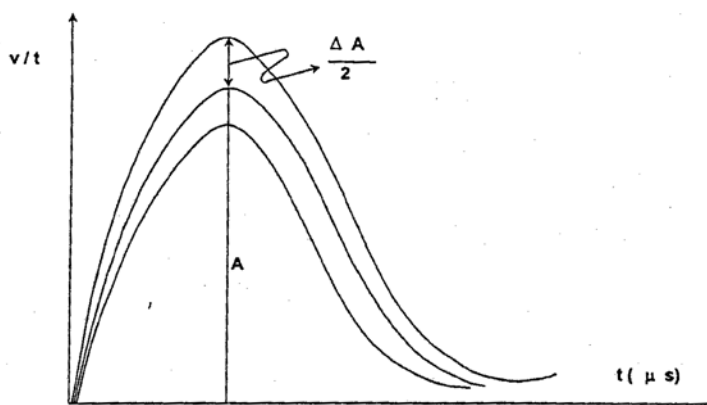


## MODULO 4 ESPECTROMETRIA GAMMA

### ESPECTRO DE ENERGIAS

Ya se ha visto que, cuando la radiación gamma penetra en un detector de centelleo (cristal centellador con fotomultiplicador asociado), puede sufrir interacciones de tipo fotoeléctrico, Compton o producción de pares, dejando en él toda su energía, o parte de ella. El conjunto cristal de centelleo y tubo fotomultiplicador, proporciona una señal eléctrica de salida. Para determinar el espectro de energía de un dado emisor, se debe contar con un dispositivo que entregue una respuesta proporcional a la energía de la radiación incidente. Si analizamos esta señal eléctrica mediante un espectrómetro, se observará una distribución continua, debido que existen fracciones de energías absorbidas en el cristal por interacción Compton, además se observará uno o más puntos de conteje predominante a causa de la absorción total de energía por efecto fotoeléctrico (absorción total de energía).

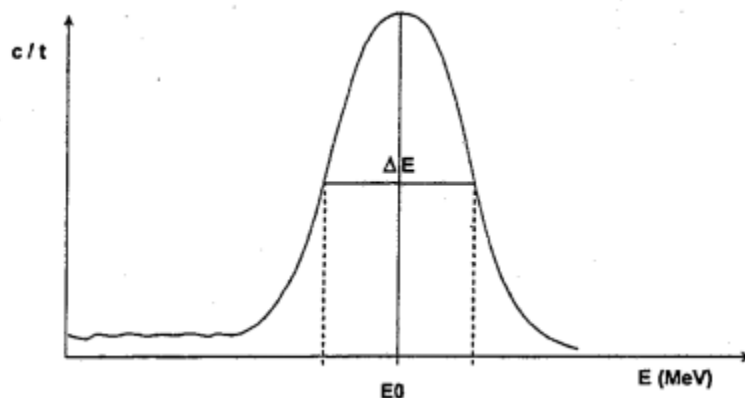
Si incide en un detector de centelleo un haz de fotones monoenergéticos, este acusará su absorción por medio de un conjunto de pulsos, en principio de igual amplitud. Sin embargo, experimentalmente se puede observar a la salida del fotomultiplicador un conjunto de pulsos cuya amplitud varía en un valor  $A \pm \frac{\Delta A}{2}$



Esta variación de amplitudes se debe a las fluctuaciones estadísticas que ocurren en los procesos involucrados en el sistema centellador-fotomultiplicador siendo los principales:

- Los fotoelectrones producidos en la interacción son emitidos en diferentes direcciones, por lo cual los fotones fluorescentes se producen en diferentes partes del volumen y llegan al fotocátodo directamente, por reflexión o son absorbidos en el centellador alterando su estadística.
- No todos los fotones producen el mismo número de fotones luminiscentes dado que no todos interactúan con el mismo número de átomos.
- Los fotones fluorescentes tienen distinto recorrido en el cristal.
- El número de electrones producidos en el fotocátodo por fotón incidente es variable.
- Cada fotoelectrón puede producir un número diferente de electrones secundarios en las etapas de multiplicación del fotomultiplicador.

Como consecuencia de la fluctuación en la altura de los pulsos, el analizador registra un cierto número de estos de diferentes amplitudes. Se obtiene así una distribución de alturas o espectro de pulsos, que tiene la forma aproximada de una campana de Gauss. Al canal correspondiente al máximo se le asigna la amplitud  $E_0$  del pulso, debido a la energía total absorbida. El ancho del pico a mitad de altura  $\Delta E$  es una medida de la fluctuación de la amplitud de pulsos y depende de la energía absorbida.



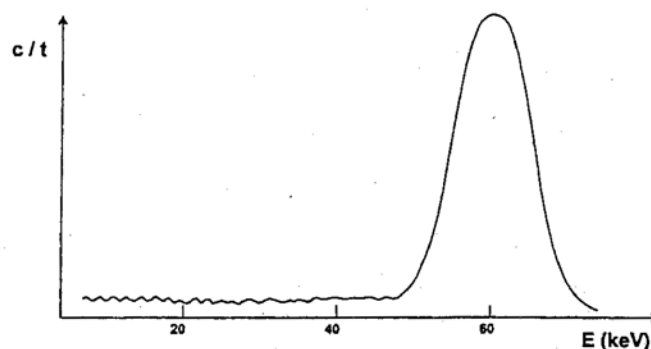
## RESOLUCION DE UN DETECTOR

Una importante propiedad de un detector para su uso en espectrometría es la capacidad para poder discriminar partículas ionizantes de energía muy próximas entre sí. Se define en consecuencia, para un detector de centelleo dado, la resolución para una determinada energía como el ancho a mitad de altura dividido la amplitud, expresada porcentualmente. La resolución es un parámetro adimensional. Cuanto menor sea el valor de la resolución de un dado detector, mejor diferenciará energías de valores cercanos entre sí.

Para el cálculo de la actividad de la fuente emisora es necesario conocer el área bajo la gaussiana (fotopico). Se utiliza para ello el concepto de banda de integración, tomándose en general  $2\sigma$  a ambos lados del máximo, lo que nos da el 95% del área.

## Forma del espectro para radiación electromagnética hasta 100 keV

Para un rango de energías entre 10 y 100 keV, el efecto fotoeléctrico es preponderante. Ocurrido este, el fotoelectrón es absorbido completamente en un espesor muy pequeño del cristal de  $\text{INa(Tl)}$ .



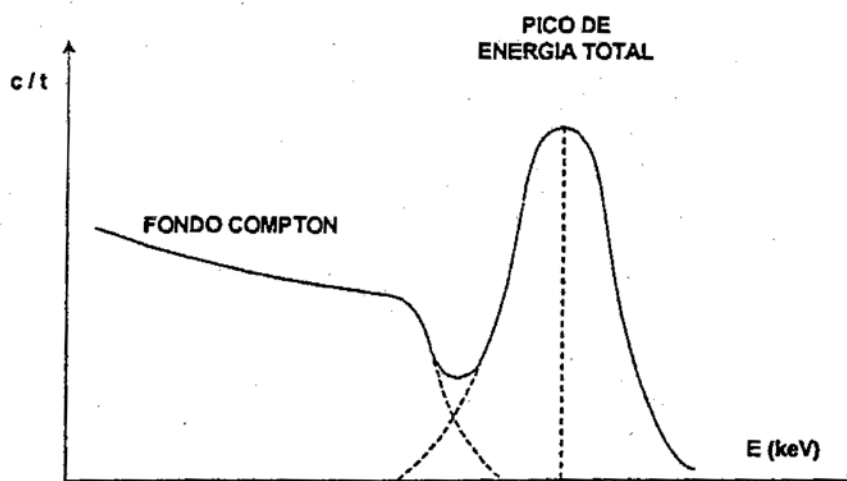
## Forma del espectro para radiación electromagnética entre 0,1 y 1 MeV

Para energías superiores a 0,1 MeV, el Efecto Compton es apreciable, siendo preponderante para energías superiores a 1 MeV. Por lo tanto, algunos fotones incidentes pueden interactuar por Efecto Compton, otros por Efecto Fotoeléctrico y otros no interactuar. Los que interactúan por Efecto Compton, dan lugar a la emisión de un fotón secundario dentro el cristal que puede: escapar del cristal, interactuar por Efecto Fotoeléctrico o producir nuevamente Efecto Compton con la consiguiente producción del fotón secundario que generando una secuencia de sucesivas combinaciones de Efecto Compton termine en la absorción final por efecto fotoeléctrico.

Todos estos procesos dan lugar a una absorción total o parcial de la energía incidente. Como consecuencia, a la salida del fotomultiplicador se observan pulsos correspondientes a la energía total absorbida y pulsos correspondientes a la absorción parcial.

Cuando el analizador clasifica estos pulsos por su altura se obtiene un pico de energía total  $E$  y un espectro continuo llamado fondo Compton.

Existe además una zona del espectro que se denomina borde Compton y está dada por la máxima energía que el fotón incidente puede transmitirle al electrón (ángulo  $\theta = 180^\circ$ ).



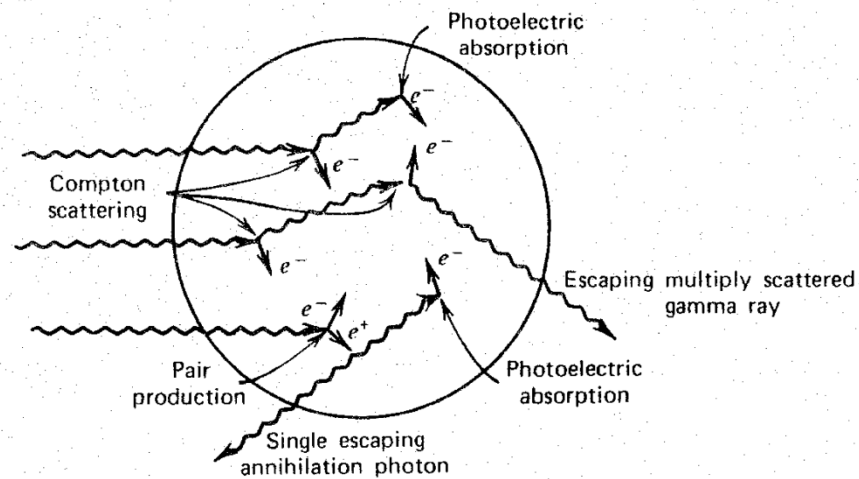
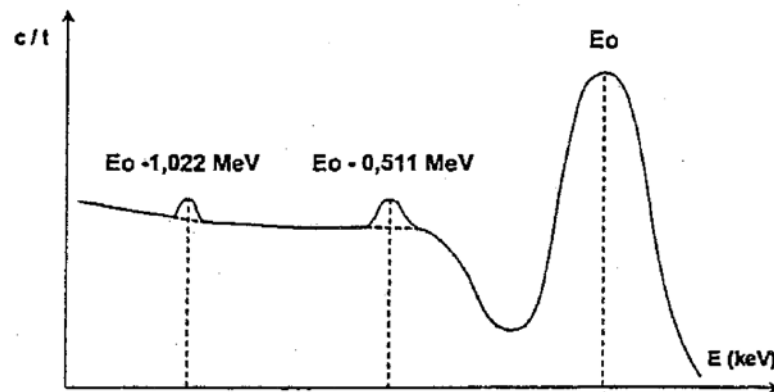
### Forma del espectro para energías superiores a 1,022 MeV

En este rango de energías existe ya la probabilidad de interacción por formación de pares por lo tanto, el haz de fotones incidentes puede interactuar por cualquiera de los tres procesos conocidos: fotoeléctrico, Compton y formación de pares.

En este último caso, cuando el positrón llega al reposo, se aniquila dando lugar a dos radiaciones de 0,511 MeV, pudiendo estas ser absorbidas dentro del cristal en forma parcial o total.

Los pulsos producidos por estas interacciones dan lugar a tres picos de amplitudes bien definidas:

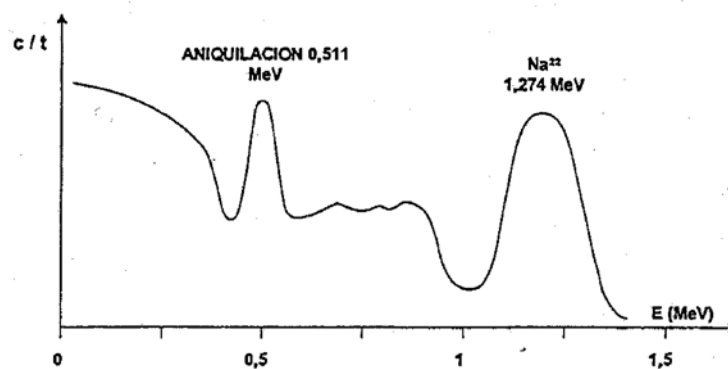
- Un pico que corresponde a absorción total de energía y que además está formado por contribución Compton y fotoeléctrico por lo que es el más intenso.
- Un segundo pico debido al escape de una radiación de aniquilación que corresponde a una energía  $E_0 - 0,511$  MeV.
- Un tercer pico debido al escape de las dos radiaciones de aniquilación que corresponde a una energía  $E_0 - 1,022$  MeV.



### Espectro acompañado por radiación de aniquilación

Si los fotones incidentes tienen energía superior a 1,022 MeV, existe la probabilidad que la radiación gamma interactúe por formación de pares, generando un positrón que al interactuar con el medio o el cristal dará lugar a radiación de aniquilación.

Si una de ellas es detectada por el cristal el analizador dará cuenta, además del pico de energía total y del fondo Compton, de un pico cuya energía es 0,511 MeV.



### Pico por detección de radiación retrodispersada

Además de penetrar en el cristal radiación primaria proveniente de la fuente radiactiva, también penetra radiación secundaria generada por interacción Compton de la primera en las inmediaciones del cristal (fotones secundarios).

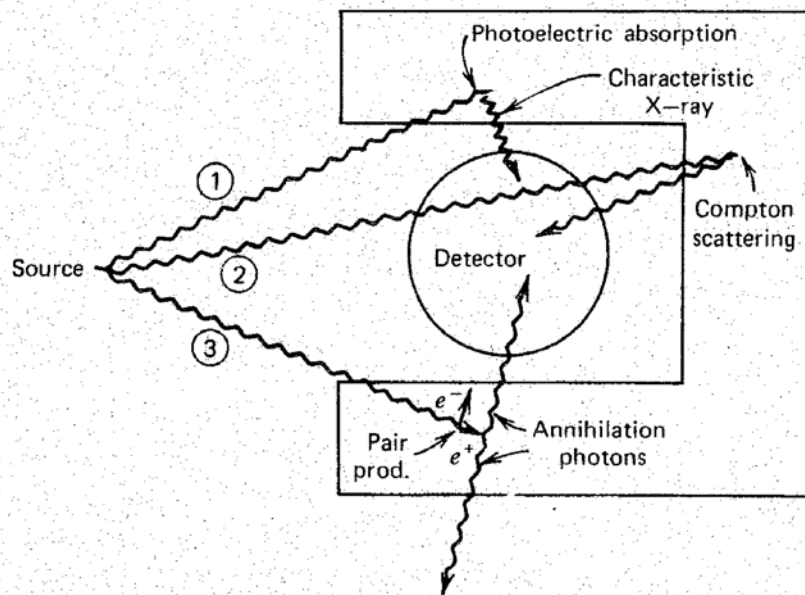
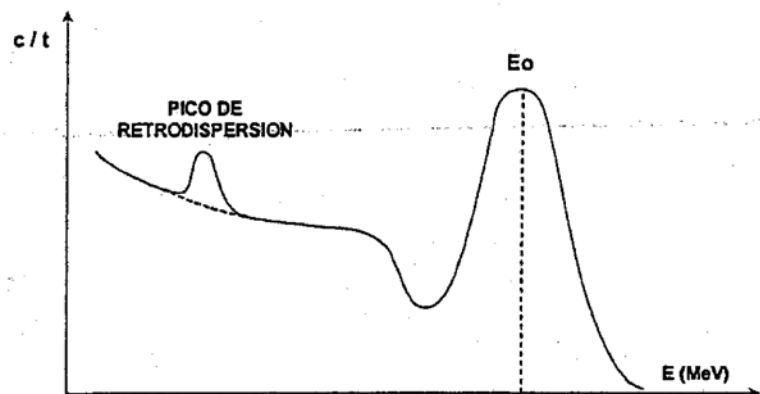
Estos fotones tienen una energía que depende del ángulo  $\theta$  con respecto a la dirección principal del fotón primario dada por:

$$E = \frac{E_0}{1 + \alpha (1 - \cos \theta)} \quad \text{con} \quad \alpha = \frac{E_0}{0,511 \text{ MeV}}$$

Si solo consideramos los fotones retrodispersados entre  $180^\circ$  y  $150^\circ$  y una energía de 0,661 MeV (Cs137), reemplazando  $E_0$  y  $\theta$  en la formula anterior se obtiene:

$$0,185 \text{ MeV} < E < 0,194 \text{ MeV}$$

lo que indica que los fotones retrodispersados tienen una energía aproximadamente igual dentro de una diferencia de tan solo 10 keV, dando lugar a pulsos de una amplitud relativamente constante por lo que el analizador acusará un pico de energía promedio de 0,19 MeV.

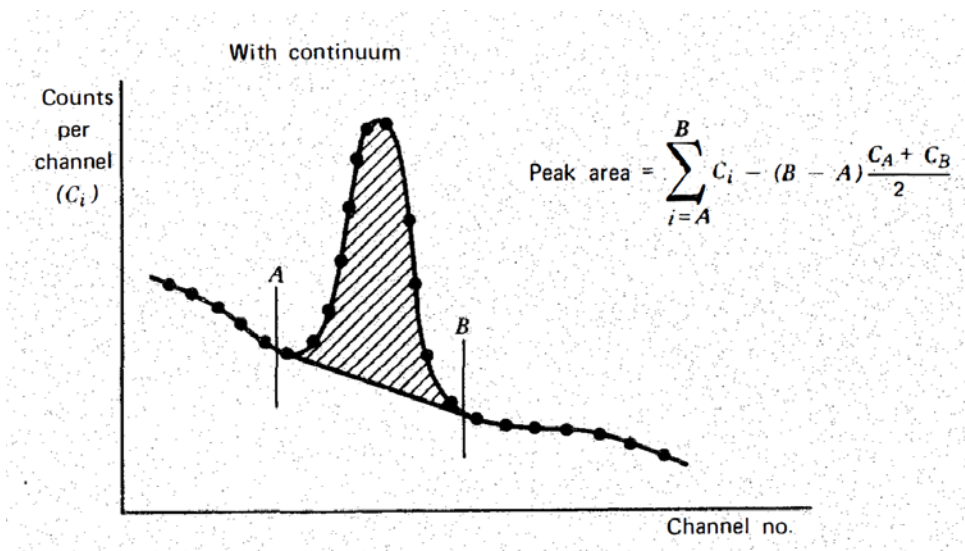


## DETERMINACIÓN DEL ÁREA DEL FOTOPICO

No siempre es una tarea sencilla determinar el número de eventos que contribuyen a un pico de absorción total de energía (fotopico), debido a que casi siempre se les superpone un continuo (background) causado por muchos de los efectos complicados descritos anteriormente.

Si el fotopico estuviera aislado sin ningún continuo (background) superpuesto, su área se determinaría por simple integración entre los límites determinados. En un analizador multicanal sería una simple suma del contenido de cada canal entre los límites indicados.

Como casi siempre está presente también un continuo (background), algunos conteos no deseados adicionales bajo el fotopico se deberán sustraer. Para ello se debe asumir una forma del background más allá de la región de interés, y luego realizar interpolación lineal entre los valores del background a cada lado del fotopico. Este el procedimiento más fácil y proporcionará una precisión suficiente en la mayoría de los casos.



## ANÁLIZADOR MULTICANAL

El analizador multicanal (MCA) es básicamente un convertidor analógico-digital (ADC) que basa su funcionamiento en el principio de convertir una señal analógica (la amplitud de un impulso proveniente del detector) en un número digital equivalente. Una vez que esta conversión se ha logrado se envía a una PC para almacenamiento y visualización del espectro de altura de pulso correspondiente.

Existen programas de PC que permiten comunicarse con el Analizador Multicanal (MCA). Estos programas tienen herramientas para procesar la información que les llega. Mediante el uso de un cursor y posicionándose en un pico de absorción total de energía (fotopico), el número NETO de cuentas es obtenido rápidamente con una precisión aceptable. Para ello, desde la pantalla, se deberá establecer una región de interés (ROI) en el espectro y, a continuación, interrogar al programa por el valor del Area Neta bajo el fotopico. Este cálculo del Area Neta ya tiene en cuenta la sustracción del background correspondiente.

## TIEMPO MUERTO

En casi todos los sistemas de detección, habrá una cantidad mínima de tiempo que debe separar dos eventos para que se registren como dos pulsos separados. En algunos casos el tiempo límite puede ser fijado por procesos en el propio detector, y en otros casos el límite puede surgir en la electrónica asociada. Esta separación mínima de tiempo se denomina generalmente tiempo muerto del sistema de recuento. Debido a la naturaleza aleatoria de la desintegración radiactiva, siempre hay una probabilidad de que un evento verdadero se pierda porque ocurre demasiado rápido antes que cese un evento precedente. Estas "pérdidas de tiempo muerto" pueden llegar a ser bastante severas cuando se encuentran altas tasas de conteo y cualquier medición precisa hecha bajo estas condiciones deberá incluir una corrección para estas pérdidas.

Durante el tiempo que está "ocupado" digitalizando un pulso, el ADC bloquea la puerta de entrada a los demás pulsos que le llegan del detector. Debido a que el ADC puede ser relativamente lento, altas tasas de conteo resultarán en situaciones en las que la puerta de entrada estará cerrada la mayor parte del tiempo. Se perderá una fracción de los pulsos de entrada durante este tiempo muerto y cualquier intento de medir cuantitativamente el número de impulsos que llegan al analizador debe tener en cuenta los que se pierden durante el tiempo muerto.

Para ayudar a remediar este problema, la mayoría de los MCAs tienen un reloj interno que proporciona un tren de pulsos regulares que son encaminados a través de la misma puerta de entrada al ADC y se almacenan en una posición de memoria especial. Si la fracción de tiempo que el analizador está bloqueado no es excesivamente alta, entonces se puede argumentar que la fracción de pulsos provenientes del detector que se pierden al ser bloqueados por la puerta de entrada es la misma que la fracción de pulsos del reloj que se pierden al ser bloqueados por la misma puerta de entrada. El número de pulsos de reloj acumulados es una medida del "tiempo vivo" del analizador o del tiempo durante el cual la puerta de entrada se mantuvo abierta a los pulsos del detector. Las mediciones absolutas con el MCA pueden basarse en un valor fijo del "tiempo vivo", lo que elimina la necesidad de una corrección por tiempo muerto de los datos obtenidos.