendremos en la muestra: el ^{210}Po .

En una tabla de isótopos se puede encontrar el siguiente esquema correspondiente a la desintegración del ^{210}Po : <http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/nucSearch.asp>)



Se puede ver que el ^{210}Po se desintegra α (con una probabilidad del $\%a=100.00\%$) convirtiéndose en el estado excitado (2^+) del ^{206}Pb en un $\%I_a=0.00122\%$ de los casos y en el fundamental, que en este caso es estable, en el resto. Desde este estado excitado (2^+) pasa a su estado fundamental (0^+) liberando un rayo gamma de 803.1 keV.

LABORATORIO DE NUCLEAR – GUIÓN DE PRÁCTICA GAMMA – CURSO 2006/2007

El dato Q (en MeV) que aparece en la tabla, corresponde a la energía total disponible en el proceso de emisión de la partícula α . Para obtener la energía cinética con la que son emitidas realmente las partículas α hay que tener en cuenta el retroceso del núcleo hijo que se crea:

$$T = \frac{Q}{1 + \frac{m_{\alpha} \cdot c^2}{m_{206Pb} \cdot c^2}} = \frac{5.4075}{1 + \frac{4.0026}{205.974}} = \frac{5.4075}{1.0194} = 5.3044 \text{ MeV}$$

Este dato aparece ya calculado en la gráfica (E_a en keV). En el caso de que la desintegración no vaya al estado fundamental (en nuestro ejemplo, al estado excitado 2^+) la energía de la partícula sería $5304 \text{ keV} - 803.1 \text{ keV}$ (Energía del estado excitado) = 4516.6 keV . En la tabla del cuestionario basta con reflejar el caso más probable de desintegración alfa.

La semi-vida ($T_{1/2}$) del ^{210}Po aparece en las tablas, por lo que deberemos calcular a partir de ella, la vida media (τ) y la constante de desintegración.

(<http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/nucSearch.asp>)

WWW Table of Radioactive Isotopes

Nuclide search A=210; Z=84;

Nuclide	Z	N	Decay mode	Half life	E_x (keV)	$J\pi$	Abundance (%)
210Po	84	126	α	138.376 d	0	0+	

$$T_{1/2} = 138.4 \text{ días} \rightarrow \text{Vida Media } (\tau) = T_{1/2} / \ln 2 = 199.7 \text{ días} \rightarrow \lambda = 1/\tau = 0.005 \text{ días}^{-1}$$

En el caso de que el núcleo hijo (En este caso, el ^{206}Pb) fuese inestable, continuaríamos viendo su desintegración hasta alcanzar un núcleo estable.

EMISIONES γ

OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA

El objetivo de esta parte de la práctica es la determinación del espectro γ del ^{226}Ra mediante el uso de un detector de CZT cuya señal se recoge y clasifica mediante un analizador multicanal y finalmente se registra en un PC.

Para realizar este estudio se deberán realizar los siguiente pasos:

- 1) – Calibración del detector con diversas fuentes estándar: ^{22}Na , ^{60}Co y ^{137}Cs .
- 2) – Obtención del espectro gamma del ^{226}Ra
- 3) – Obtención del espectro de fondo
- 4) – Comparación del espectro obtenido experimentalmente con el teórico.

EL MÉTODO EXPERIMENTAL

El CZT es un material semiconductor. Como otros detectores de este tipo, un detector de CZT es esencialmente un diodo. Una tensión de bias ocasiona la depleción completa de dicha unión, en la que no hay, en condiciones normales, portadores de carga (ver sección de detectores semiconductores en los apuntes de introducción al laboratorio). Su Z efectiva y alta densidad, lo hace un buen material para detectar radiación gamma. Además, se obtiene mucha mejor resolución que con los cristales centelleadores (empleados en la práctica de coincidencias gamma)

OPCIONES DEL CASSYLAB PARA ESTA PRÁCTICA

El programa de ordenador con el que se trabaja en esta práctica, CassyLab, es el mismo que en la de partículas alfa. Sobre su manejo se puede consultar el Apéndice A, los comentarios que aparecen en la sección sobre partículas alfa y el manual que se encuentra en el laboratorio.

A la hora de configurar las opciones de la adquisición del programa CassyLab debemos tener en cuenta las siguientes sugerencias:

1. Se recomienda elegir 1024 canales (en vez de 512) para asegurar la suficiente precisión en las medidas.
2. Los pulsos que llegan al PC son en este caso positivos (debido a la configuración de la electrónica del montaje), tal como se puede observar en el osciloscopio.
3. La amplificación que permite el programa, deberá tener un valor en torno a +5. Este valor puede variarse, pero no deberá variarse a lo largo del estudio.

1.- CALIBRACIÓN DEL DETECTOR (DETERMINAR LA RELACIÓN CANAL/ENERGÍA)

Obtener el espectro de las muestras *estándar* (^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs), así como de otras dos fuentes disponibles en el laboratorio (^{133}Ba y ^{152}Eu) y comprobar la linealidad del espectrómetro. Para ello identificar los 5 picos de las fuentes estándar y la mayor cantidad posible de picos del ^{133}Ba y ^{152}Eu y determinar el canal V donde se sitúa el centro de gravedad de cada pico (Consulta en el manual del CassyLab –disponible en el laboratorio y en la web en la sección de Links- como hacerlo). Ajustarlos a un polinomio de grado 3 (tomar los que sean más claramente identificables). **Las tablas con los picos de emisión de estas muestras están al final de esta práctica.**

Nuestro detector será tanto más lineal cuanto menores sean los coeficientes de grado 2 y 3 de nuestro ajuste polinomial comparados con el coeficiente de grado 1 (si tenemos $E = a + bV + cV^2 + dV^3$, c y d han de ser mucho menores que b). Realizar además un ajuste lineal, y comparar los valores que toman en los picos, comprobando que las diferencias son pequeñas. Para estas muestras se sugiere un tiempo de toma de datos de al menos 5 minutos.

NOTA: Dado que en este caso no haremos una calibración lineal, no usaremos la opción que ofrece el programa para calibrar espectros directamente.

Identificar en los espectros de las muestras de ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{133}Ba y ^{152}Eu proporcionadas una serie de picos fotoeléctricos y determinar los canales correspondientes a sus centroides. Obtener la relación que permita la calibración de la muestra problema mediante un ajuste a un polinomio de grado 3.

NOTA: El polinomio de grado 3 obtenido será el que se utilice con los espectros desconocidos para la conversión voltajes-energías. Tener en cuenta a la hora de escoger picos que la emisión de la muestra afecta a los materiales estructurales y protectores del detector, haciendo que éstos emitan, convirtiéndose en fuentes de fondo que en ausencia de la muestra emisora no existían (véase el punto 3 anterior).

[2] – Representar la gráfica del ajuste y las constantes obtenidas del ajuste a un polinomio de grado 3. ¿Cuanto se desvía la energía tabulada del ^{137}Cs con la que se obtiene a partir del ajuste? ¿Qué energía le corresponde al canal $V=0$? (En el caso de ser lineal, debería ser $E=0$)

2 . –OBTENCIÓN DEL ESPECTRO GAMMA DEL ²²⁶Ra

Colocamos una vez calibrado el detector, la fuente de ²²⁶Ra frente al CZT y registramos su espectro con una configuración del programa similar a las anteriores.

En este caso se recomienda un tiempo de adquisición alto (Mas de 20') que permita obtener un espectro suficientemente nítido y con poco ruido estadístico.

Recordemos que las desintegraciones nucleares son un proceso aleatorio (no determinista), y por tanto, la medida de un determinado número de cuentas a lo largo de un cierto período de tiempo, tiene asociado un cierto error estadístico.

El número de desintegraciones nucleares por unidad de tiempo de una fuente de radiación sigue en general una distribución de Poisson. Esto es debido a que la desintegración en un período de tiempo de un núcleo en concreto es un suceso poco probable, pero a su vez, existe un gran número de núcleos candidatos a desintegrarse en una muestra. El error estadístico según la distribución de Poisson para una medida $N(p)$ es igual a la raíz cuadrada de $N(p)$. Por ejemplo, si en un canal tenemos asignadas 100 cuentas, debemos tomar como medida (100 ± 10) . Por tanto, el error estadístico relativo de las medidas disminuirá según $\frac{\Delta N}{N} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$.

3. - OBTENCIÓN DEL ESPECTRO DE FONDO

Es conveniente tomar un espectro de fondo (sin fuentes) para después poder restárselo al obtenido en el apartado anterior. Si se toma durante el mismo tiempo que el de la muestra en estudio, se puede hacer fácilmente. (Consultar el apéndice con las notas del CassyLab sobre cómo hacerlo). Como **tarea adicional** se puede tratar de identificar alguno de los picos (véase [1], Págs. 714-720).

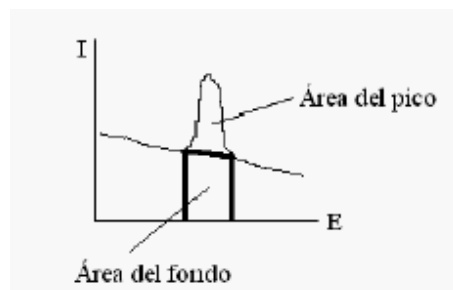
Una vez adquirido, se lo restamos al espectro de la fuente de ²²⁶Ra. Se verá que el fondo afecta principalmente en la zona de bajas energías (canales bajos).

[3] - Adjuntar en el cuestionario final la gráfica del espectro gamma obtenido una vez restado el fondo. Basta simplemente con imprimir la imagen de la pantalla (pulsando alt+impr pant o Botón derecho del ratón sobre el espectro obtenido en el laboratorio con el CassyLab y seleccionar Copiar Ventana). Si se desea se puede guardar el espectro en formato texto (Guardar Como → *.txt) y representar después con algún programa como gnuplot, Origin o Excel.

4. – COMPARACIÓN DEL ESPECTRO OBTENIDO EXPERIMENTALMENTE CON EL TEÓRICO.

A) Estudio de la Energía de los picos - Identificar en el espectro una serie de picos fotoeléctricos y determinar los canales V correspondientes a sus centroides. A partir de la calibración obtenida, $E = a + bV + cV^2 + dV^3$ determinar a qué energías corresponden. Comparar estos resultados con los de los rayos gamma más intensos que se originan en la cadena de desintegraciones de esta muestra y que fueron determinados en el estudio teórico preliminar. Aunque no es sencillo, intentar identificar algunos de los picos.

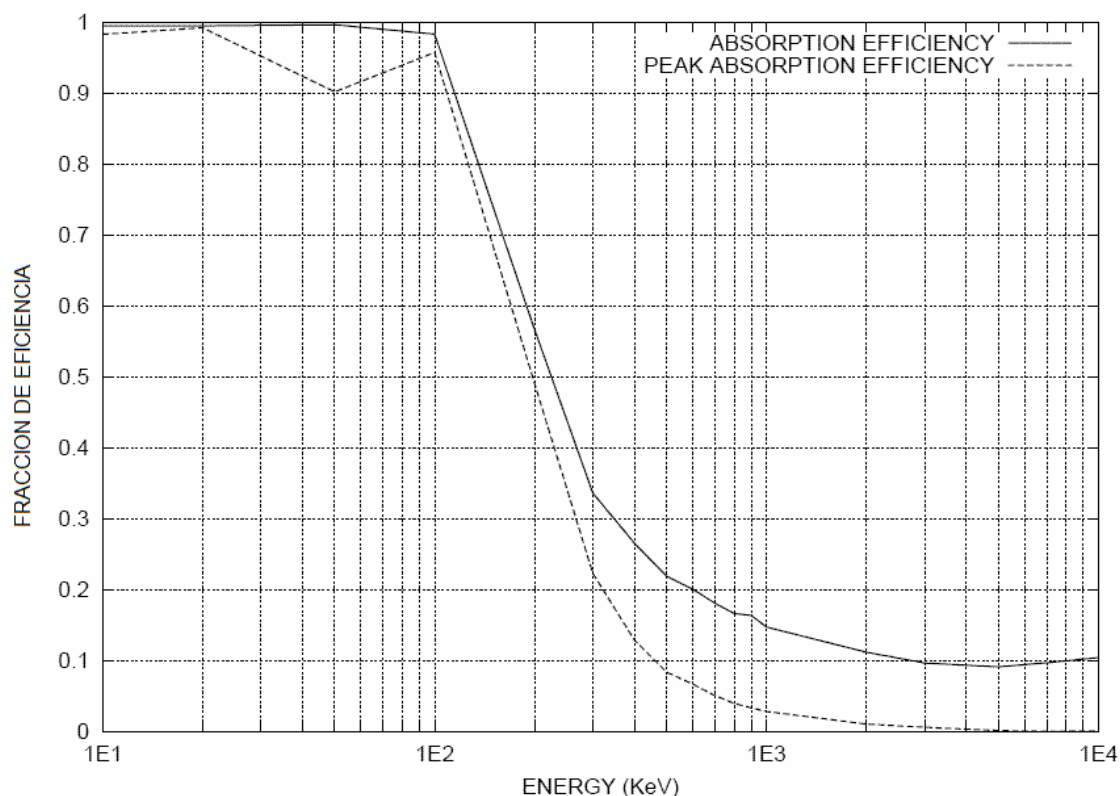
B) Estudio de las intensidades de los picos– Las intensidades de cada pico están relacionadas con actividades relativas de los distintos núcleos existentes en la muestra. Para ver esas intensidades, debemos medir el número de cuentas que hay en cada pico fotoeléctrico. Consulta en el manual del Cassylab de la sección de Links cómo hacer estos ajustes.



El número de cuentas en cada pico se calcula integrando las áreas bajo los picos, procurando no contar el fondo. Por tanto, lo que hay que determinar es el área del pico, no la total. Esto se hace fácilmente seleccionando la opción adecuada del programa. (Menú → Evaluar Integral → Area de Pico).

NORMALIZACIÓN DEL ESPECTRO GAMMA

Para un correcto análisis de un espectro gamma hay que tener en cuenta la eficiencia fotoeléctrica del centelleador (procesos de interacción fotoeléctrica que se dan por cada fotón que le llega), depende de la energía, por lo que para obtener la intensidad relativa de los fotopicos de la muestra a partir de las intensidades detectadas por el centelleador, hay que corregir por este efecto. (Los picos fotoeléctricos a energías mayores aparecen menos intensos debido a este efecto). La eficiencia fotoeléctrica del centelleador viene dada en la siguiente gráfica (véase [1], página 322):



- Estudiar si existe equilibrio secular. En este caso, las actividades de los distintos núcleos ($\text{Actividad} = \text{Probabilidad} \times N^{\circ} \text{ de núcleos}$) se habrían igualado. Teniendo en cuenta las probabilidades de desintegración de cada especie, comparar las poblaciones de los núcleos de las distintas especies que contribuyen al espectro gamma registrado con lo obtenido en la práctica alfa (si se ha realizado también ésta) y lo esperado teóricamente. Comparando por último las áreas entre sí (la IR en % de un pico será el cociente $100 \times (\text{área pico}) / (\text{suma de las áreas de los picos})$).

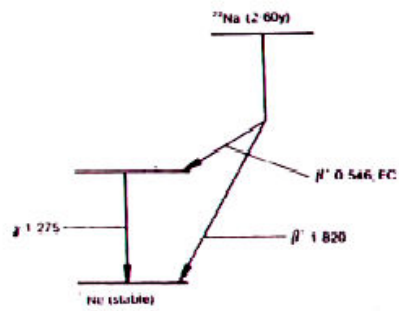
[4] Realizar una tabla con una serie de picos del espectro, en la que se incluya la información de su energía (obtenida con el espectro calibrado) y el número de cuentas antes y después de la normalización.

LABORATORIO DE NUCLEAR – GUIÓN DE PRÁCTICA GAMMA – CURSO 2006/2007

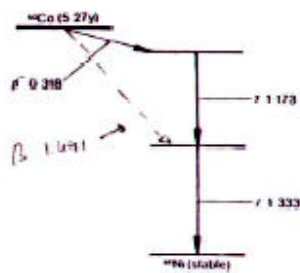
Tablas con las características de emisión de las muestras estándar.

FUENTE	ENERGÍA (keV) DEL GAMMA EMITIDO
²² Na	511(Aniquil. Positrón)
²² Na	1275
⁶⁰ Co	1173
	1333
¹³⁷ Cs	662
¹⁵² Eu	122
	245
	344
	411
	440
	778
	870
	960
	1090
	1110
	1210
	1240
	1410
¹³³ Ba	80
	81
	161
	223
	276
	303
	356
	384

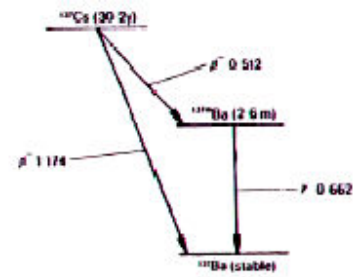
LABORATORIO DE NUCLEAR – GUIÓN DE PRÁCTICA GAMMA – CURSO 2006/2007



	Half-life	β^- energy MeV	Transition Probability %	γ energy MeV	emitted %	converted %
^{22}Na	2.60 years	0.546	90.49	0.511**	(from 1 st)	
		1.820	0.05	1.275	99.95	
		EC	9.46			



	Half-life	β^- energy MeV	Transition probability %	γ energy MeV	emitted %	converted %
^{60}Co	5.27 years	0.318	99.9	1.173	99.86	0.02
		1.491	0.1	1.333	99.98	0.01



	Half-life	β^- energy MeV	Transition Probability %	γ energy MeV	emitted %	converted %
^{137}Cs	30.2 years	0.512	94.6			
$^{137\text{m}}\text{Ba}$	2.6 minutes	1.174	5.4	0.662	85.1	9.5

APÉNDICE A – ELEMENTOS QUE AFECTAN A LA FORMA DEL ESPECTRO

1.- ESPECTROS GAMMA

Para la realización de la práctica conviene repasar el apartado de espectros gamma de las notas de introducción al laboratorio de nuclear.

Conviene, sobre todo recordar que la interacción del fotón con un electrón del cristal sigue básicamente los 3 siguientes procesos: 1) absorción fotoeléctrica, 2) dispersión Compton y 3) creación de pares:

1.- El proceso que interesa que ocurra en el cristal para poder conocer el espectro de emisión de rayos γ de la fuente es el **efecto fotoeléctrico**, ya que los fotones absorbidos por efecto fotoeléctrico dejan toda su energía en el cristal. Por tanto si la fuente emite fotones monoenergéticos, el pico fotoeléctrico es el que corresponde a mayor energía depositada. El resto de los procesos suponen un fondo de detección para energías menores o iguales que la del pico fotoeléctrico que hay que eliminar en la medida de lo posible para poder analizar el espectro.

2.- Así, cuando un fotón interacciona por efecto Compton pierde sólo parte de ésta siendo dispersado con un cierto ángulo, θ , con una probabilidad que viene dada por la fórmula de Klein-Nishina (véase [2], Págs. 55-57). De ella se obtiene la distribución en energías cinéticas T de los electrones Compton, deducible de

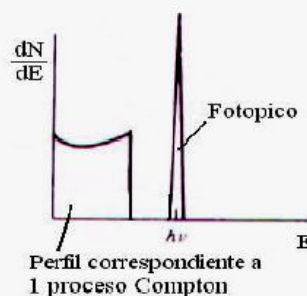
$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{\pi \cdot r_e^2}{m_e c^2 \gamma^2} \left[2 + \frac{s^2}{\gamma^2 (1-s)^2} + \frac{s}{1-s} \left(s - \frac{2}{\gamma} \right) \right]$$

siendo r_e el radio clásico del electrón, $\gamma = \frac{h\nu}{m_e c^2}$ y $s = T / h\nu$.

Existe una energía máxima que puede perder el fotón en una interacción Compton (correspondiente a dispersión $\theta = 180^\circ$), de modo que se tiene este fondo Compton hasta dicho valor máximo de la energía. Haciendo el cálculo para colisión con un electrón libre, el valor es:

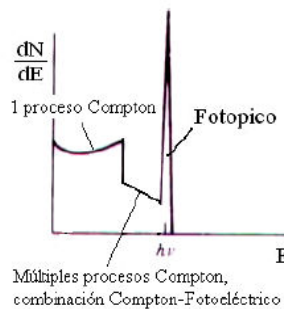
$$T_{\max} = h\nu \left(\frac{2\gamma}{1+2\gamma} \right)$$

El espectro Compton tiene esta forma:



LABORATORIO DE NUCLEAR – GUIÓN DE PRÁCTICA GAMMA – CURSO 2006/2007

Tras la dispersión, el fotón secundario puede bien escapar del centelleador sin más interacciones, bien ser absorbido por efecto fotoeléctrico o sufrir una nueva dispersión Compton. Estos dos últimos casos, más probables cuanto mayor sea el detector, alteran el perfil del fondo correspondiente a una interacción Compton, y permiten al fotón incidente perder más energía que la posible mediante 1 sólo proceso Compton, prolongando de este modo el fondo a valores mayores de la energía y deformando el perfil Compton.



Otro factor que suaviza los perfiles mostrados son los procesos de detección y amplificación que tienen lugar en el fotomultiplicador, que son procesos cuánticos, regidos por leyes probabilistas (estadísticas).

3.- El proceso de creación de pares en el rango de energías de este trabajo ($E = 1.3$ MeV) no tiene relevancia debido a la escasa probabilidad de que suceda a bajas energías (cuanto mayor es la energía del fotón mayor es la sección eficaz de producción de pares (proporcional a la probabilidad de que ocurra dicho proceso)).

Resumiendo, el espectro de la energía total depositada correspondiente a una única línea de emisión tiene una forma característica consistente en un pico estrecho (pico fotoeléctrico) más un perfil continuo que abarca desde energía cero hasta un valor (borde Compton) correspondiente a la máxima energía que el fotón puede ceder en una colisión Compton (dispersión con 180 grados), modificado por procesos de interacción múltiples. La aparición de este continuo dificulta a menudo la interpretación del espectro y se han desarrollado diversas técnicas experimentales para su eliminación, aunque suele ser la principal fuente de incertidumbre. En cualquier caso para espectroscopía de fotones y se deben emplear detectores que presenten una sección eficaz de absorción fotoeléctrica importante.

2.- FONDO EN AUSENCIA DE MUESTRA EMISORA

La presencia en los materiales y en el aire de emisores radioactivos, y el bombardeo de rayos cósmicos, produce un espectro de fondo que se suma al de cualquier muestra, y que se debe eliminar. Cuando el detector está fuertemente blindado (por Pb, por ejemplo) contra radiaciones que no provengan de la muestra, sólo lo penetra la componente dura de los rayos cósmicos y la radiación que emite el recubrimiento del detector, mientras que cuando el detector no está apenas blindado cobran importancia el resto de las fuentes naturales, dominando usualmente los rayos cósmicos el espectro de fondo (véase [1], Págs. 714-720). En esta práctica, los detectores no están blindados, por lo que se observará un fondo bastante importante a bajas energías.

LABORATORIO DE NUCLEAR – GUIÓN DE PRÁCTICA GAMMA – CURSO 2006/2007

NOTAS SOBRE LA DETECCIÓN DE RAYOS GAMMA:

[1] G. F. Knoll *Radiation Detection and Measurement*, Wiley 1979

[2] W. R. Leo *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag 1987.

[3] Kenneth S. Krane, *Introductory Nuclear Physics*, John Wiley & Sons 1988.

También se pueden consultar las páginas correspondientes de la web del laboratorio:

<http://nuclear.fis.ucm.es>