



El núcleo y sus radiaciones

clase 10

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas - UNLP
Instituto de Física La Plata - CONICET
Calle 49 y 115 La Plata





Espectroscopía de altura de pulsos.

La mayoría de los sistemas de medición de radiaciones usados en Medicina Nuclear (y otras ramas) se basa en el análisis de altura de pulsos para determinar las diferentes energías de las radiaciones que inciden sobre el detector.

Espectrometría de altura de pulsos (o energía).

Se utiliza para discriminar radiación de fondo, radiación dispersada, identificar las energías emitidas por radionucleidos, determinar la presencia (y cantidad) de radionucleidos desconocidos, etc.

Es la base de aplicaciones mas complejas, como tomografía PET o imágenes médicas.

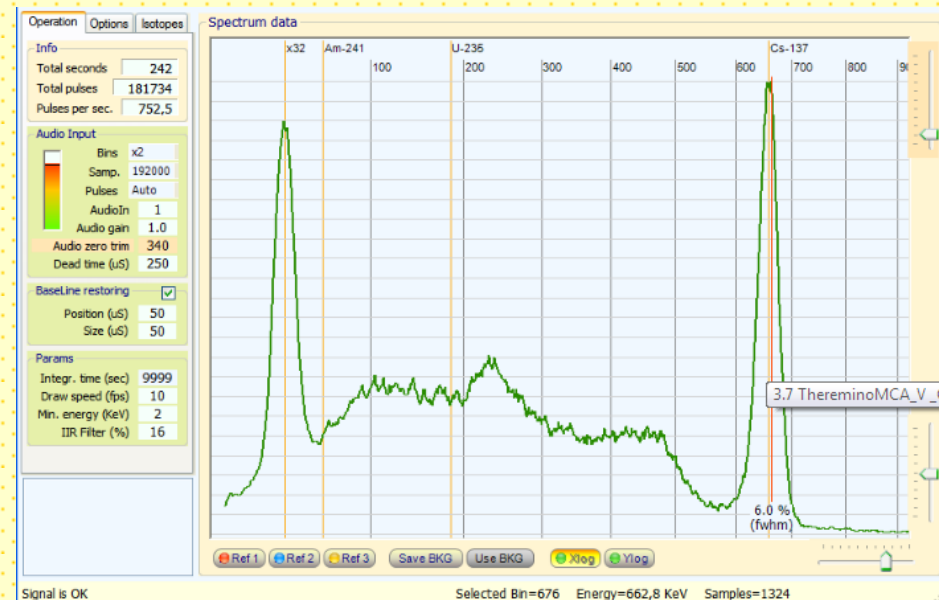
Espectroscopía de altura de pulsos.

La espectrometría de altura de pulsos se utiliza para estudiar la amplitud de cada señal de salida (pulsos eléctricos) de un detector de radiación para determinar las energías de las radiaciones incidentes o seleccionar un rango de energías de interés.

Para esto se requieren detectores que proporcionan señales de salida con amplitudes proporcionales a la energía de radiación detectada.

Un espectrómetro de altura de pulsos (o energía) espectrómetro consiste en el detector, la fuente de alto tensión, preamplificador, amplificador y analizador de altura de pulsos.

Un espectro de altura de pulsos es una gráfica que muestra el número de eventos detectados ("cuentas") versus la amplitud de esos eventos («canales»).





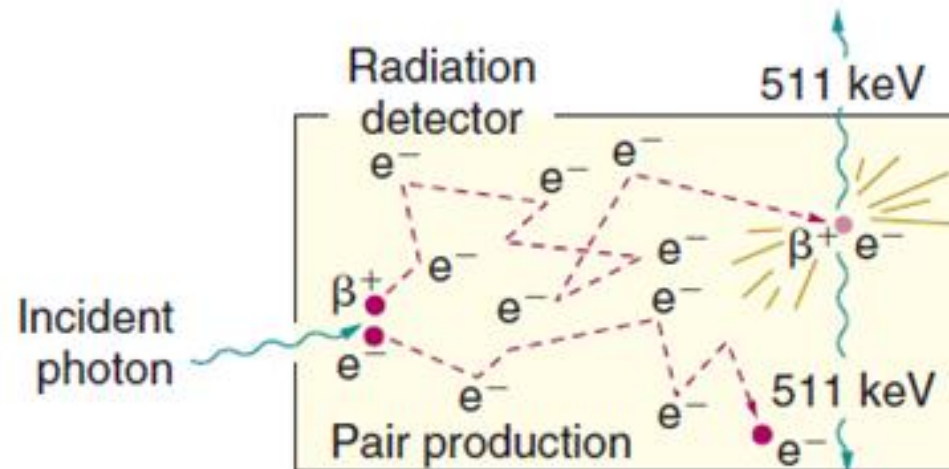
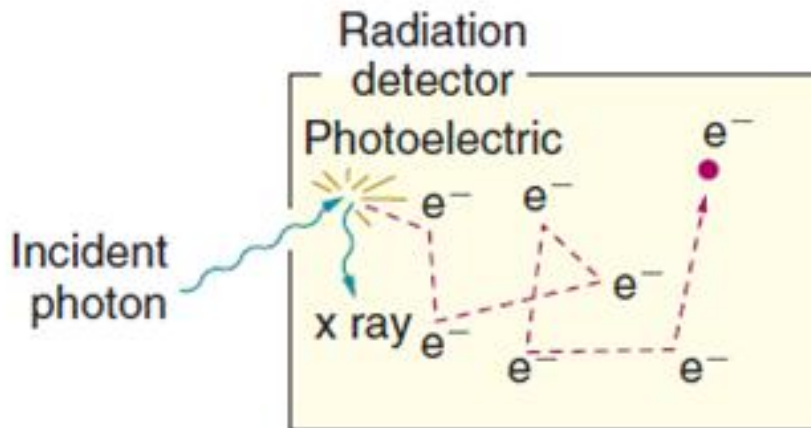
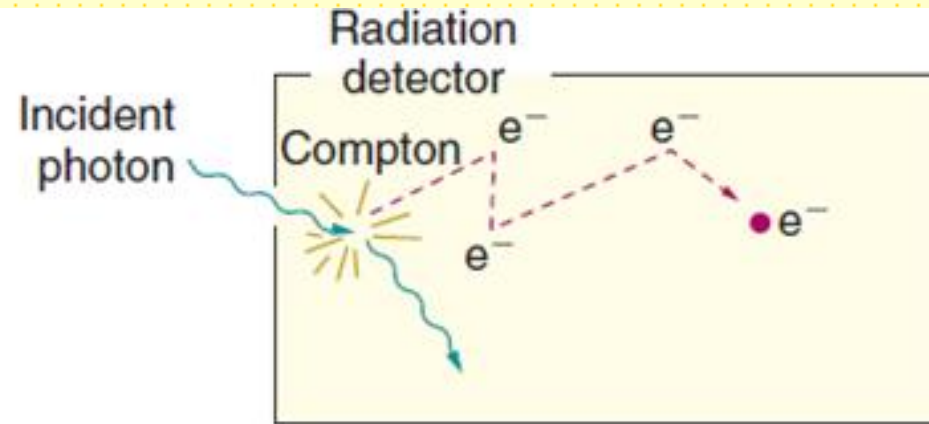
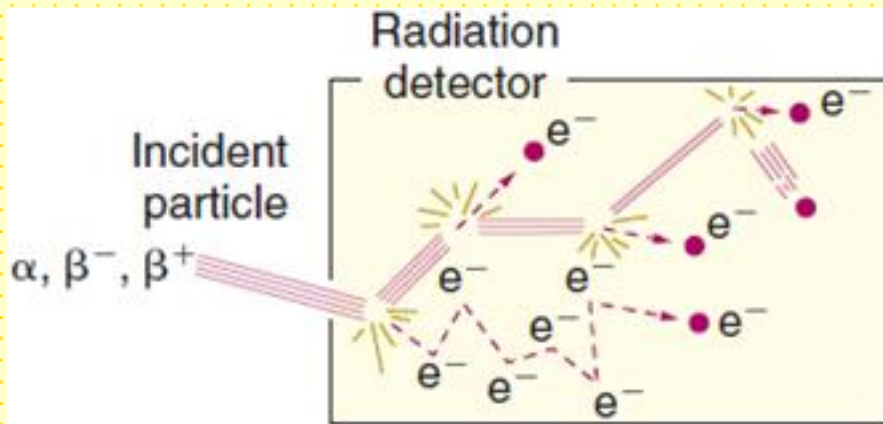
Espectroscopía de altura de pulsos.

El espectro de altura de pulsos depende por supuesto de las energías emitidas por la fuente radiactiva. Y también de:

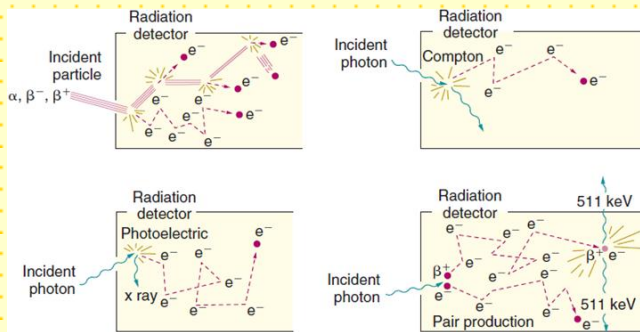
- Tipo del detector utilizado.
- Mecanismos por los cuales la radiación deposita la energía en el detector.

Concepto importante: la amplitud de La señal de un centellador o de un detector semiconductor depende de la cantidad de energía depositada por la radiación en el detector, que puede ser menor a la energía de la partícula o fotón incidente.

Espectroscopía de altura de pulsos.



Espectroscopía de altura de pulsos.



La energía se transfiere al detector por colisiones con electrones atómicos: ionización primaria

Los electrones eyectados pueden tener energía suficiente para causar ionizaciones secundarias (Aproximadamente 80% de la ionización total a partir de ionización secundaria).

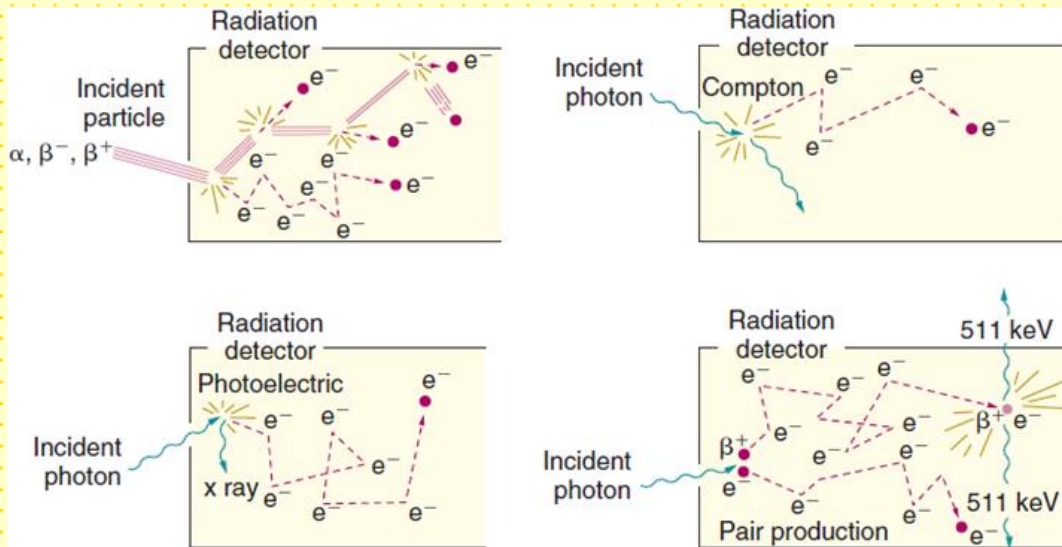
La cantidad total de ionización producida (primaria más secundaria) determina la amplitud de la señal de salida del detector.

Que toda la energía de la partícula incidente se deposite en el detector depende principalmente del rango de la partícula.

Corto rango en sólidos y líquidos: se deposita la totalidad de la energía en el detector. La amplitud de la señal del detector es proporcional a la energía de la partícula incidente.

En detectores gaseosos o detectores muy pequeños no hay espesor suficiente para detener la partícula. Transferencia incompleta de energía. La amplitud de la señal del detector no reflejará la energía total de la partícula incidente.

Espectroscopía de altura de pulsos.



En el caso de los fotones (rayos γ , rayos x, bremsstrahlung), la energía se transfiere al detector por efecto fotoeléctrico, Compton o producción de pares.

Una porción de la energía del fotón se convierte en electrones y fotones secundarios, rayos X o fotones de aniquilación.

Si la energía de los electrones y de las radiaciones secundarias se absorbe totalmente, la amplitud de la señal de salida del detector refleja la energía del fotón incidente.

Si la energía de la radiación secundaria escapa (al menos parcialmente) del detector, no se deposita toda la energía del fotón incidente.

La amplitud de la señal del detector no refleja la energía del fotón incidente.



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Debido a su rendimiento, características y bajo costo el detector centellador de NaI(Tl) [acoplado a un tubo fotomultiplicador o en algunos casos a un fotodiodo] es el detector más utilizado en Medicina Nuclear,

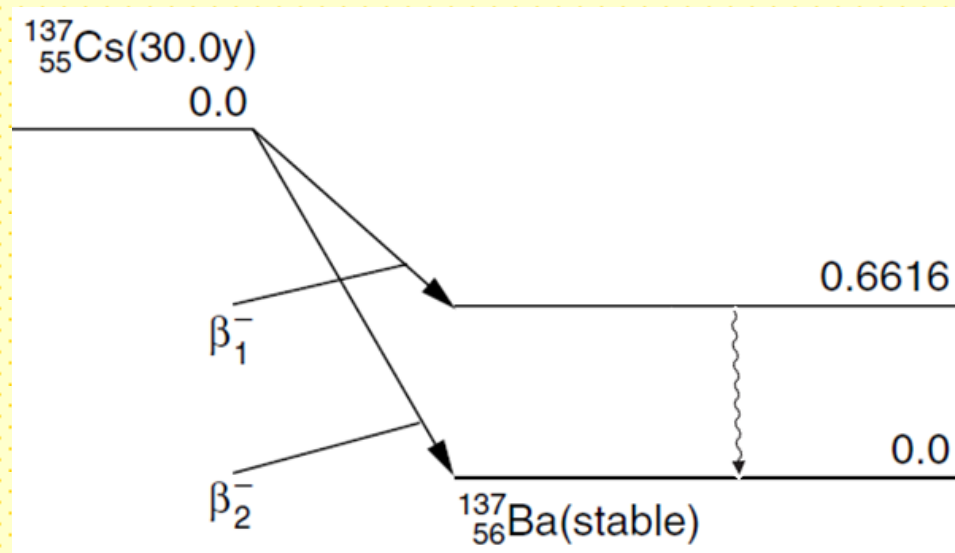
Por este motivo discutiremos los principios básicos de la espectroscopía de altura de pulsos para este detector. Discutiremos luego las diferencias que aparecen al trabajar con otros detectores.

Debido a que el NaI(Tl) se usa casi exclusivamente para detectar fotones (rayos γ o x , principalmente), nos centraremos en la espectrometría de fotones y brevemente discutiremos el caso de detección de partículas α y β .

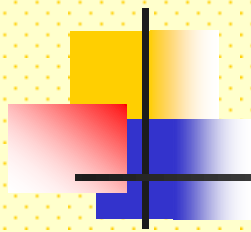
Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Espectro de altura de pulsos. El caso ideal.

Supongamos que una fuente de rayos γ monoenergéticos es colocada frente al detector. Asumiremos además, que la energía de los rayos γ , es menor a 1.022 MeV (no hay formación de pares por el momento).



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

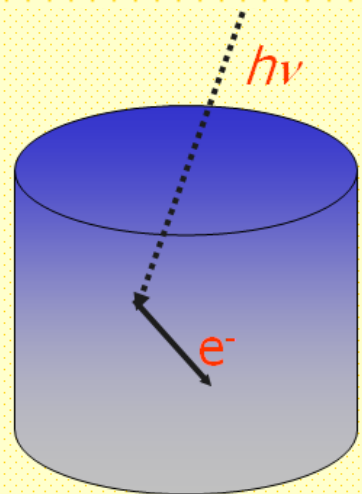


Los procesos de interacción de los rayos γ con el detector serán:

Deposito de la energía total de los rayos γ incidentes (el rayo X característico suele absorberse totalmente en la masa del detector).

Las amplitudes de los pulsos originados en esta interacción son proporcionales a E .

Detector ideal: una sola línea estrecha en el espectro (**fotopico**) en una ubicación correspondiente a la energía de los rayos γ (E_γ)



- Efecto fotoeléctrico

Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Deposito de la energía total de los rayos γ incidentes (el rayo X característico suele absorberse totalmente en la masa del detector).

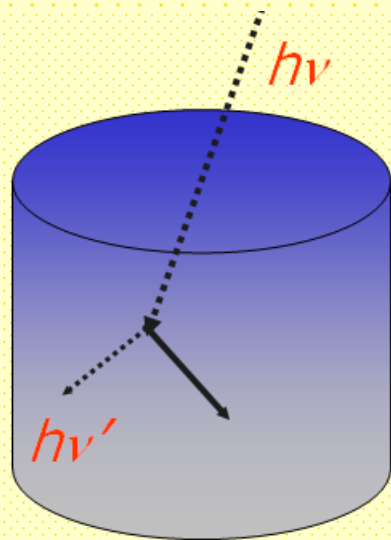
Las amplitudes de los pulsos originados en esta interacción son proporcionales a E .

Detector ideal: una sola línea estrecha en el espectro (**fotopico**) en una ubicación correspondiente a la energía de rayos γ (E_γ)

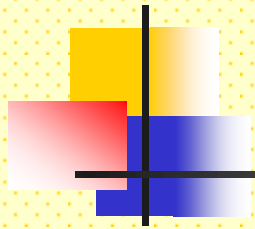
Sólo una parte de la energía de los rayos γ se transfiere al detector a través del electrón de Compton.

Si el rayo γ dispersado también se absorbe en el detector, el evento produce un pulso en el fotopico.

Si el rayo γ dispersado escapa, la energía depositada en el detector es menor que E_γ . La energía depositada en el detector en un único evento de dispersión Compton va desde cero (evento de dispersión de ángulo pequeño) a un valor máximo E_c , correspondiente a la Energía del electrón de retroceso de 180 grados.



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).



El espectro ideal incluye una distribución de continua de pulsos cuyas amplitudes van desde casi cero hasta $E^{m\acute{a}xima}$:

$$E_e^{m\acute{a}xima} = \frac{h\nu^2}{(h\nu + 0.2555 \text{ MeV})}$$

Esta parte del espectro se llama la región Compton y la energía máxima es el borde Compton.

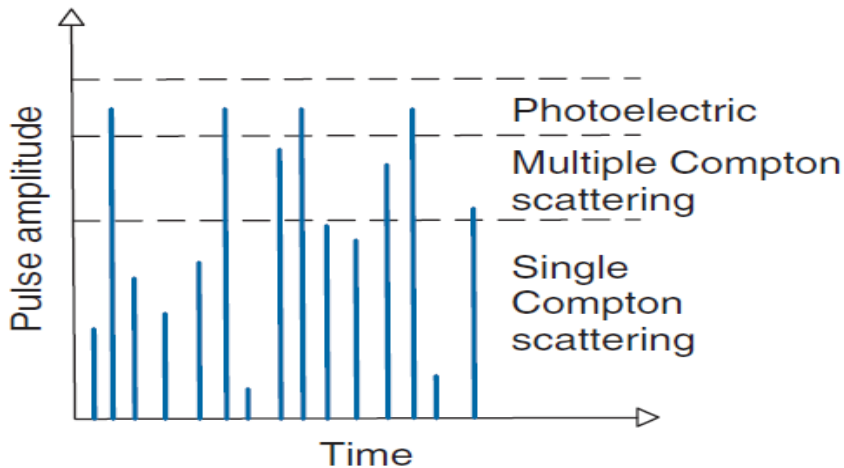
Otra posibilidad es que el rayo γ dispersado experimente dispersiones Compton adicionales en el detector:

Distribución de pulsos en el "valle" entre el borde Compton y el fotopico.

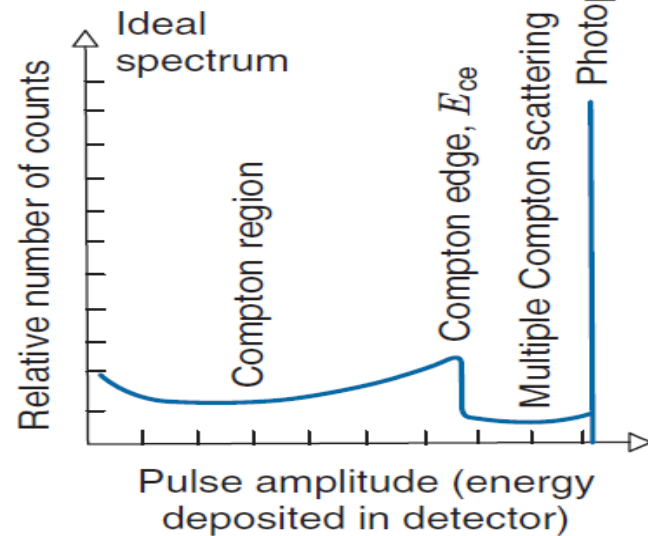
Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

El espectro ideal de altura de pulsos generado por rayos γ monocromáticos tiene la forma

Pulsos de salida del detector que representan los diferentes tipos de interacciones.



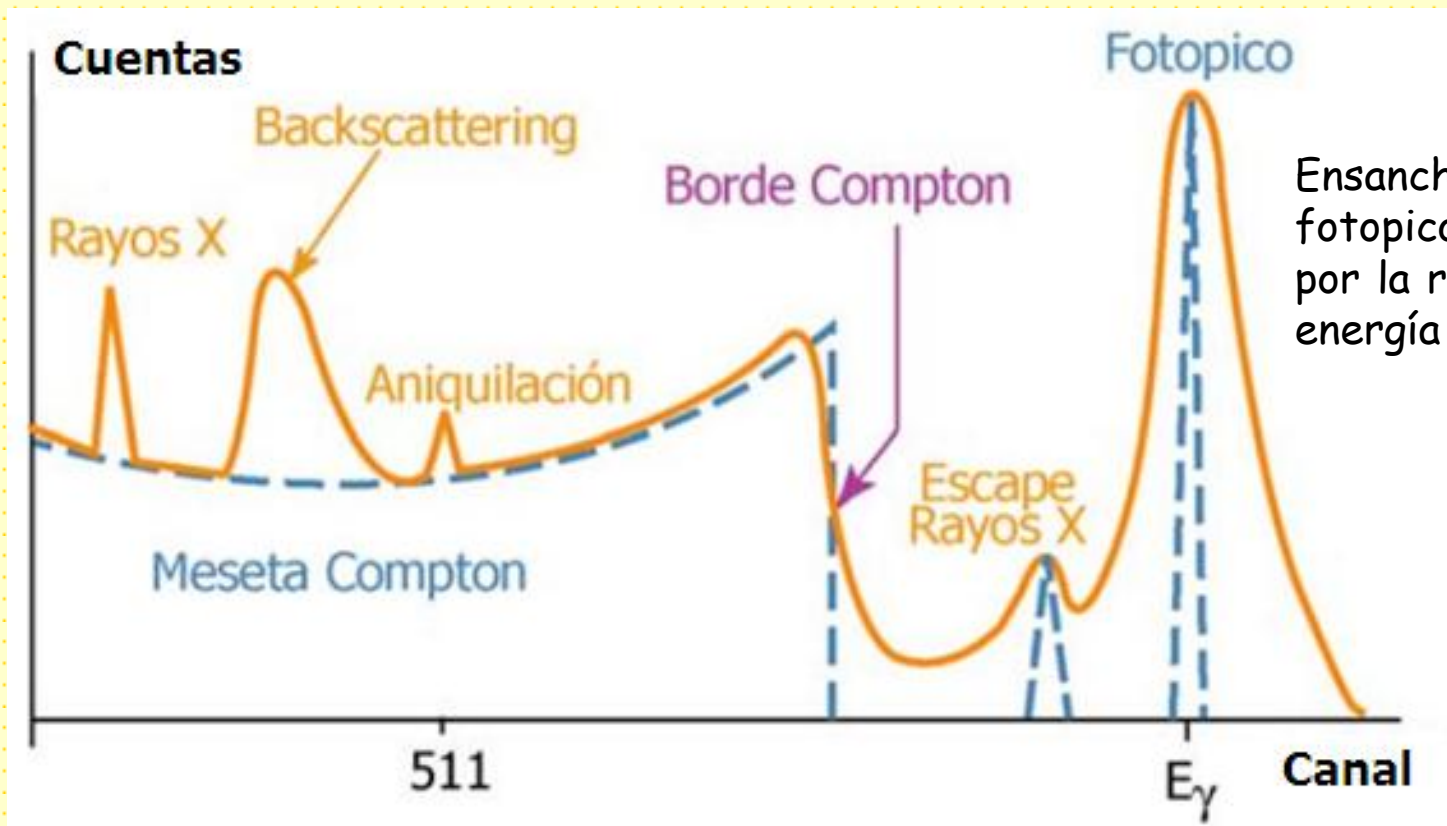
Número de pulsos vs amplitud (o canales).



Recordar que sólo el fotopico representa el depósito de la energía total del γ rayo en el detector.

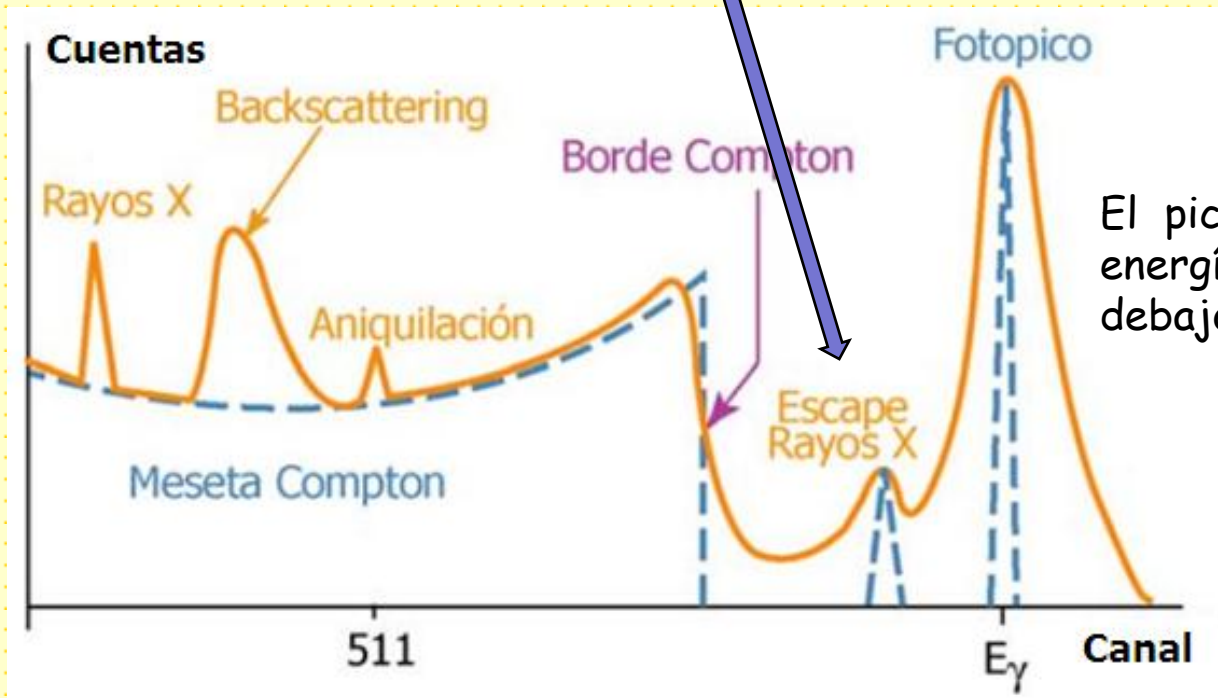
Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

En la práctica, el espectro de altura de pulsos obtenido con un detector de NaI(Tl) es muy diferente al ideal.



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Absorción fotoeléctrica con el I y posterior escape del rayo K-X característico (energía del orden de 30 keV).



El pico aparece a una energía $E_\gamma - 30$ keV por debajo del fotopico.

Rayo X del Ba.

OJO: dependiendo de la energía y la resolución este pico puede no distinguirse del fotopico.

Ejemplo: para 662 keV (^{137}Cs), la resolución del Ina(Tl) es 10% (unos 65 keV). Por lo tanto, este pico NO SE RESUELVE:

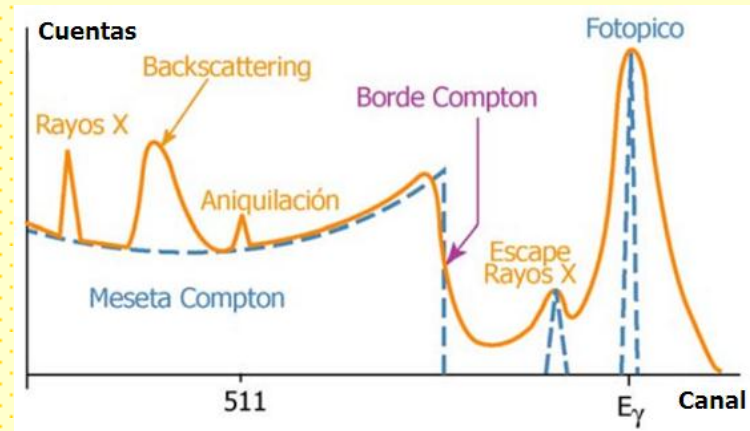
Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Los rayos γ de baja energía son detectados por absorción principalmente en una capa delgada cerca de la superficie de entrada del cristal de NaI (Tl).

Probabilidad razonable de que el rayo X del I escape

Al aumentar la energía del rayos γ incidente, las interacciones tienden a ocurrir a mayor profundidad en el detector.

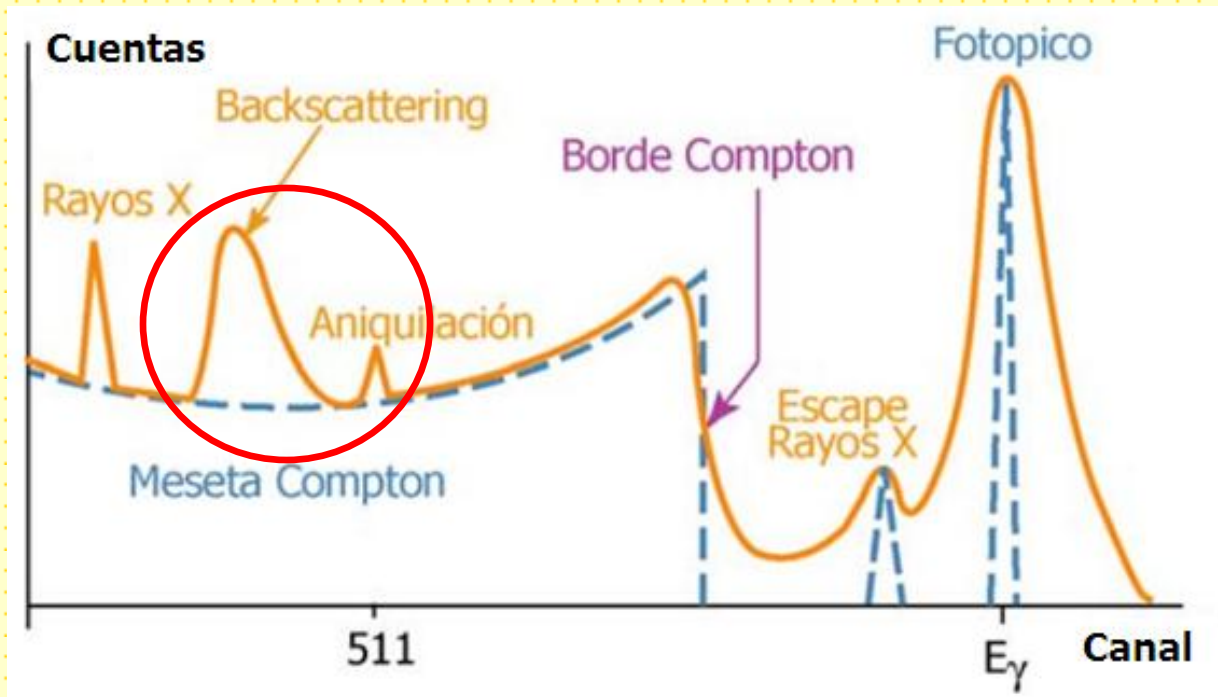
Menor probabilidad de que el rayo X escape.



Además, al aumentar la diferencia de energía relativa entre el fotopico y la energía del rayo X se vuelven más difícil distinguir ambos picos (ejemplo anterior).

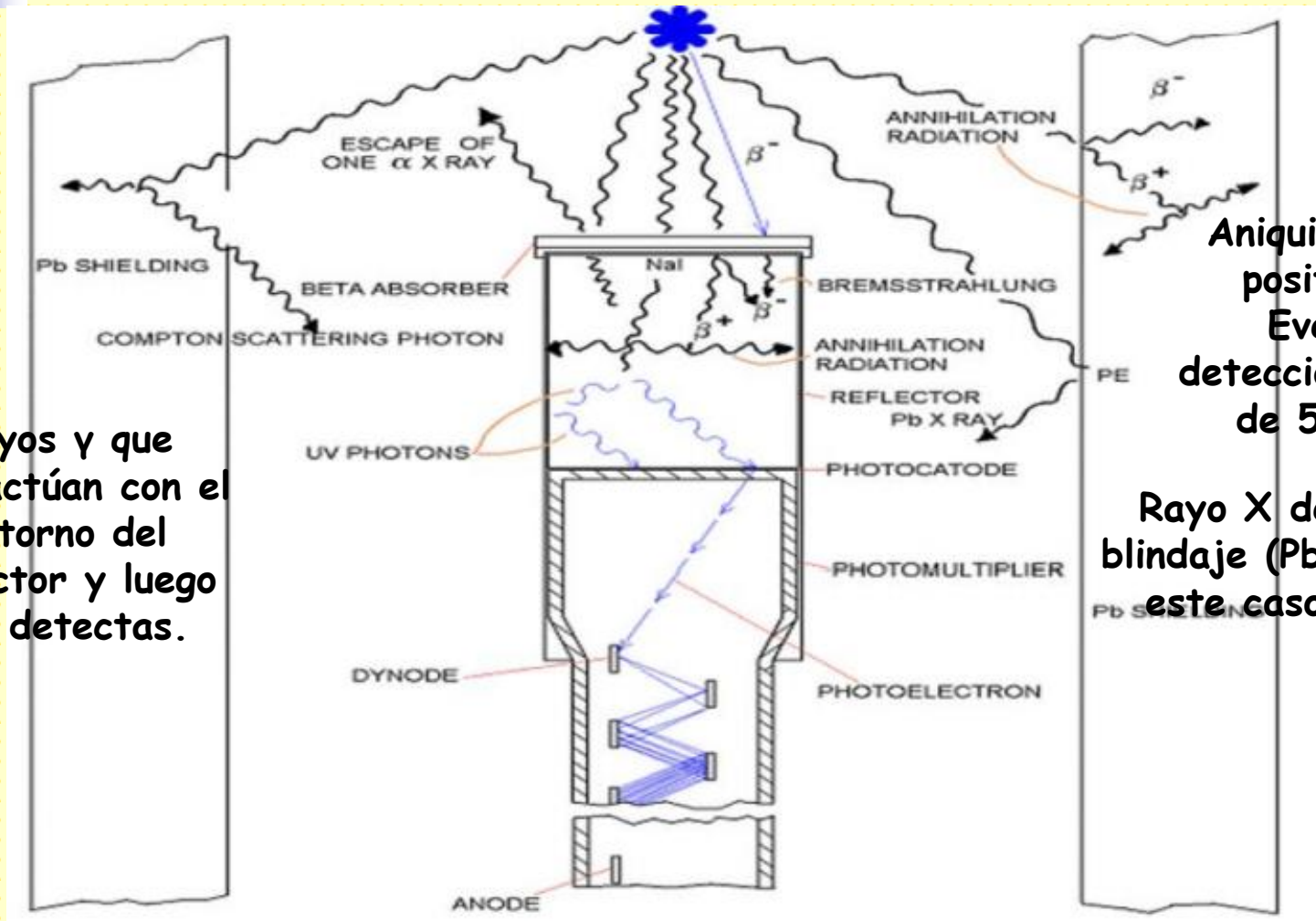
Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Eventos fuera del detector.



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Rayos γ que interactúan con el entorno del detector y luego son detectados.



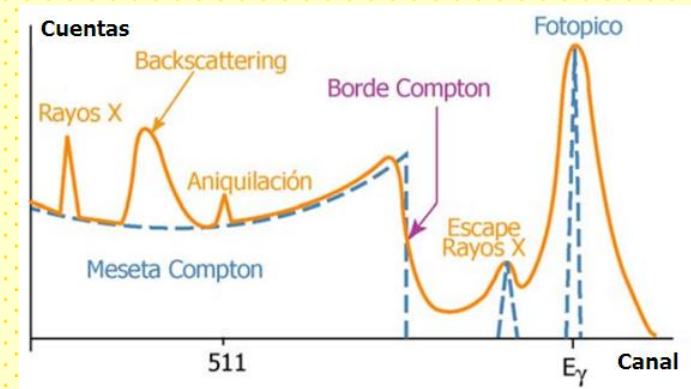
Aniquilación de positrones.
Eventual detección de un γ de 511 keV

Rayo X del blindaje (Pb en este caso)

Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Pico de retrodispersión.

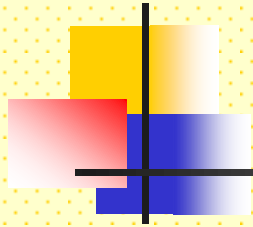
Detección de rayos γ que se han dispersado 180° en el entorno y luego «ingresan» al detector.



Tener en cuenta que la energía a la que se localiza el pico de retrodispersión, E_b , es la energía del rayo gamma dispersado 180° grados, mientras que la energía del borde Compton, E_{ce} , es la energía del electrón Compton en un proceso de dispersión a 180° . Por lo tanto

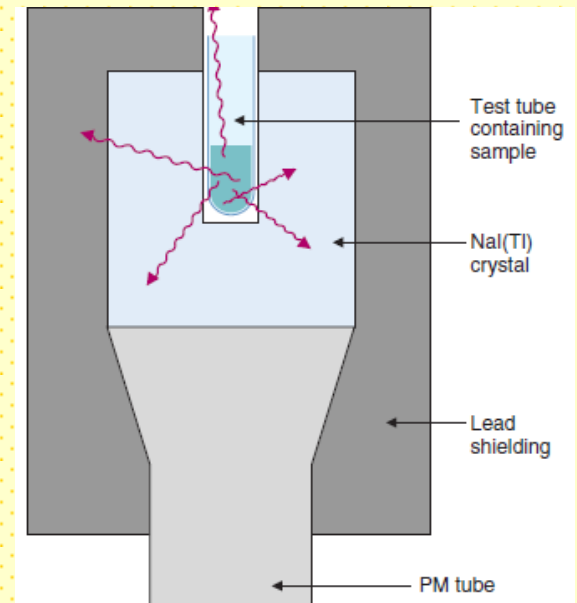
$$E_b + E_{ce} = E_\gamma$$

Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).



Ciertas configuraciones del detector aumentan la intensidad detectada.

Ejemplo: detector de pozo. Un rayo γ tiene cierta probabilidad de atravesar el detector, dispersarse en el entorno y luego ser detectado.

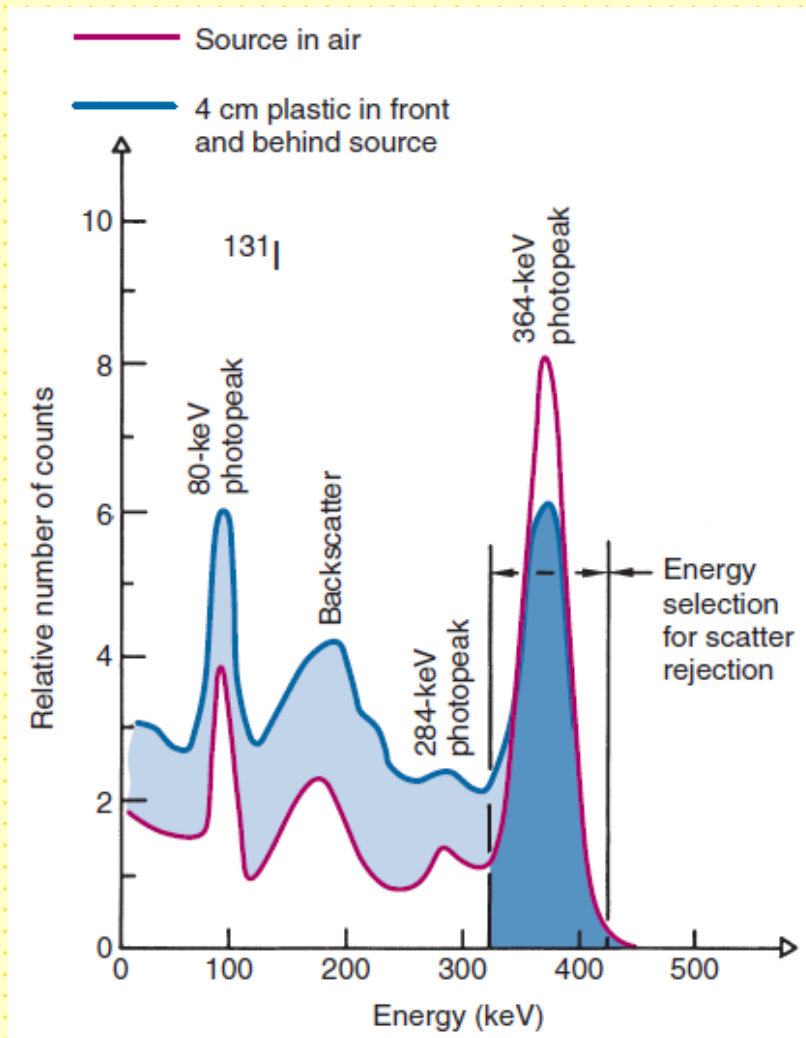


Efecto especialmente importante en mediciones en vivo y en imágenes mediante radionúclido.

Fuerte dispersión de la radiación dentro del paciente.

Es posible discriminar los rayos γ dispersados en el entorno usando un analizador de altura de pulsos para contar sólo eventos en el fotopico.

Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).



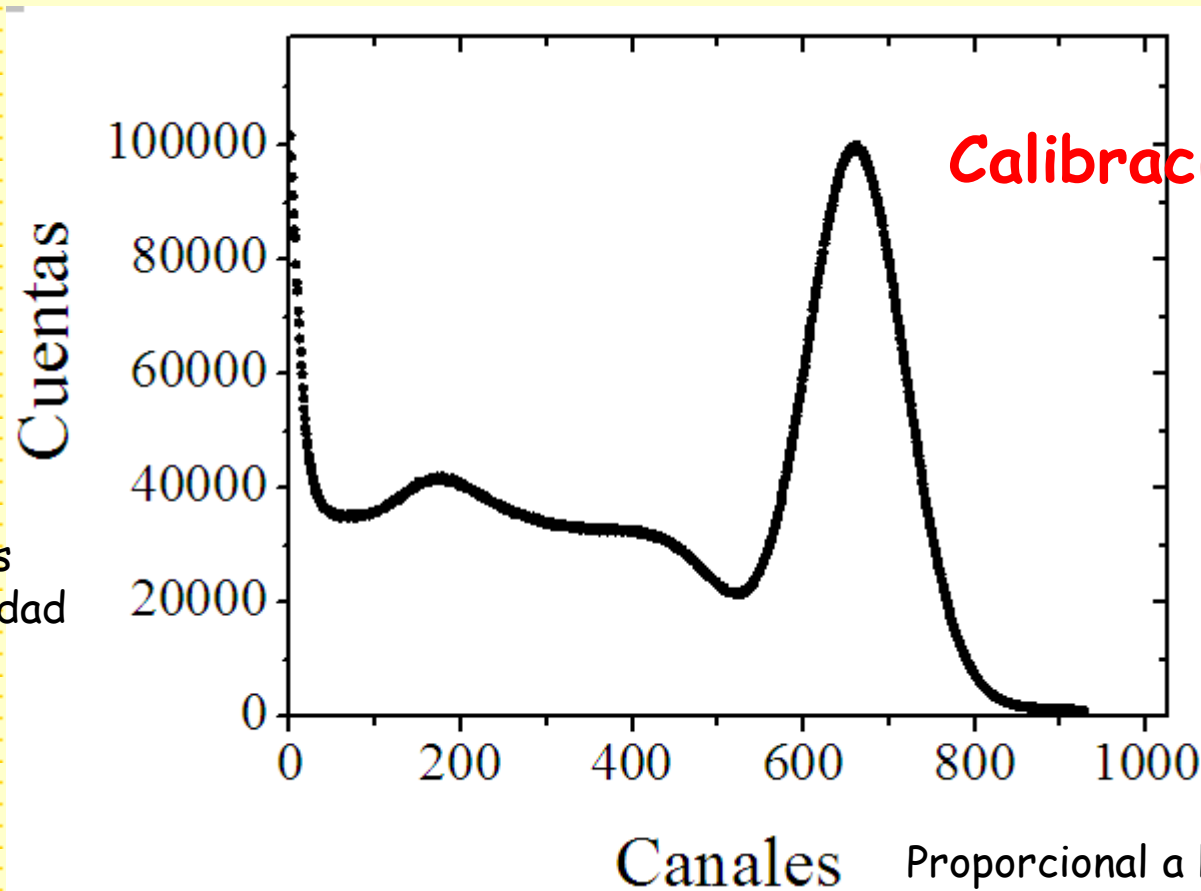


Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Picos de rayos X del Pb se suelen observar en el espectro en el caso en que el Pb se emplea como blindaje.

Originados en la interacción fotoeléctrico del rayo γ incidente con el Pb.
La emisión fotoeléctrica es seguida por la emisión característica de rayos X de 80- to 90-keV, que puede ser detectada.

Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).



Calibraciones!!!!

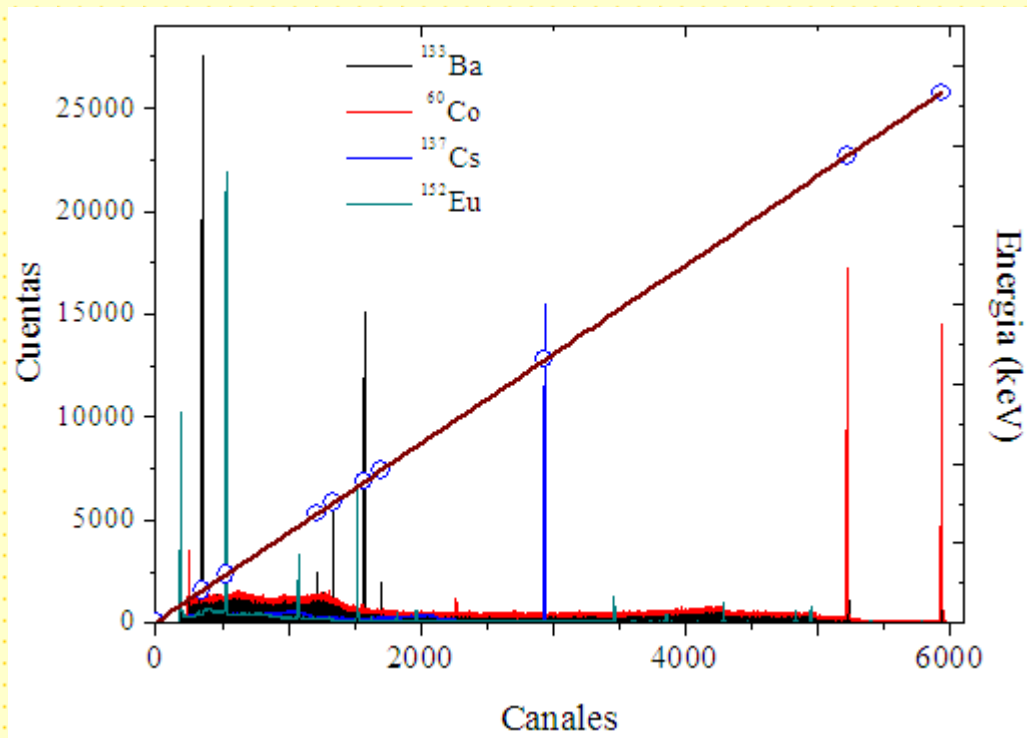
Relacionadas con la actividad

Proporcional a la energía depositada.

Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Ya se discutió la calibración en eficiencia («eje y»).

Se estudia el espectro de altura de pulsos para muestras de energías conocidas. Se relaciona la posición del fotopico (en canales) con las energías emitidas.

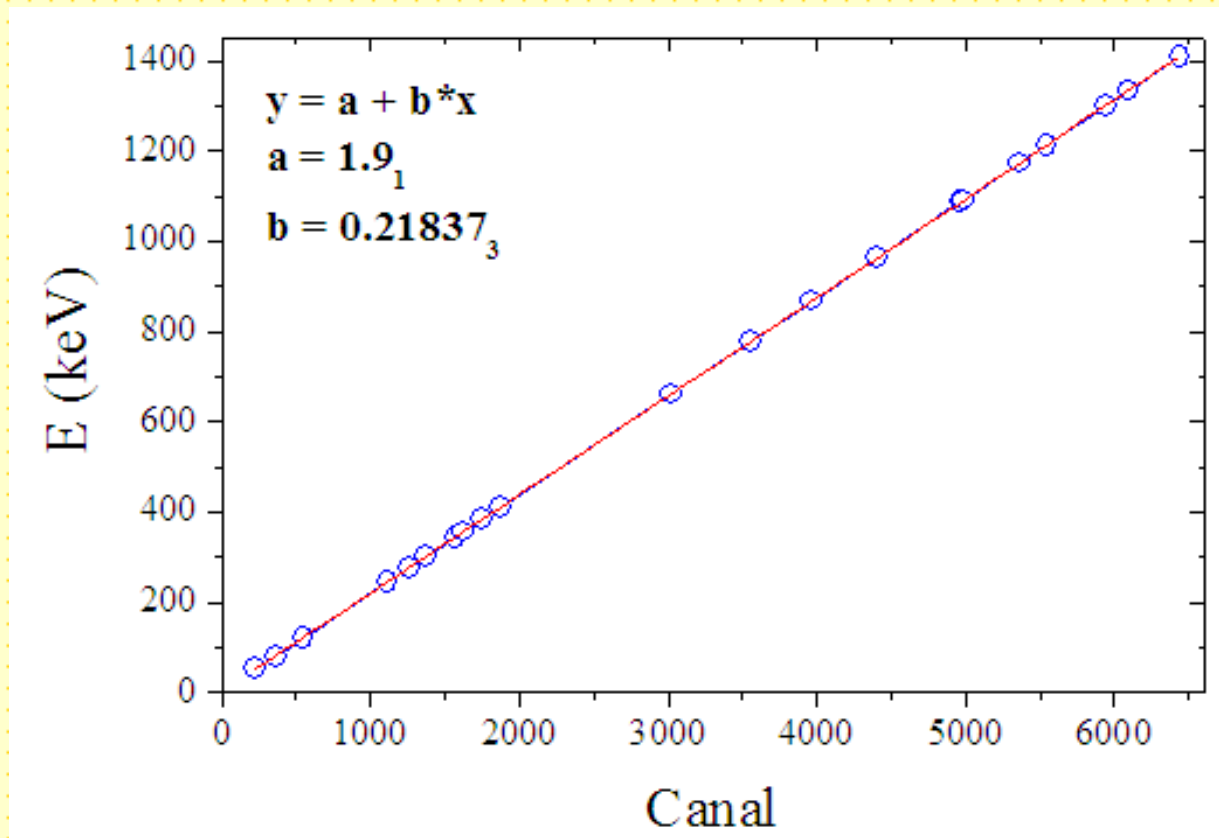


Menos «problemática» que la calibración en eficiencia. Sólo se deben conservar las condiciones del equipo (voltaje aplicado, ganancias, etc.).

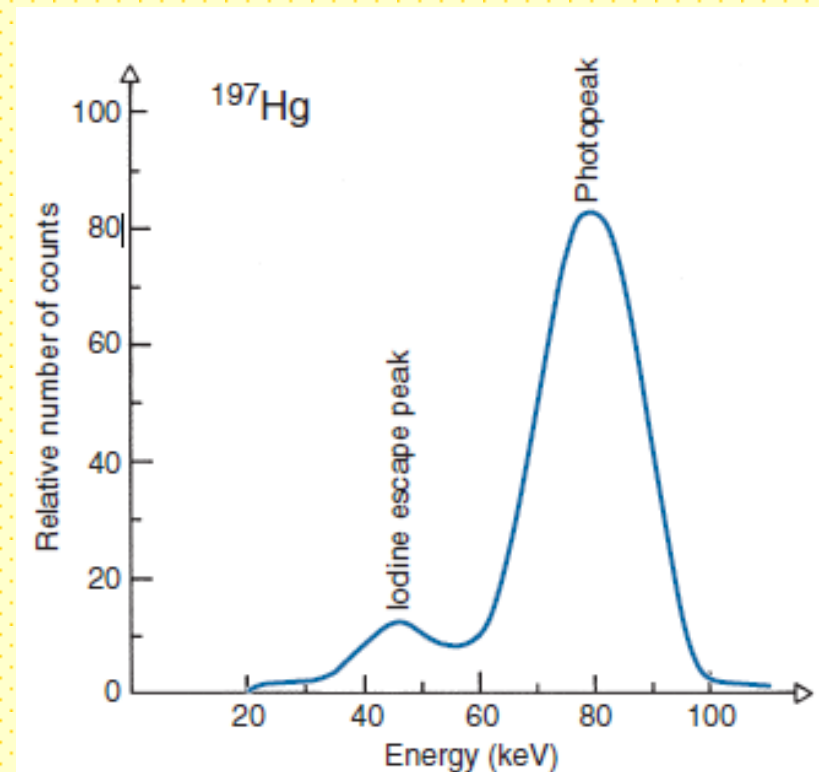
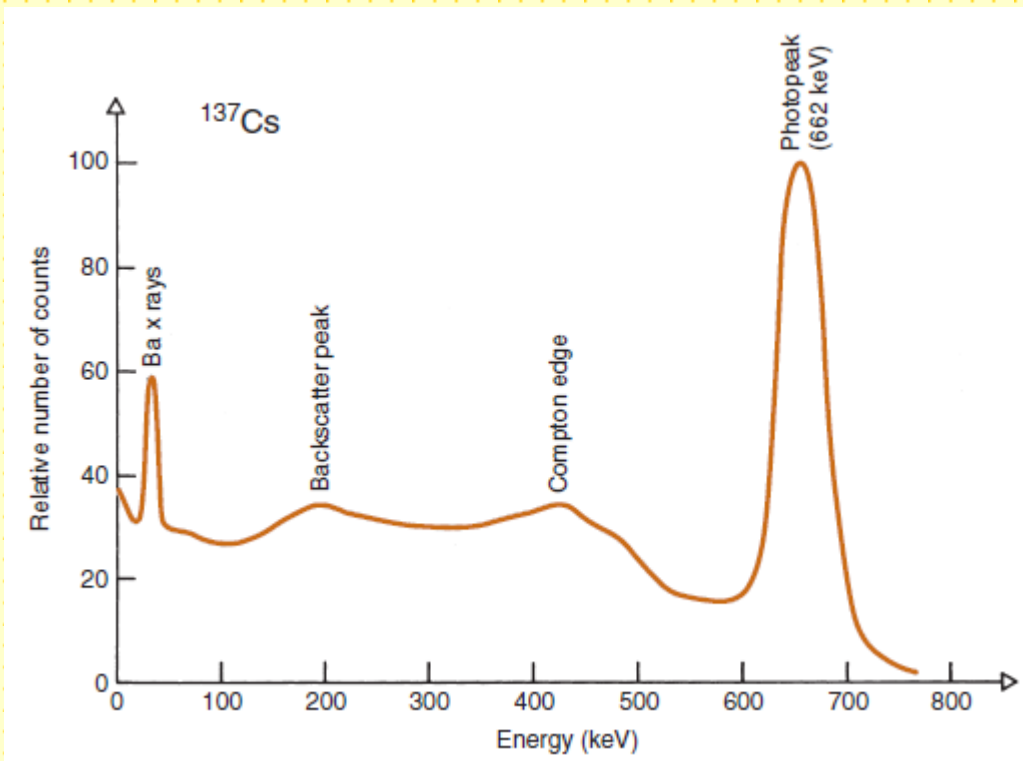
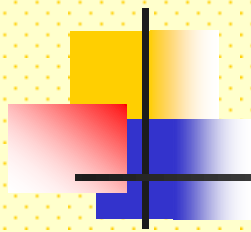
Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Recta de calibración.

Los detectores de Ina(Tl) presentan este comportamiento lineal en el rango de energía 0.2-2 MeV.

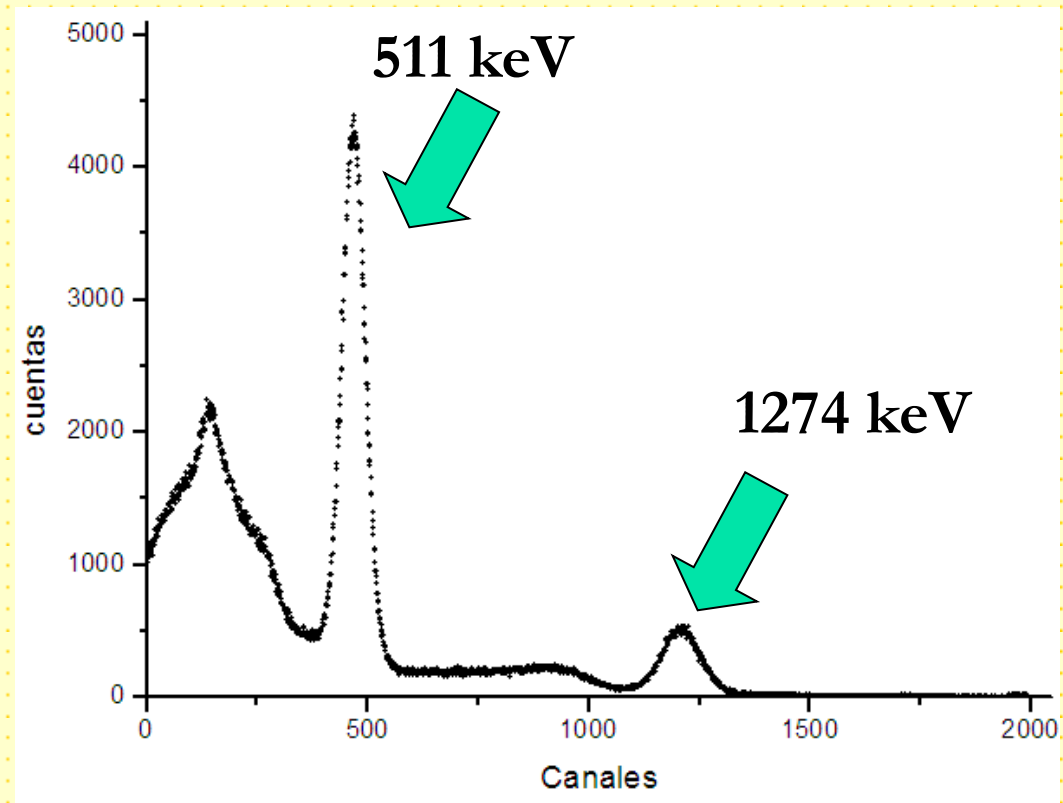
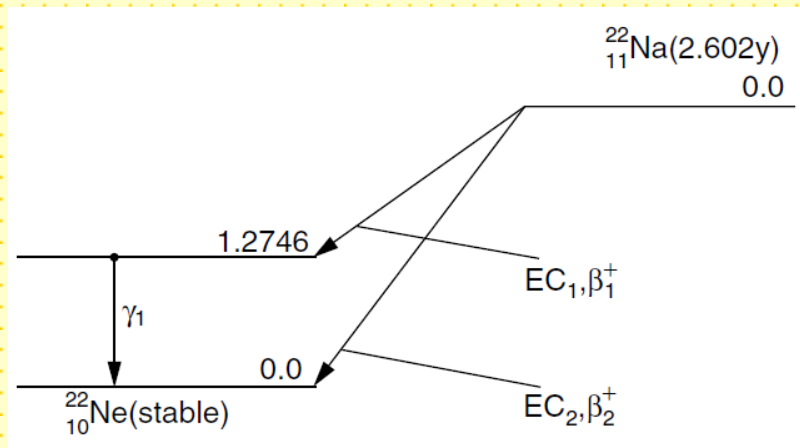


Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).



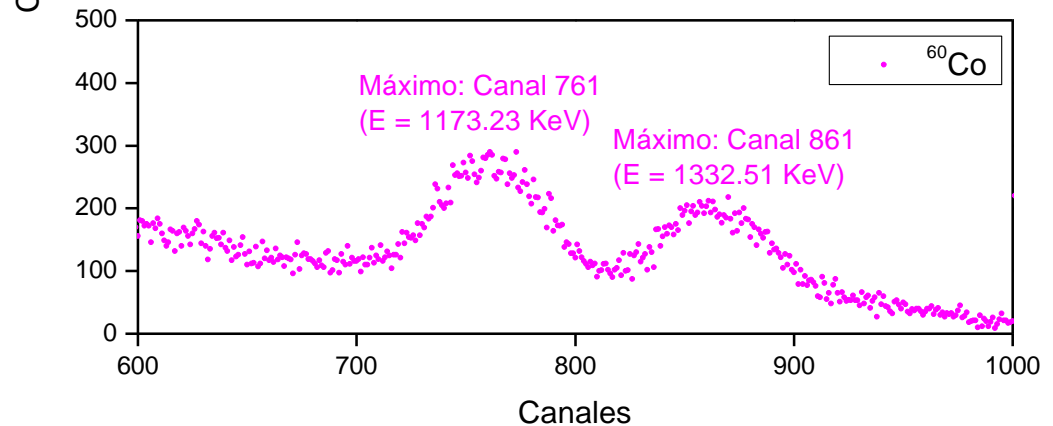
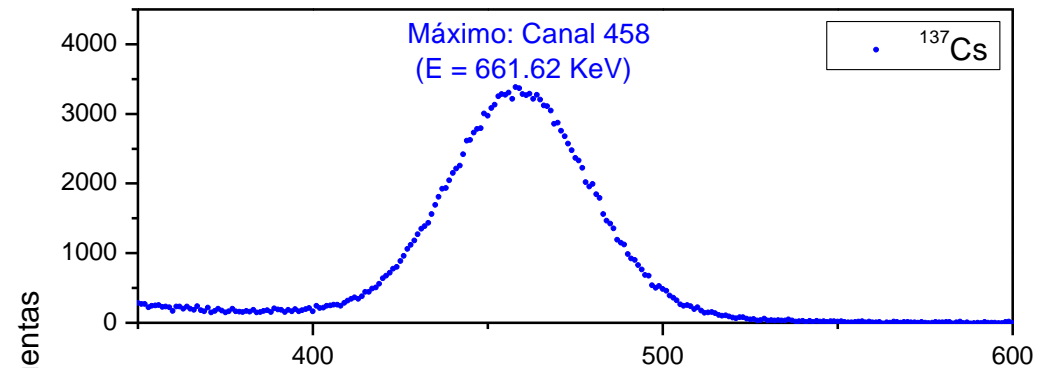
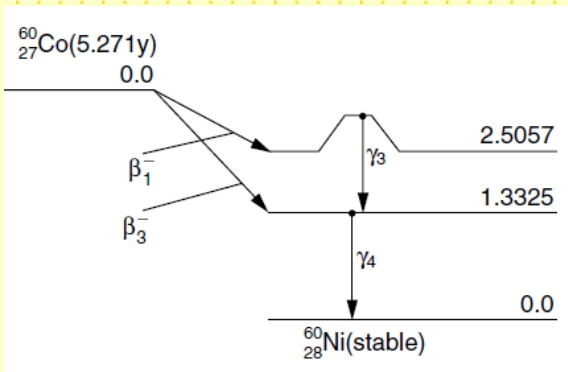
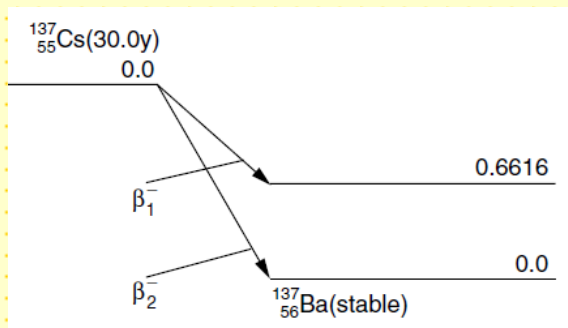
Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

^{22}Na . Una única emisión γ de 1274 keV

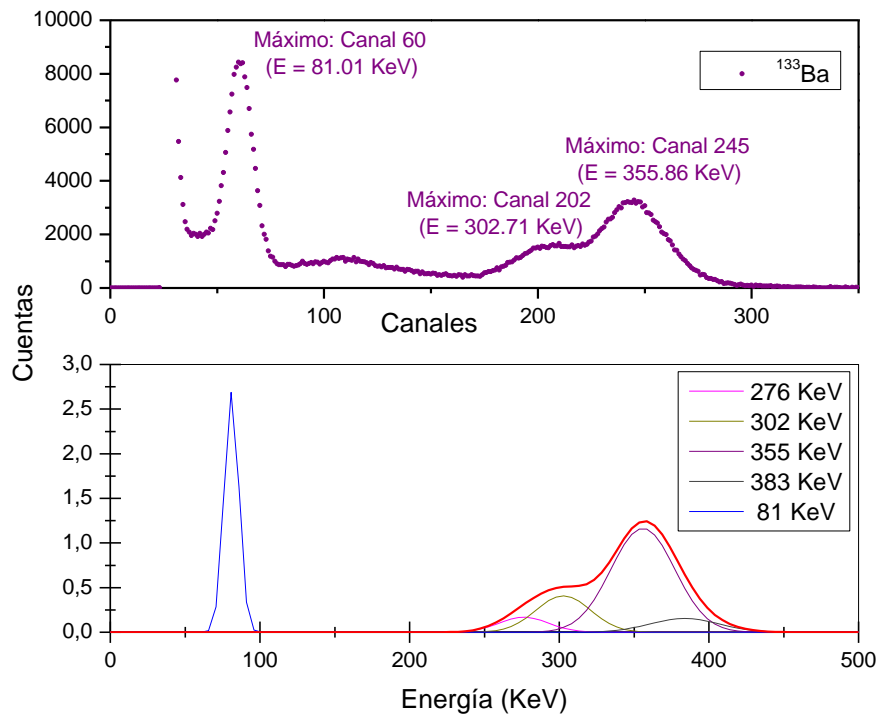


Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Fotopicos de ^{137}Cs y ^{60}Co .



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).



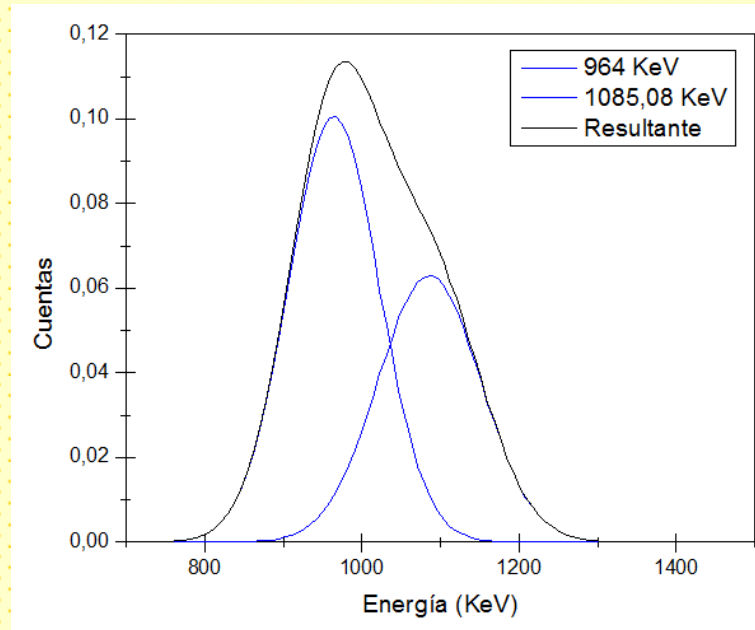
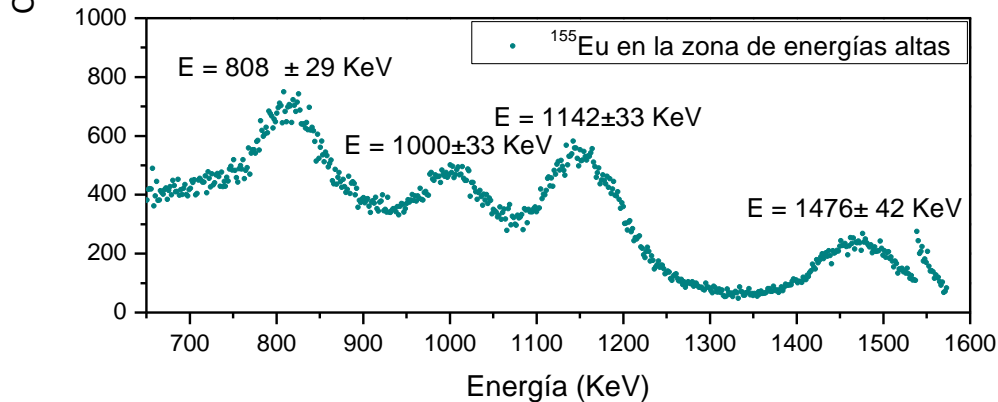
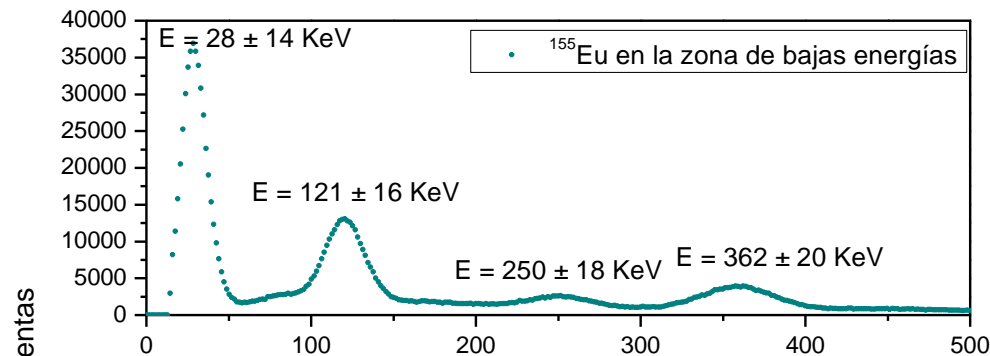
Espectro de altura de pulsos de ^{133}Ba .

Picos del ^{133}Ba simulados con funciones Gaussianas. La energía e intensidad de cada pico son conocidas y se toma una resolución de 12 %.

Picos no resueltos.

Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

^{152}Eu



Picos de 964 y 1085.80 KeV del ^{152}Eu simulados con funciones Gaussianas. Se observa que no pueden resolverse con este arreglo experimental.



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Incluimos ahora la formación de pares.

Si la energía del rayo γ incidente es mayor a 1022 keV, puede darse la producción de pares.

La energía cinética del par electrón-positrón es $E_{\gamma} - 1022$ keV

En la mayoría de los casos, toda la energía cinética del par se deposita en el detector.

Cuando el positrón llega al reposo, se aniquila con un electrón para crear un par de rayos γ de 511 keV que se emiten en direcciones opuestas (fotones de aniquilación).

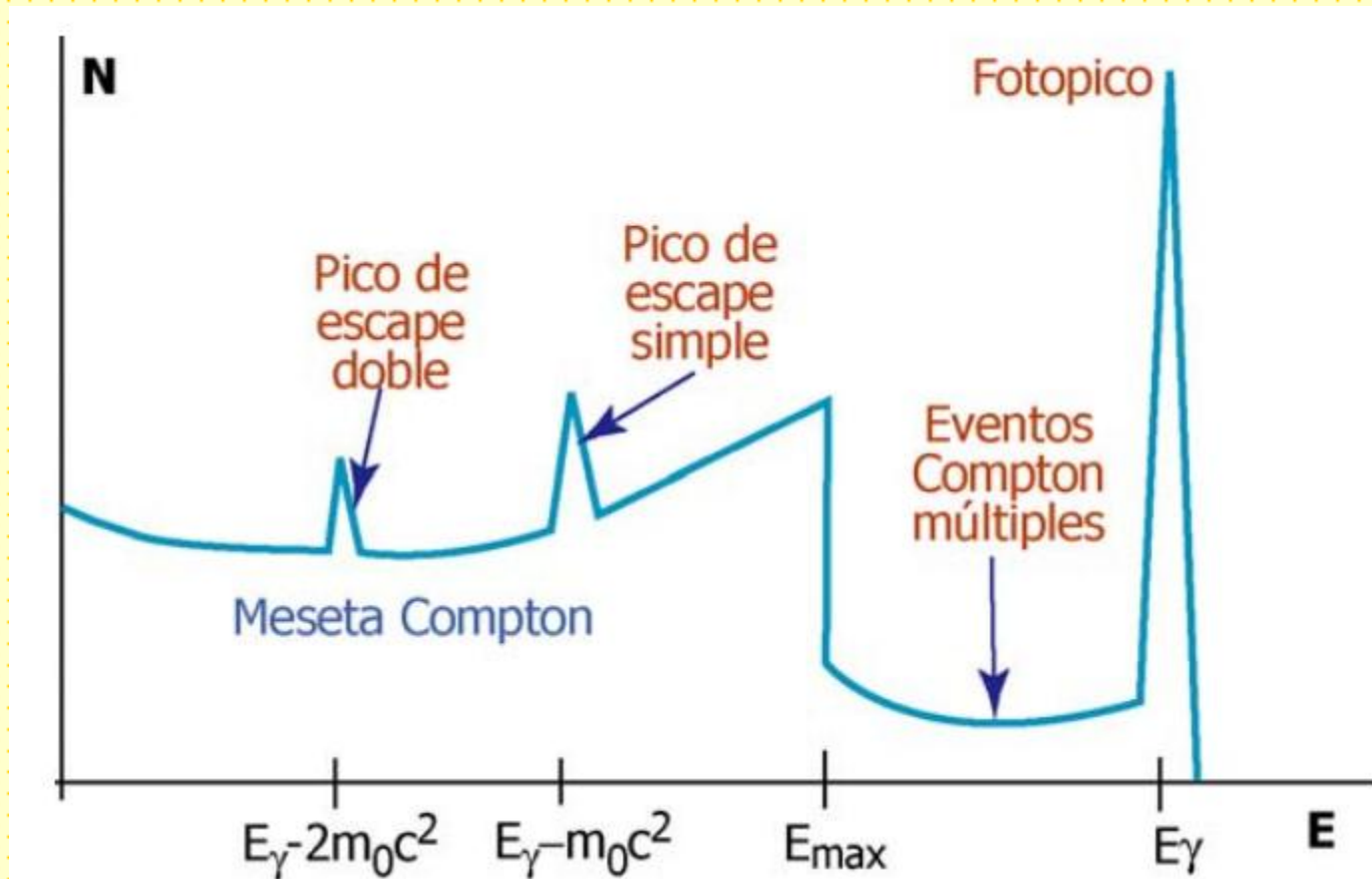


Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Tres posibilidades:

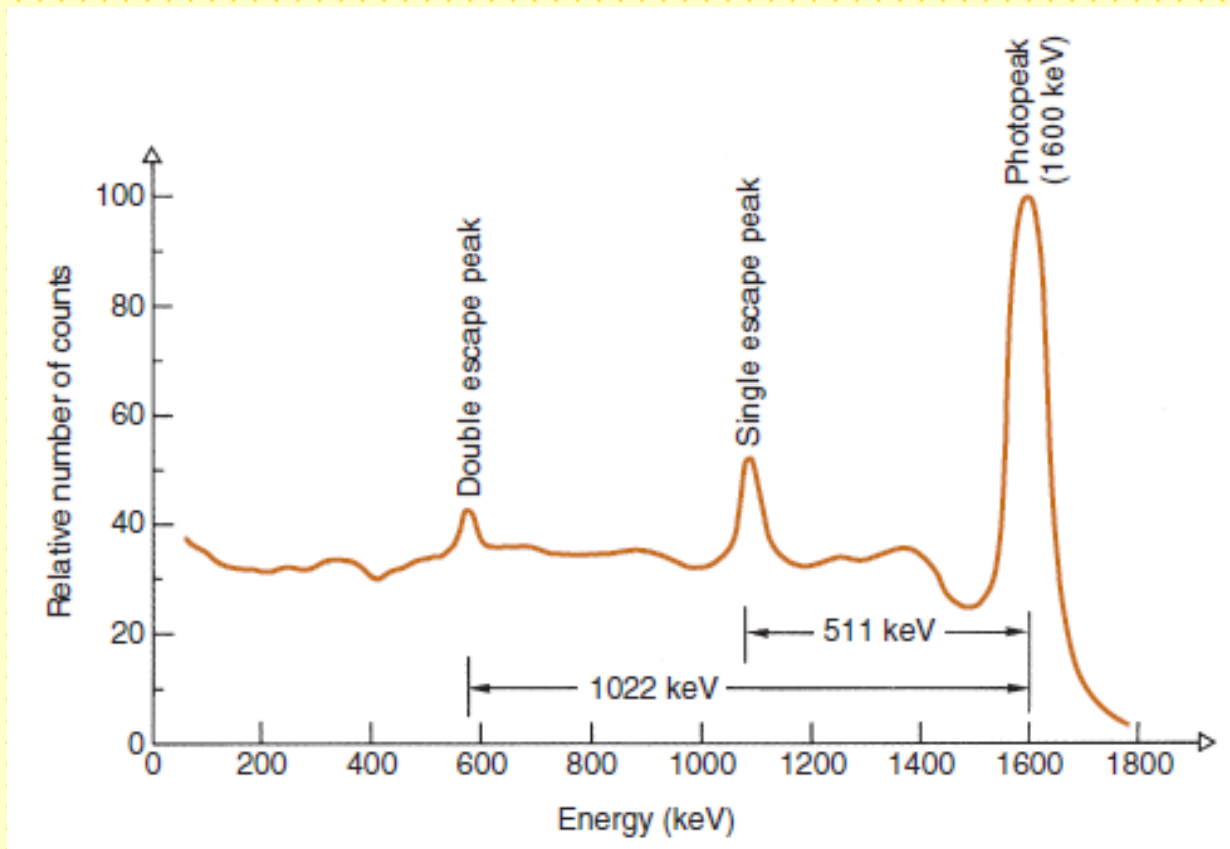
- 1- Si ambos fotones de aniquilación son absorbidos en el detector, toda la energía se deposita en el detector. fotopico.
- 2- Si sólo un de los fotones de aniquilación es absorbido: pico de escape simple en $E=E_\gamma - 511$ keV.
- 3- Si ambos fotones de aniquilación escapan: doble pico de escape simple en $E=E_\gamma - 1022$ keV.

Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

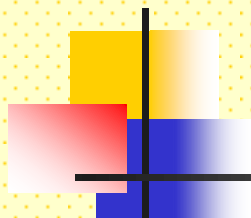


Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Espectro hipotético para una fuente que emite un único rayo γ de 1600 keV.

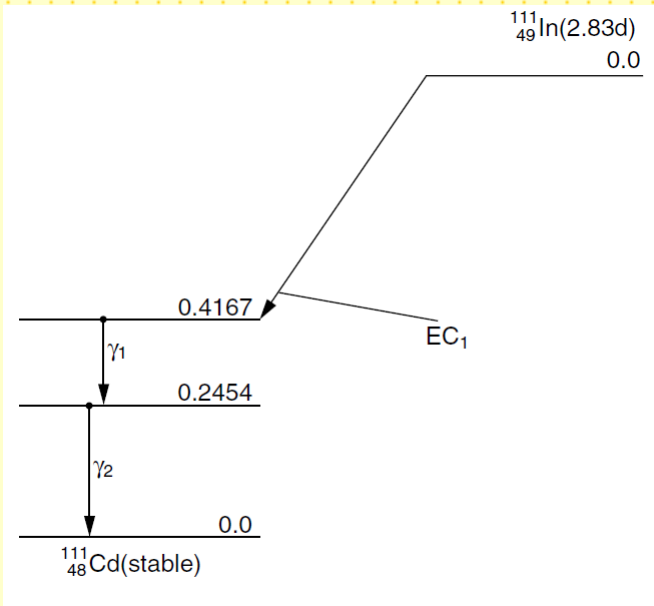


Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

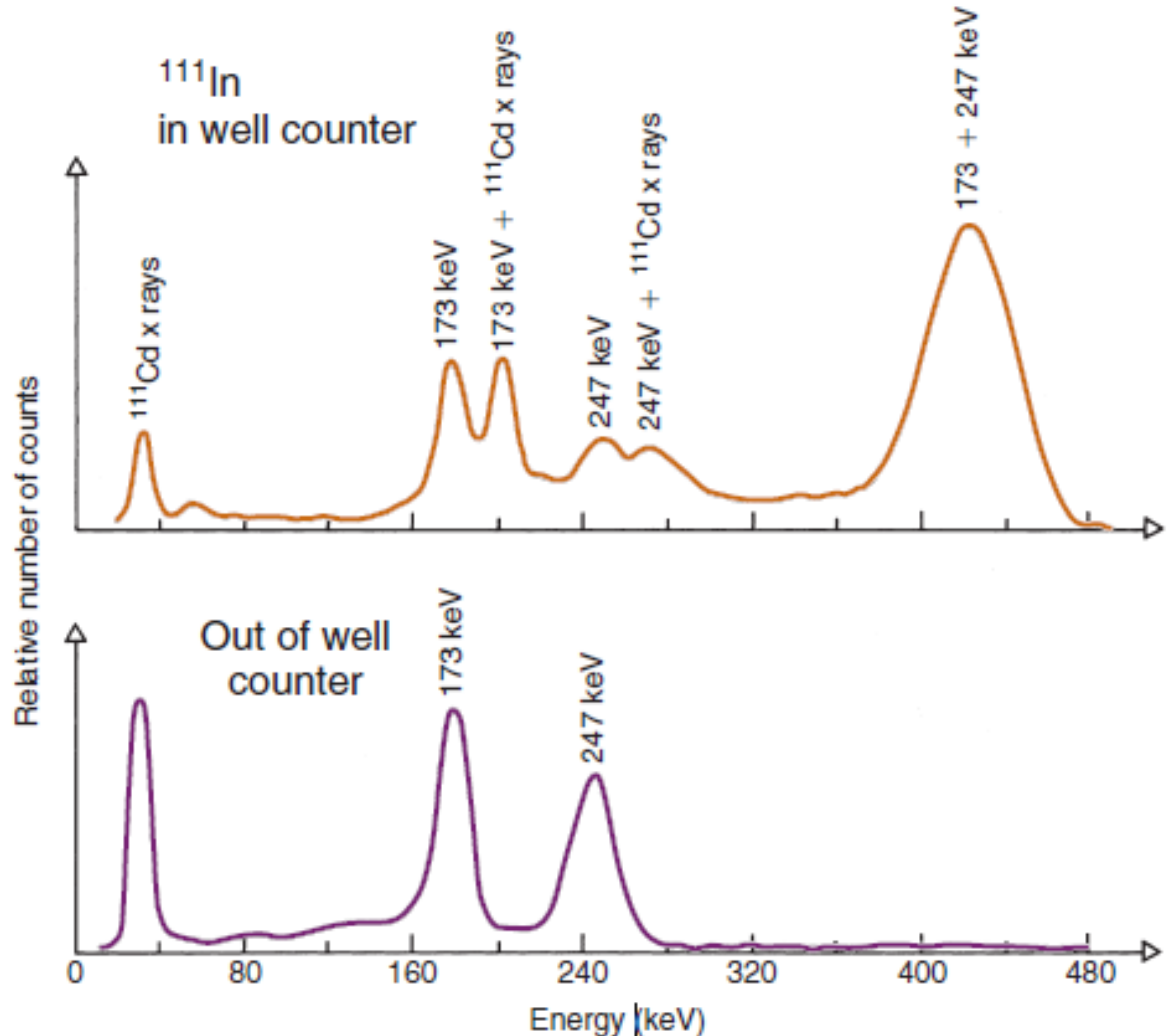


Picos suma.

La suma de picos puede ocurrir cuando un radionucleido emite dos o más rayos γ y por desintegración nuclear.



Emite dos γ 's: uno de 173 keV y otro de 247 keV.

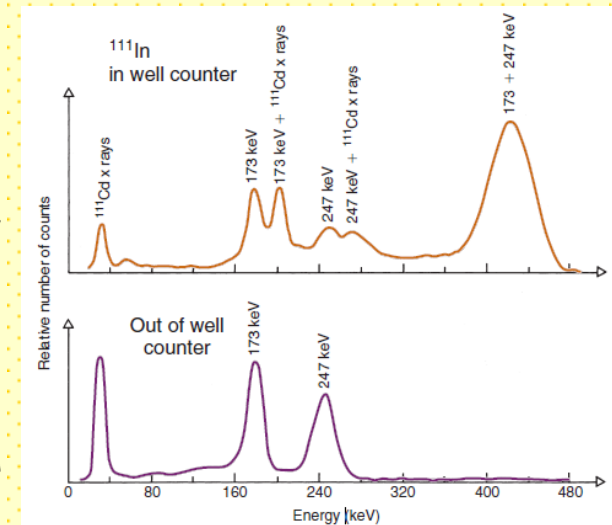


Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Picos suma son especialmente probables en:

- Sistemas detectores de alta eficiencia, por ejemplo, contadores de pozo.
- Muestras muy activas.

En ambos casos hay una alta probabilidad que dos rayos γ lleguen al detector al mismo tiempo y sean sumados.



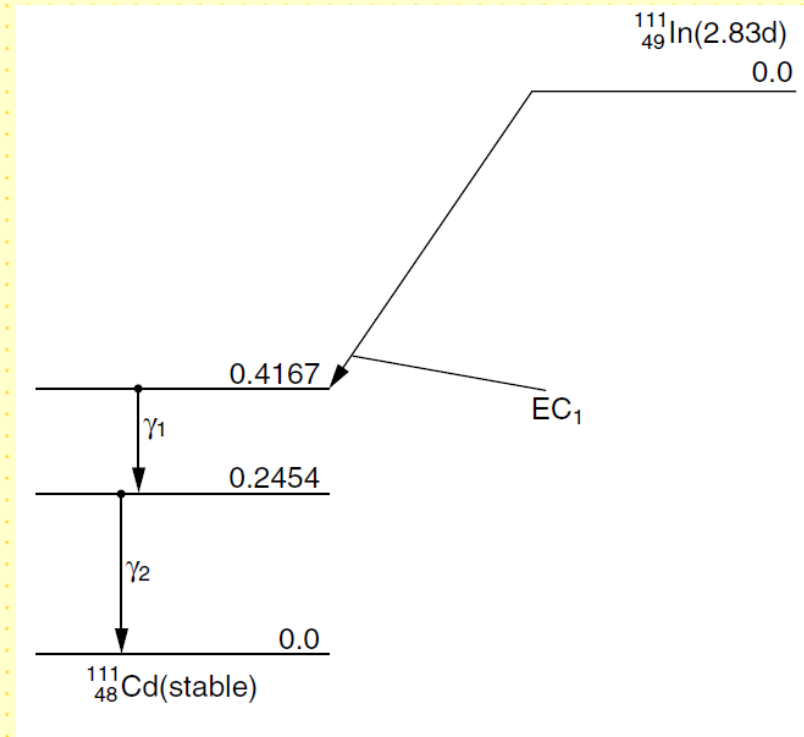
El hecho que picos desaparezcan al sacar la muestra del detector de pozo o al fraccionar la actividad muestra claramente que son picos suma.

Con emisores de positrones, se puede producir la suma de picos de 511 keV originados en fotones de aniquilación.

Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Otra posibilidad de picos suma:

Si la vida media de este estado intermedio es menor a la resolución temporal del equipo, estos γ 's serán emitidos con una diferencia temporal que para el equipo será nula.



En lugar de dos rayos γ de energías E_1 y E_2 , se verá un rayo γ de energía $E_1 + E_2$:

No se resuelve reduciendo la actividad de la muestra o cambiando la geometría. No hay solución, salvo cambiar por un detector con una resolución temporal menor.

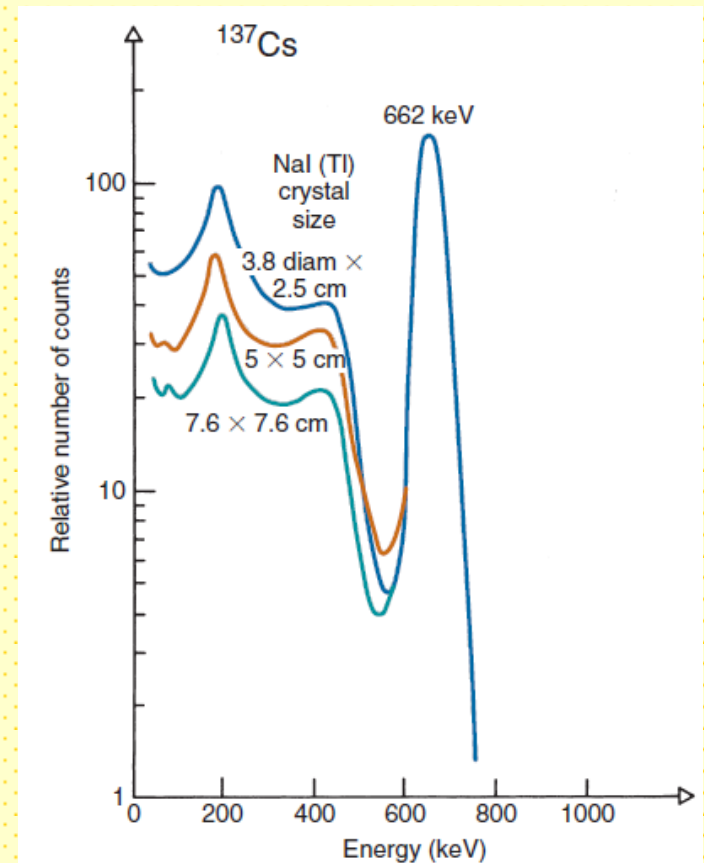
Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Efectos del tamaño del detector.

Cuanto mayor sea el tamaño del cristal detector, mayor probabilidad que los fotones secundarios (y generados en dispersión Compton y aniquilación de positrones) sean absorbidos en el cristal.

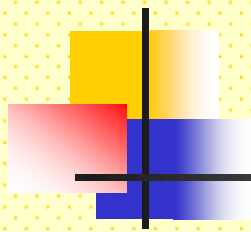
A mayor tamaño del cristal el la relación fotopico/Compton aumenta.

Para rayos γ de energías superiores a 1022 keV, el tamaño de los picos de escape de fotones originados en aniquilación de positrones también disminuye con el tamaño del cristal.



Los espectros han sido normalizados a igual altura de fotopico. En la práctica, la altura del fotopico también aumenta con el tamaño del detector debido al aumento de la eficiencia de detección

Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

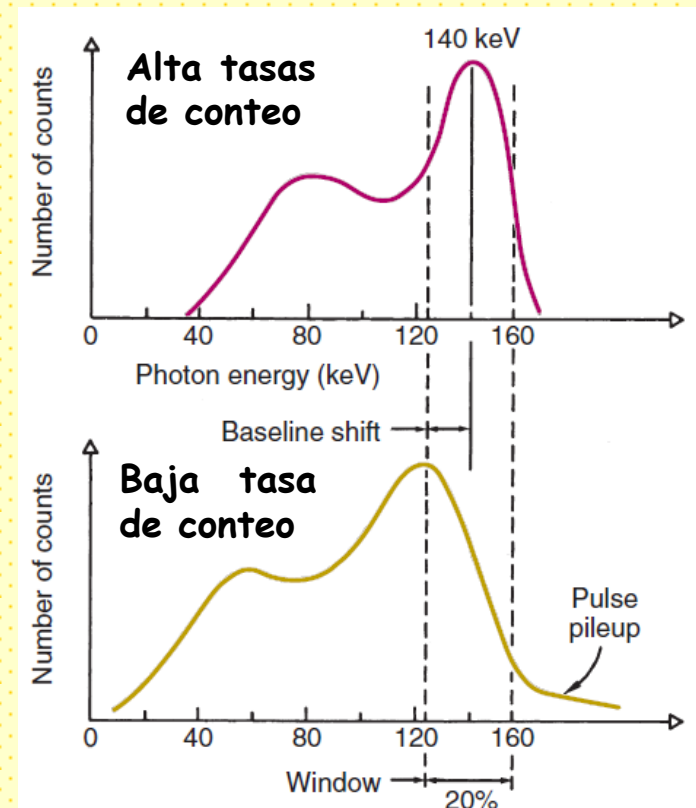


Efectos de la tasa de conteo.

Para altas tasas de conteos se producen distorsiones del espectro de altura de pulsos debido a la superposición de pulsos de salida del detector.

- La ya vista suma de pulsos.
- Suma entre eventos del fotopico y de bajas energías causa un ensanchamiento del fotopico y aumenta el tiempo muerto.
- Corrimiento del fotopico a menores energías debido al cambio de línea de base en el amplificador a altas tasas de conteo.

Cuidadol: Si un SCA se configura a bajas tasas de conteo en el fotopico y el detector se usan a tasas de conteo muy altas, el fotopico puede quedar fuera de la ventana del SCA dando lugar a una lectura incorrecta.



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Efecto de la energía del rayo γ incidente.

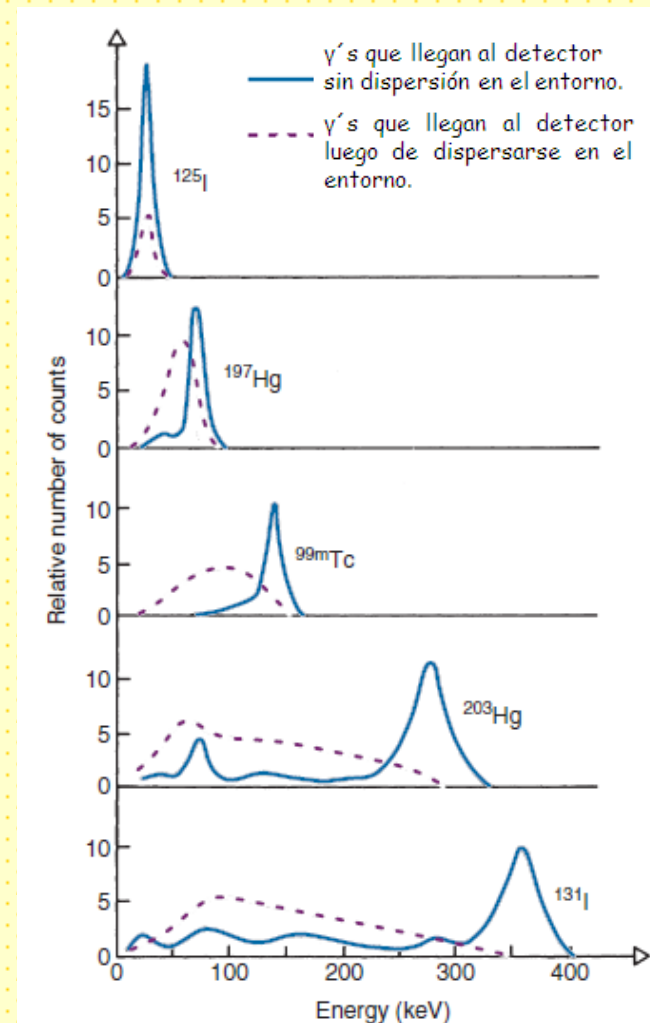
La relación Compton/fotopico se incrementa con la energía del γ .

La probabilidad de interacción Compton con respecto a interacción fotoeléctrica crece con la energía del γ incidente.

Segundo efecto: al aumentar la energía del γ es más fácil separar los eventos asociados a interacción Compton del fotopico.

El cambio en la energía de un rayo γ en una dispersión Compton aumenta con la energía de rayos γ .

Ejemplo: para γ 's de 100 y 500 keV y dispersión Compton a 90° genera fotones secundarios de 84 y 253 keV, respectivamente.





Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Resolución en energías.

En el caso de detectores de NaI(Tl) este ensanchamiento se produce principalmente por variaciones estadísticas aleatorias en los eventos que conducen a la formación del pulso de salida. Estos incluyen:

1. Variaciones estadísticas en el número de fotones visibles producidos por la radiación incidente.
2. Variaciones estadísticas en el número de fotoelectrones liberados del fotocátodo
3. Variaciones estadísticas en el factor de multiplicación electrónica de los dinodos



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

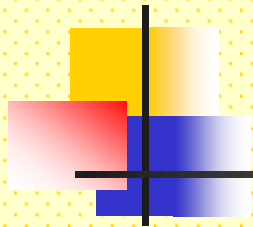
Ensanchamiento del fotopico relacionado con la fabricación y montaje del detector de NaI(Tl) incluyen:

4. Sensibilidad no uniforme al centelleo del fotocodo.
5. No uniformidad en la eficacia de recolección de la luz de centelleo en diferentes puntos del cristal.
6. Una importante (aunque sutil) causa de ensanchamiento del fotopico es la respuesta en energía no lineal del centellador.

El ruido electrónico contribuye al ensanchamiento del fotopico: Para detectores centelladores acoplados a un tubo FM las principales fuentes son:

7. Fluctuaciones en la alta tensión aplicada al tubo FM.
8. Ruido eléctrico en el tubo de PM

Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).



Vamos a tratar de determinar el peso de cada factor a la resolución en energía para el detector de NaI(Tl).

$$R = 2,35 \sqrt{\frac{Fw}{E}}$$

F del orden de 1.

Por cada keV de energía, del orden de 40 fotones originados en el centelleo.

Property	NaI(Tl)
Density (g/cm ³)	3.67
Effective atomic number	50
Decay time (nsec)	230
Photon yield (per keV)	38
Index of refraction	1.85
Hygroscopic	Yes
Peak emission (nm)	415

Con tubos FM de buena calidad y buen acoplamiento óptico, aproximadamente el 25% de los fotones de centelleo producen fotoelectrones en el fotocátodo.

10 fotoelectrones por keV de energía absorbida en el cristal de NaI(Tl).



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Supongamos la absorción completa de un rayo γ de 662 keV (fotopico) del ^{137}Cs

Del orden de 6600 fotoelectrones producidos en el fotocátodo.

Fluctuación estadística: Estadísticas de Poisson.

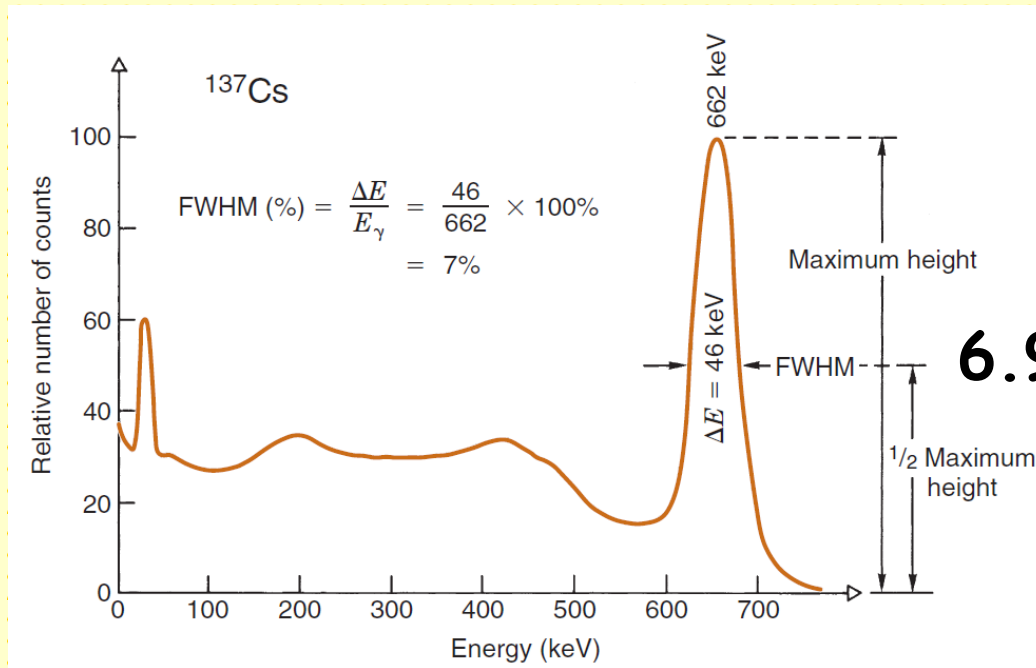
$$\sigma = \sqrt{6600} = 81 \text{ fotoelectrones}$$

($\pm 1.2\%$ de error relativo en la altura del pulso).

Se traduce en un FWHM de 2.8%.

Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Sin embargo, en el experimento:



La diferencia se origina en las fuentes de variaciones de amplitud enumerados anteriormente. Y empeoran la resolución y dependencia de la resolución en energía con $1/\sqrt{E}$,



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Conclusión: la fluctuación estadística estadística en el número de fotoelectrones, el ruido en el tubo FM y la multiplicación de electrones y la respuesta no lineal en energía del centellador contribuyen en forma similar a la resolución en energía del sistema a 662 keV.

Mejoras en tubos FM y en el acoplamiento óptico ha dado lugar a mejoras constantes en la resolución de energía.

La respuesta no lineal en energía del centellador es el factor limitante en la resolución de energía del NaI(Tl), independientemente de nuevas mejoras tecnológicas.

Con tubos FM de buena calidad: resolución en energía del 6% a 662 keV para el InaI(Tl).

Resolución en energía del orden de 10% para γ 's de 140 keV (99mTc).

Con cristales de gran área y múltiples tubos FM (por ejemplo, la cámara gamma), la resolución en energía puede degradarse.

Las modernas cámaras gamma emplean electrónica y softwares de corrección que permiten «recuperar» una resolución en energía del 10%.



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Otro factor que afecta a la resolución en energía es el tiempo de integración utilizado para coleccionar la señal generada por el evento detectado.

En las aplicaciones de imágenes médicas o espectrometría con NaI(Tl), el tiempo de integración es en general del orden de μs . En este caso, resolución del orden de 6%.

En aplicaciones como detección en coincidencia de rayos γ y generados en aniquilación de positrones (PET) el tiempo de integración puede acortarse a unos pocos cientos de ns (para minimizar el número de coincidencias accidentales, generadas en la detección de rayos γ que provienen de diferentes eventos de aniquilación de positrones).

Con una integración más corta el número de fotoelectrones que contribuyen a la señal detectada es menor. La resolución de la energía se degrada de un 6-7% a 10%.



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Otros factores que pueden degradar la resolución energética.

- Mal acoplamiento óptico entre el cristal centellador y el tubo FM causa una reducción en los fotones que llegan al fotocátodo.
- Un cristal detector con fracturas o defectos internos causa reflexiones internas y atrapamiento de fotones de centelleo, interfiriendo en la colección eficiente de luz.

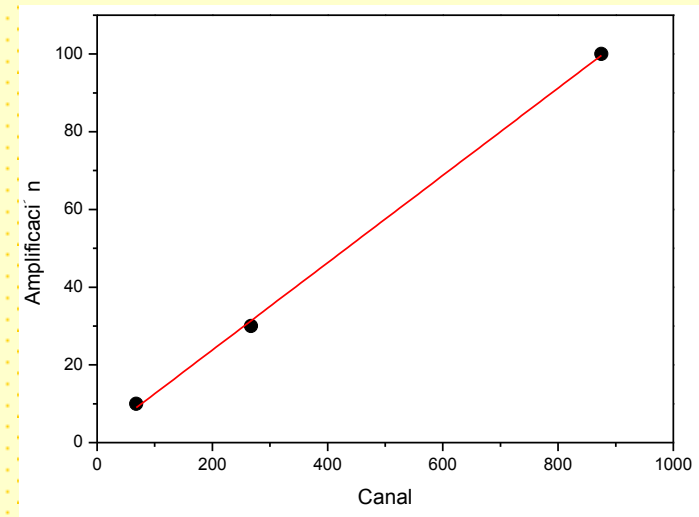
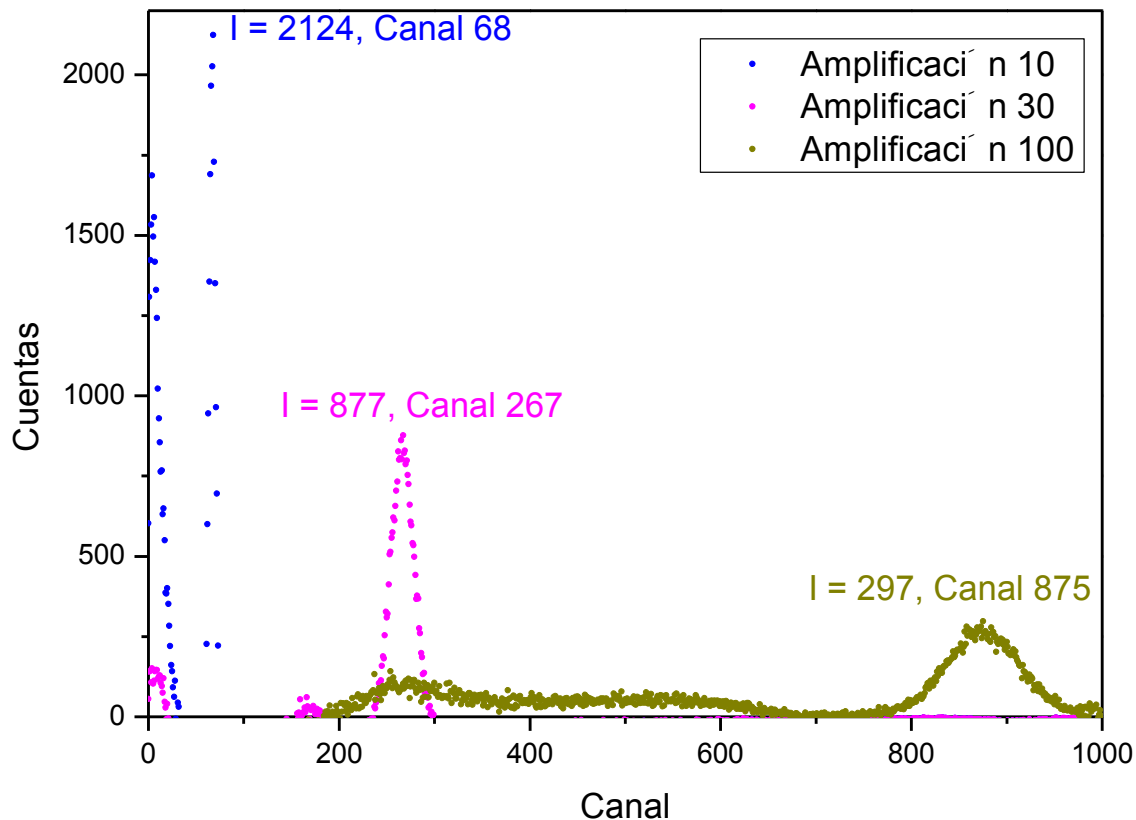
Una repentina degradación de la resolución de energía y/o pérdida del pulso de salida son síntomas de un cristal defectuoso.

El deterioro del acoplamiento óptico mediante grasa entre el cristal detector y el tubo FM tiene efectos similares.

Poca colección de luz también puede ocurrir con detectores que tienen una forma inusual (muy largos en comparación con el ancho).

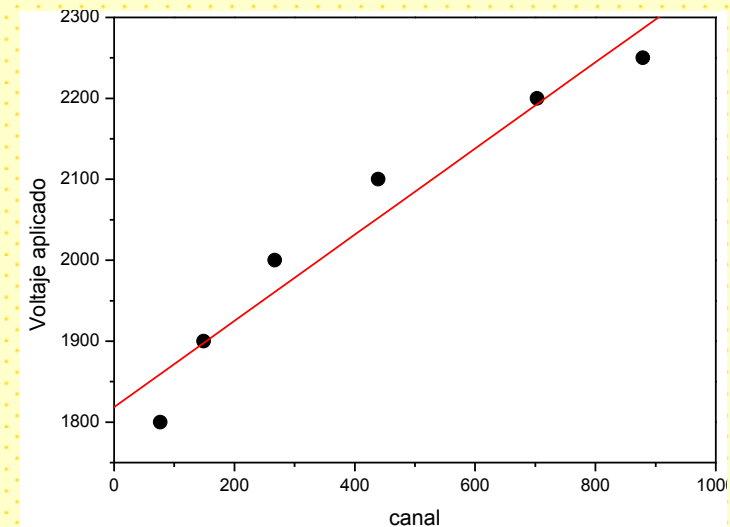
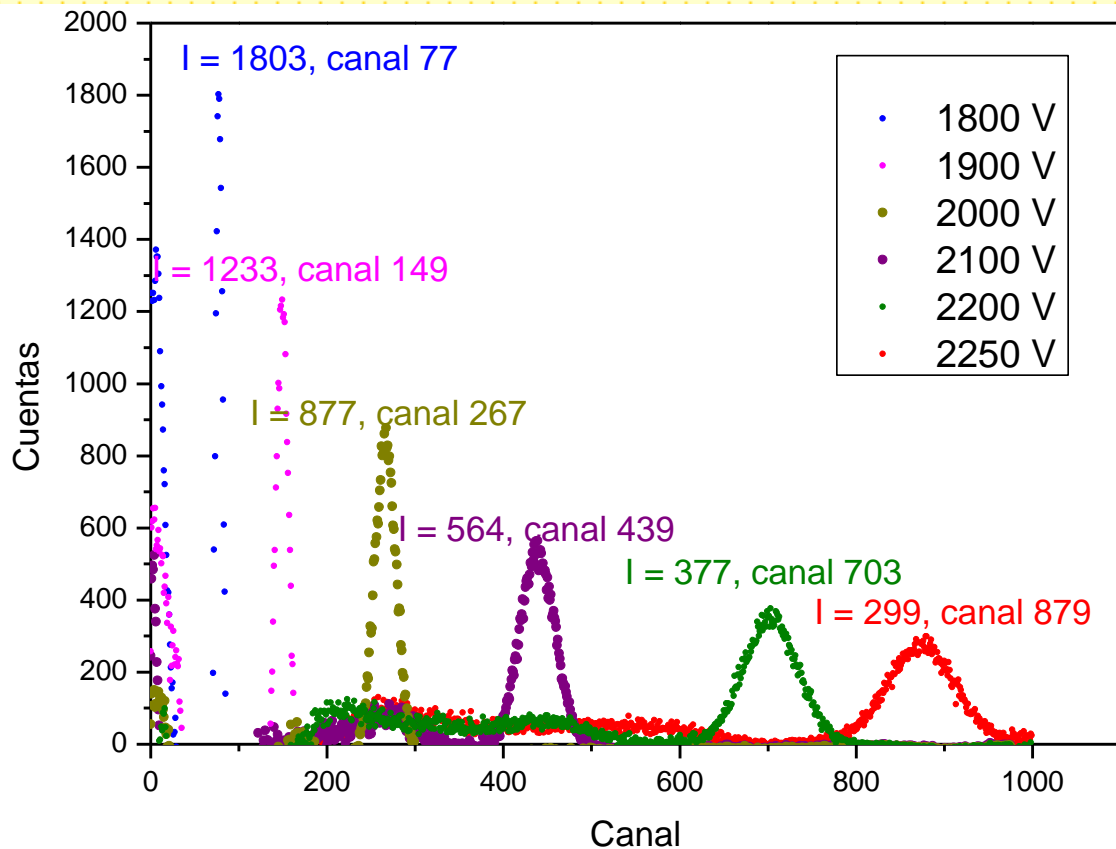
Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Espectro γ de ^{137}Cs medido con NaI(Tl) en función de la amplificación (voltaje fijo en 2000 V).



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Espectro γ de ^{137}Cs medido con NaI(Tl) en función del voltaje (amplificación fija en 30).





Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

Fuente en un medio material. Absorción y dispersión.

En el análisis realizado hasta aquí hemos supuesto que la radiación (emitida por una fuente puntual) alcanza al detector sin obstáculos en su camino.

Sin embargo, cuando la fuente radioactiva está localizada en profundidad dentro de un medio absorbente y dispersante, como ocurre en la mayoría de los estudios in vivo, el cálculo de La eficiencia de detección se complica por la atenuación y los efectos de dispersión.

La absorción generalmente causa una disminución en la tasa de conteo registrada.

La dispersión en el entorno del sistema muestra-detector puede conducir a una disminución o a un aumento dependiendo si hay más fotones dispersándose hacia el detector o alejándose del detector.



Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).

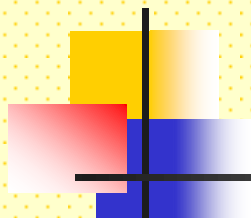
Ejemplo: la tasa de conteo para una fuente a poca profundidad en un medio material puede ser mayor que para la misma fuente en el aire porque la contribución de retrodispersión puede compensar la reducción en la tasa de conteo por absorción. A mayores profundidades los efectos de absorción pueden predominar.

El cálculo de las correcciones por atenuación y dispersión en mediciones in vivo son complicadas ya que hay que incluir varios factores:

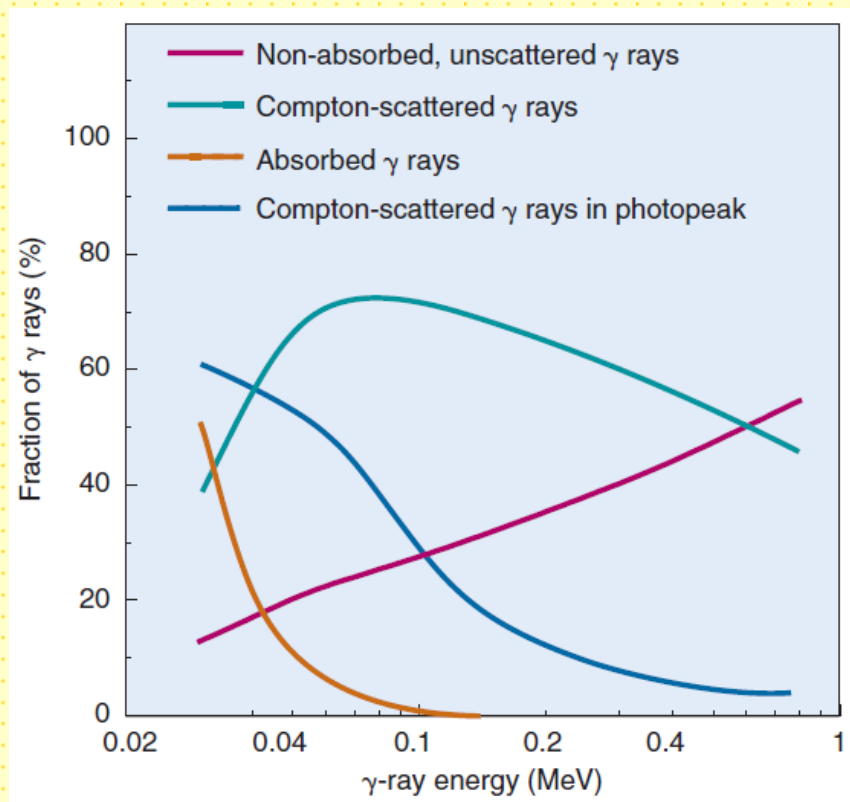
- Energía de los rayos y incidentes.
- Profundidad de la fuente en el medio de absorción y dispersión (por ejemplo, tejido)
- Densidad del medio.
- Uso de conteo selectivo de energía.

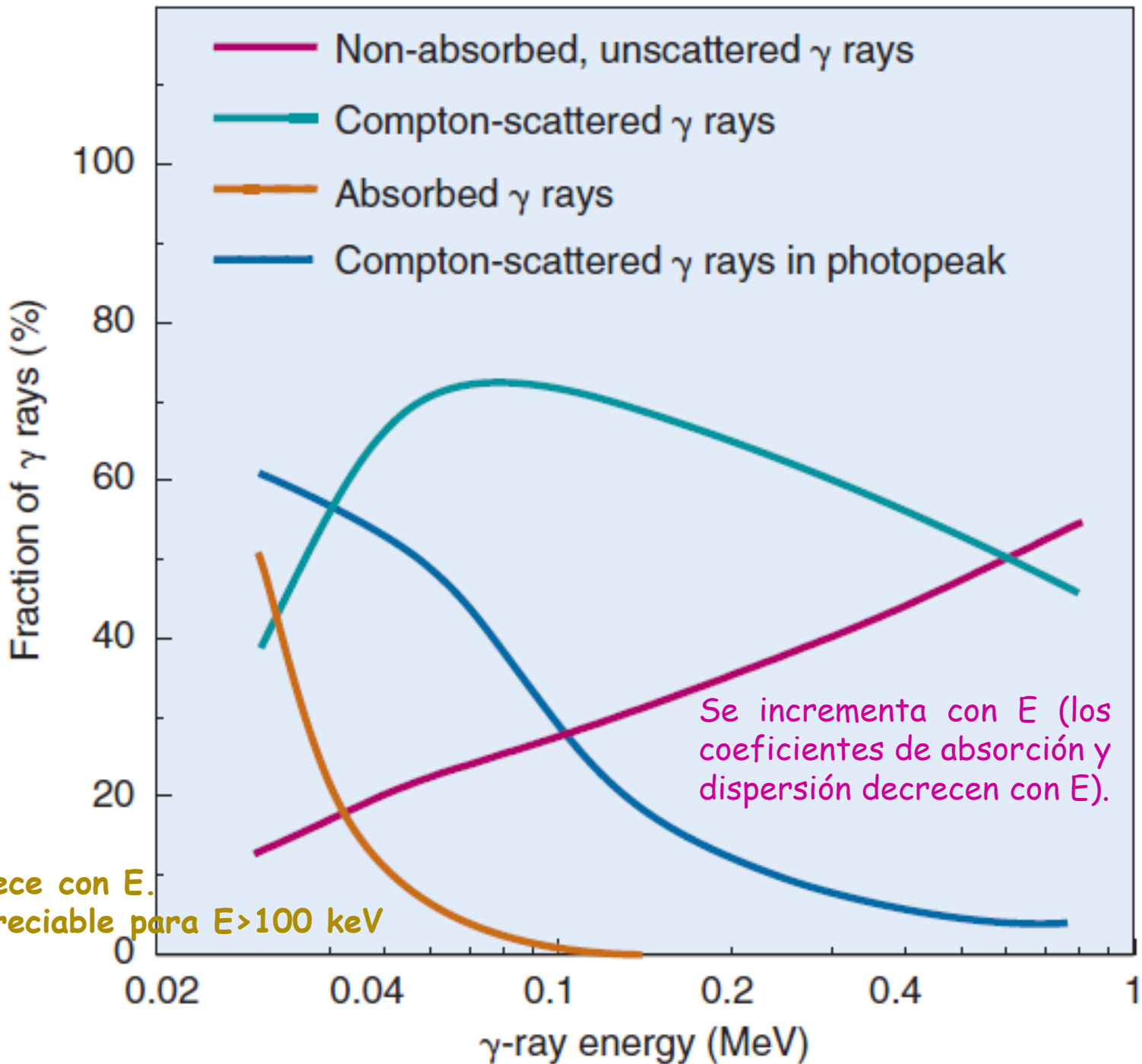
Entre otros factores.

Espectroscopía de altura de pulsos con NaI(Tl).



Ejemplo: Fuente radiactiva en tejido, a 7.5 cm de profundidad.





Non-absorbed, unscattered γ rays

Compton-scattered γ rays

Absorbed γ rays

Compton-scattered γ rays in photopeak

Se incrementa con E (los coeficientes de absorción y dispersión decrecen con E).

Decrece con E.
Despreciable para $E > 100$ keV

Espectroscopía de altura de pulsos con detectores semiconductores.

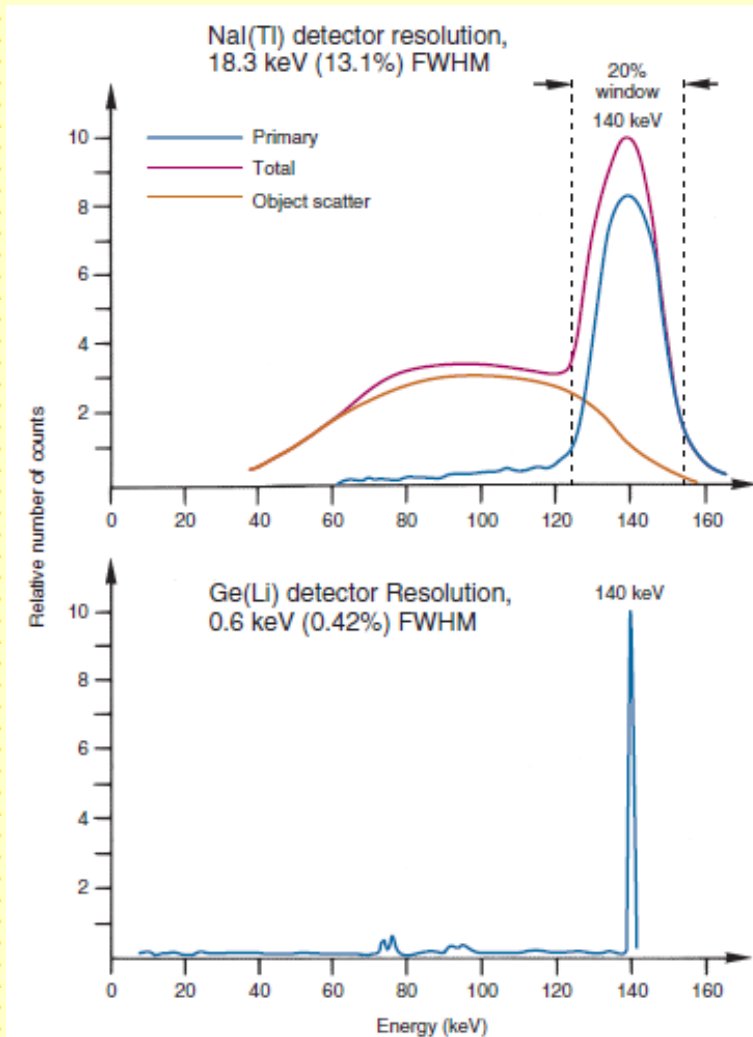
	Si(Li)	Ge(Li) or Ge	CdTe*	Air
$\rho(\text{g/cm}^3)$	2.33	5.32	6.06	0.001297
Z	14	32	48 & 52	~7.6
$W(\text{eV})^\dagger$	3.6	2.9	4.43	33.7

Comparar con 10 fotoelectrones por keV en un sistema de detector de NaI(Tl):FM.

Esta mucho mayor cantidad de carga producida en los detectores semiconductores producen fluctuaciones estadísticas menores en las alturas de pulsos y por lo tanto mucha mejor resolución de energía que el NaI(Tl).

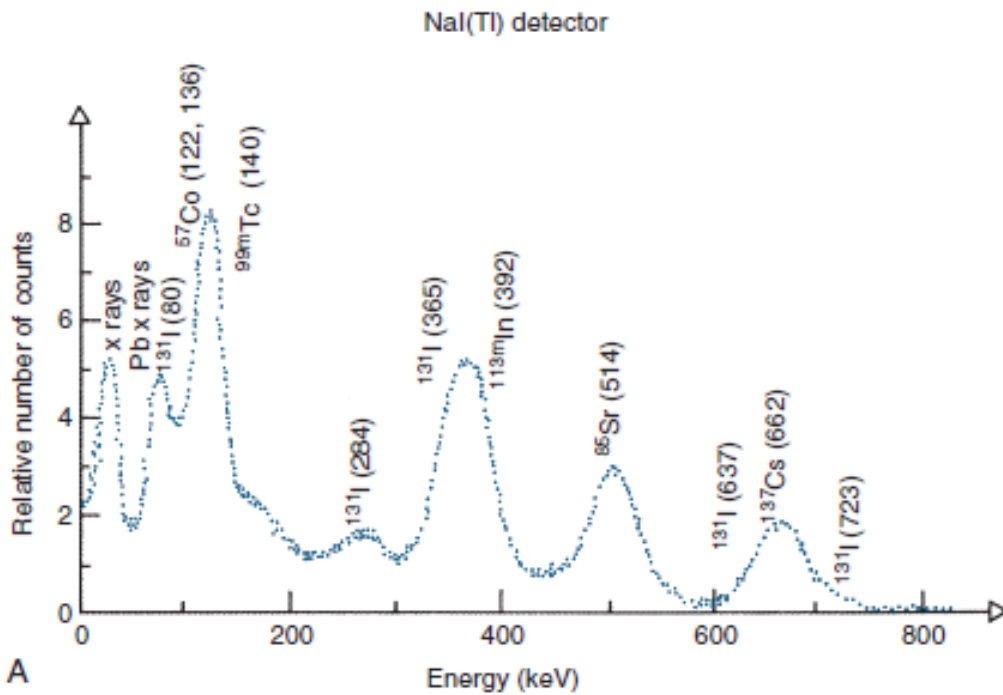
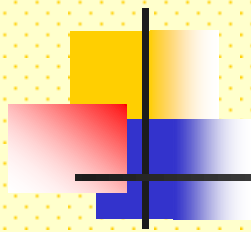
Espectroscopía de altura de pulsos con detectores semiconductores.

^{99m}Tc

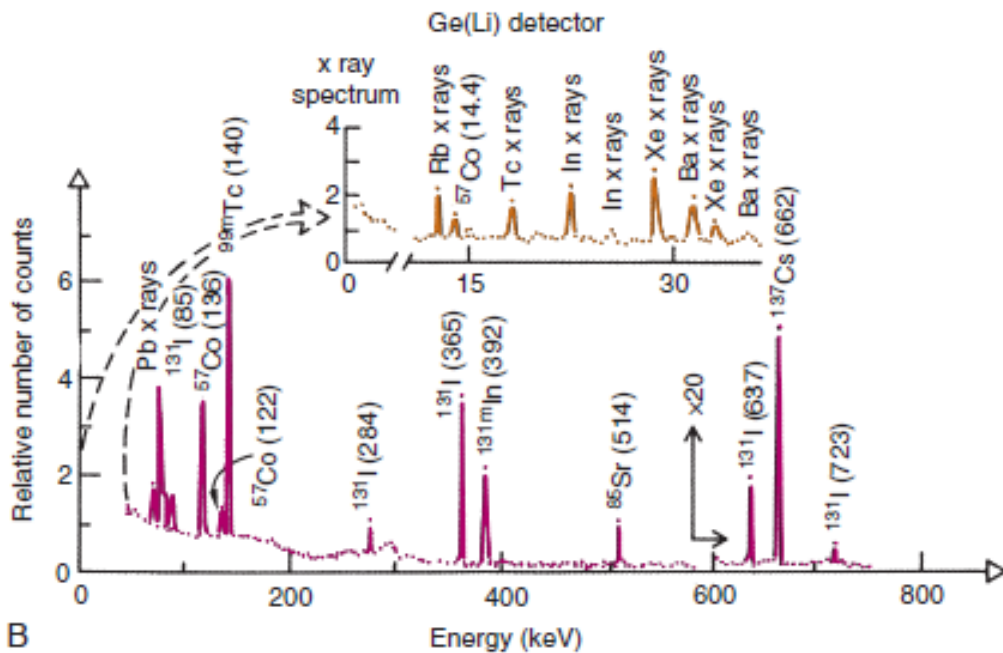


Resolución en energía superior del Ge(Li).

Eliminación casi completa del continuo Compton.



A



B



Espectroscopía de altura de pulsos con detectores semiconductores.

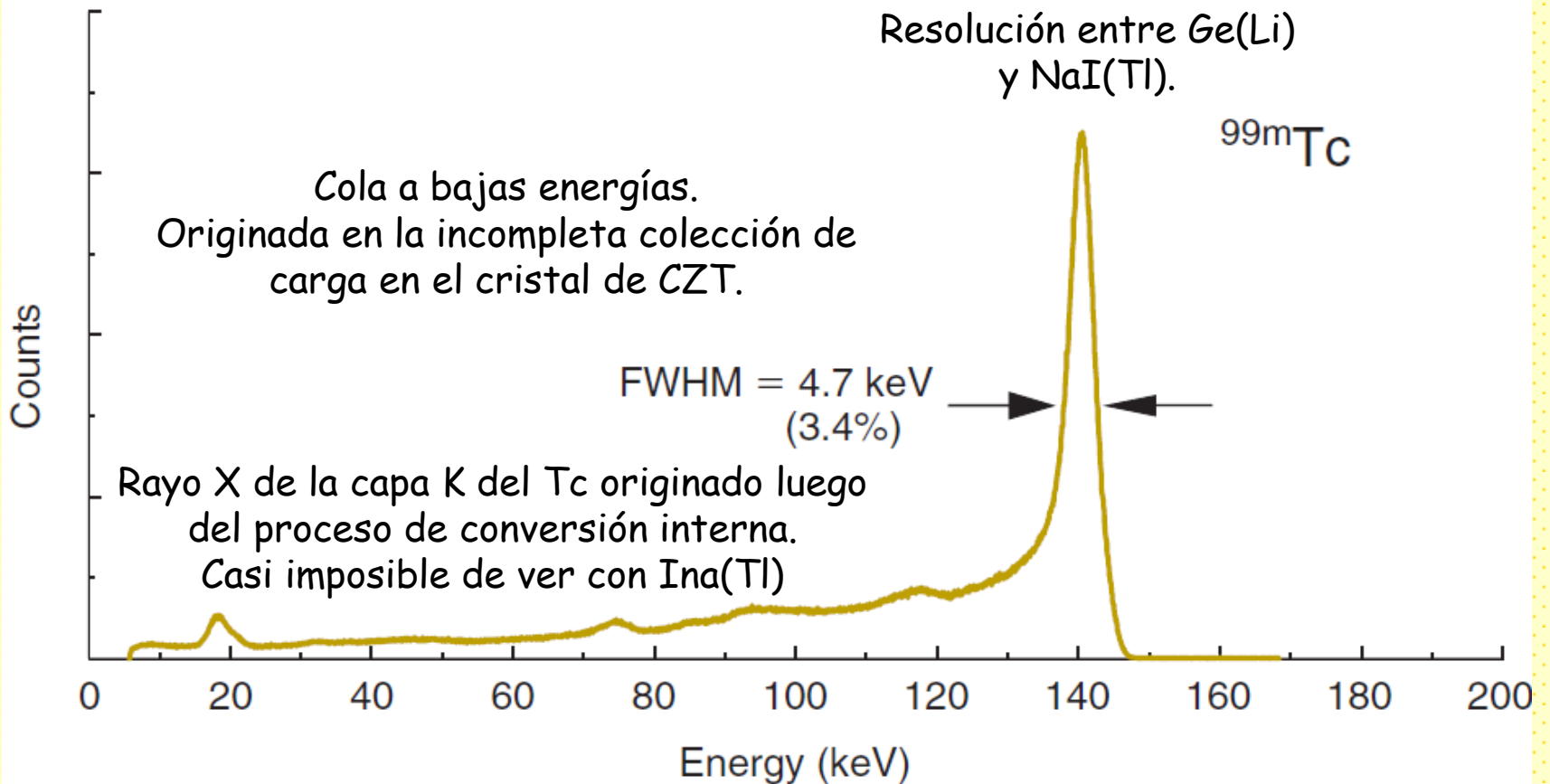
Pese a su mejor resolución en energía estos detectores no tienen un uso amplio en Medicina nuclear.

Ge(Li): pequeños tamaños, deben ser operados a bajas temperaturas.

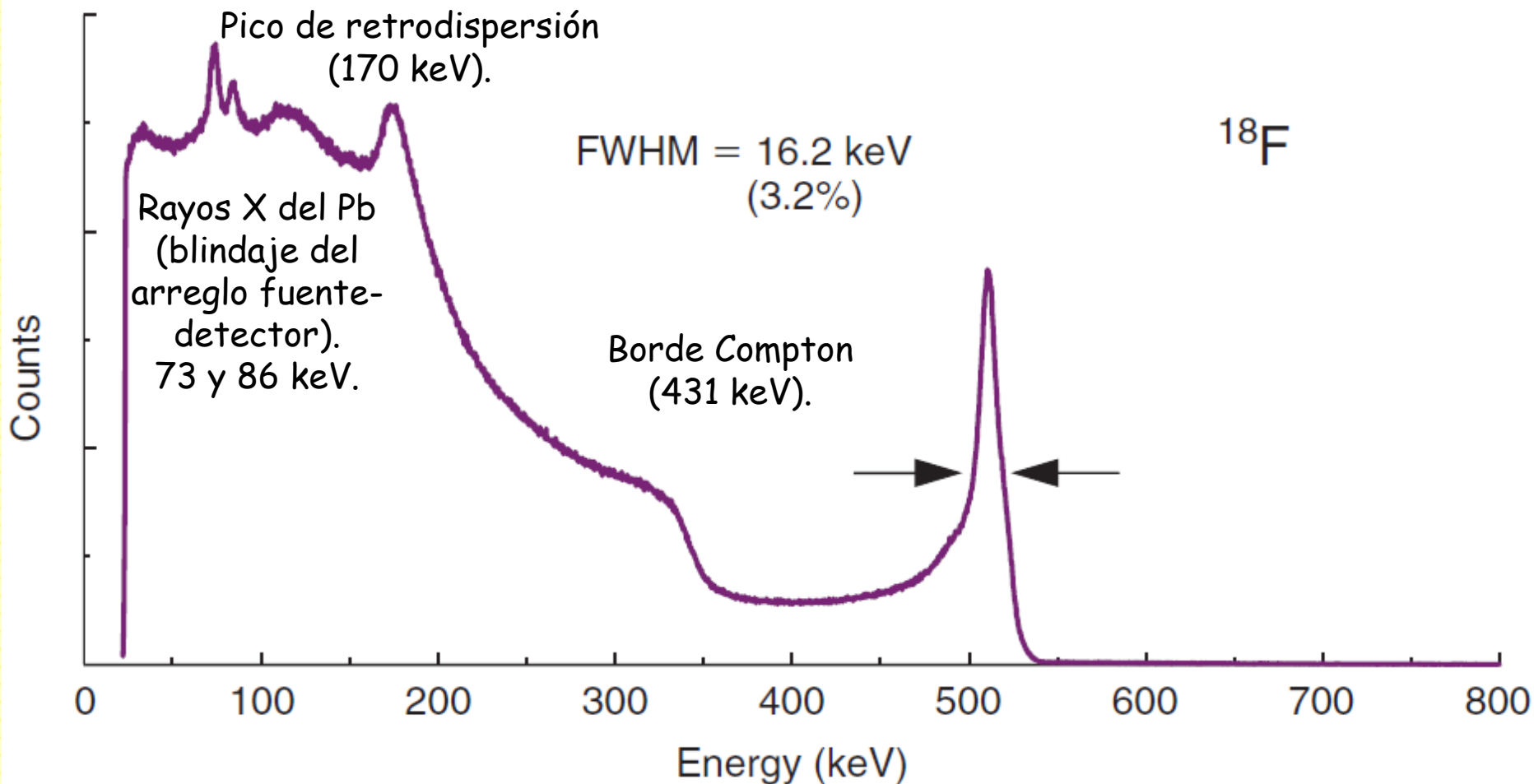
Si(Li): si bien pueden usarse a temperatura ambiente son ineficientes para la detección de rayos X y γ .

Desarrollo reciente: *CZT*. Puede usarse a temperatura ambiente. Menor resolución que *Ge(Li)* o *Si(Li)*, pero aún mucho mejor que la del *NaI(Tl):FM*.

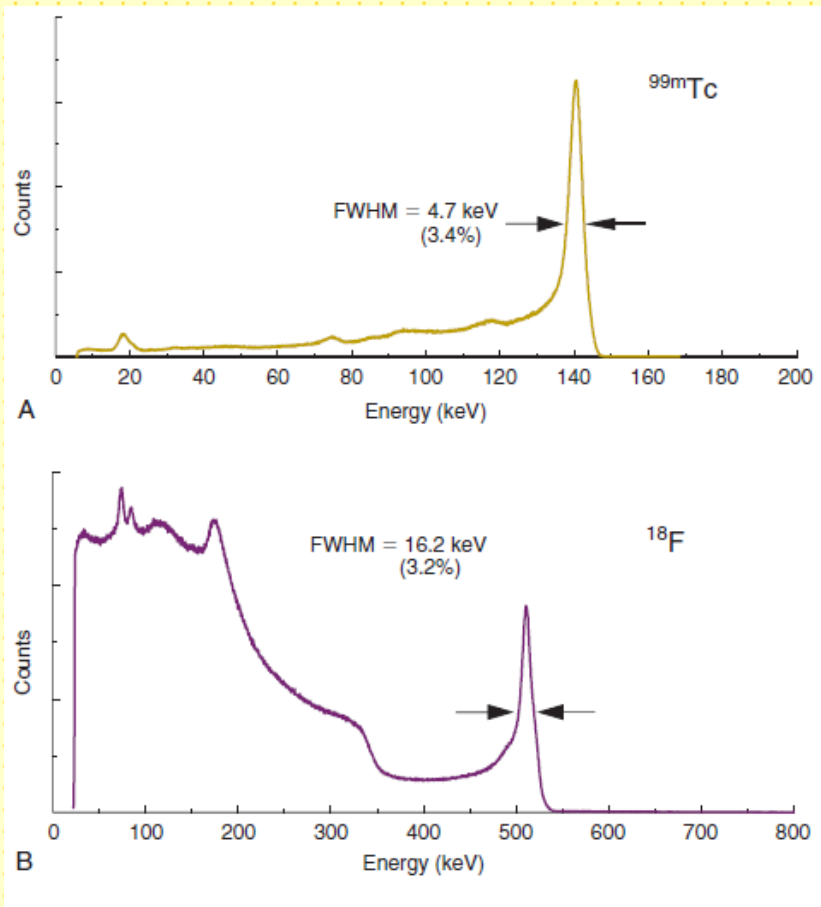
Espectroscopía de altura de pulsos con detectores semiconductores.



Espectroscopía de altura de pulsos con detectores semiconductores.



Espectroscopía de altura de pulsos con detectores semiconductores.



Similares resoluciones energías para los fotopicos de ^{99m}Tc y ^{18}F , pese a la diferencia en energías.

En el caso de un detector de NaI(Tl), la resolución en energía para 140 keV sería mucho peor.

Esto se debe a que en el caso de CZT, se genera una gran cantidad de carga aún para rayos γ de baja energía.



Espectroscopía de altura de pulsos con detectores semiconductores.

Las causas predominantes del ensanchamiento de línea para el detector CZT son corrientes de fuga a través del propio detector y la incompleto (y variable) colección de carga.

Estos factores dependen principalmente de la tensión de funcionamiento y de la configuración específica del detector.

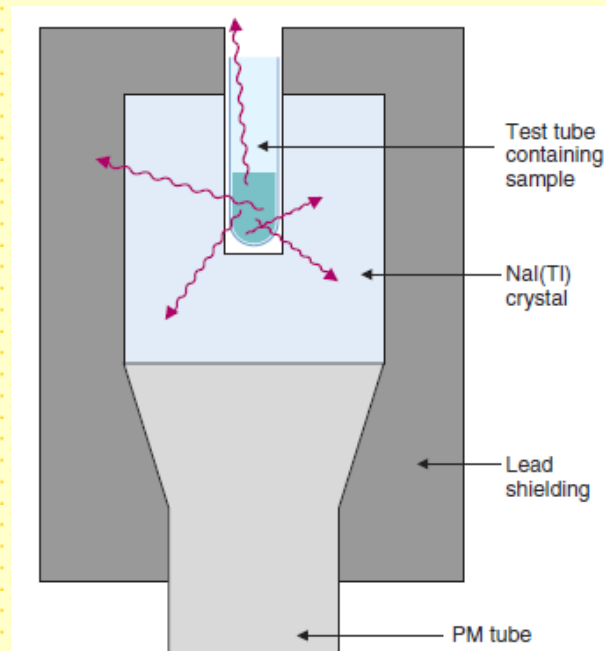
Otro factor importante es el ruido electrónico.

Ninguno de estos factores depende directamente de la energía del rayo γ . Así, la relación $1/\sqrt{E}$ generalmente no se aplica para detectores semiconductores operando a temperatura ambiente.

El funcionamiento del CZT mejora a bajas temperaturas (aunque esto «elimina» la ventaja del CZT sobre Ga(Li) y Si(Li)). A bajas temperaturas se recupera en parte la relación $1/\sqrt{E}$.

Espectroscopía de altura de pulsos con centelladores líquidos.

Los centelladores líquidos son principalmente empleados para el estudio de emisores β de bajas energías como ser ^3H , ^{14}C , ^{35}S , ^{45}Ca , y ^{32}P . En general, medidas in vitro.



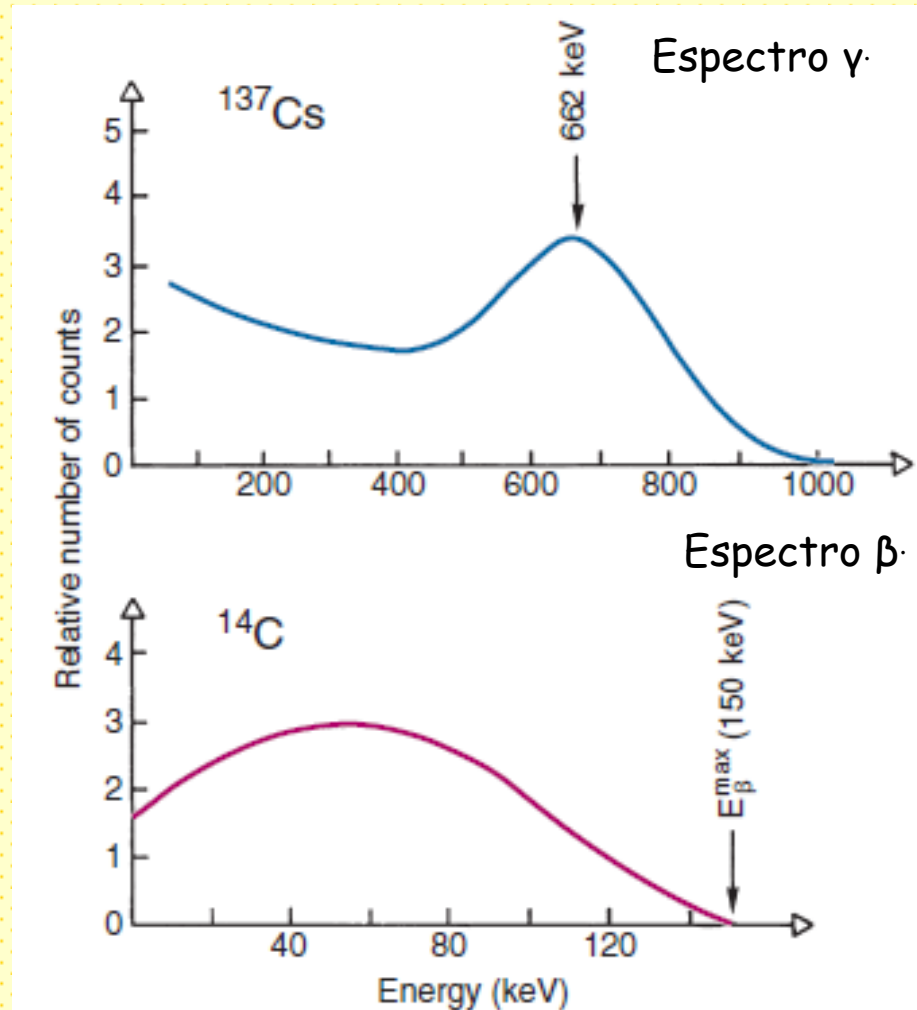
Espectroscopía de altura de pulsos con centelladores líquidos.

Los centelladores líquidos son principalmente empleados para el estudio de emisores β de bajas energías como ser ^3H , ^{14}C , ^{35}S , ^{45}Ca , y ^{32}P . En general, medidas in vitro.

Muy pobre resolución en energía para el caso de rayos γ (relativamente pocos fotones de centelleo, y por ende pocos fotoelectrones).

Otro factor que provoca la pobre resolución en energías es la ineficiente transmisión de los fotones de centello del contenedor del líquido centellador-muestra al fotocátodo.

Los espectros β no tienen fotopicos ya que los β presentan un espectro continuo de energía.





Espectroscopía de altura de pulsos con contadores proporcionales.

Los contadores proporcionales tienen una resolución en energía mucho mejor que el Ina(Tl). Sin embargo, tienen poco uso en Medicina Nuclear

- Muy poco eficientes para la detección de rayos X y γ (el volumen sensible es un gas).
- Deben operar a muy bajas tasas de contaje.



Detección de partículas β .

Las detección de partículas β pueden realizarse con:

- Detectores gaseosos (cámaras de ionización o Geiger-Müller).

Los contadores Geiger-Müller se los utiliza en el caso de nucleídos emisores de electrones de alta energía debido a que los de baja energía son absorbidos en la ventana que separa el gas de la muestra.

La eficiencia de este tipo de detectores varía entre el 10% y el 70% dependiendo de la energía de los electrones, el espesor de la fuente y de las características del contador.



Detección de partículas β .

Los centelladores líquidos tienen ventajas en la detección de electrones de baja energía ya que no hay atenuación cuando la muestra está inmersa en el centellador.

- Pobre resolución en energía.
- Baja autoabsorción
- Alta eficiencia, permiten una
- Distribución homogénea de la muestra en el líquido centellador
- Procedimientos de preparación de muestras relativamente simples y fácil estandarización del uso de patrones internos o externos.

Permiten estudiar radionucleídos que decaen por conversión interna o captura electrónica a partir de la medida de los electrones Auger producidos durante estos procesos.

Debido a la baja energía de estos electrones (<20 keV) la eficiencia de conteo es baja, del orden del 30%.

Debido a la distribución continua de energía de los electrones β esta espectroscopía es una herramienta pobre para identificar las contribuciones individuales a un espectro.



Detección de partículas β .

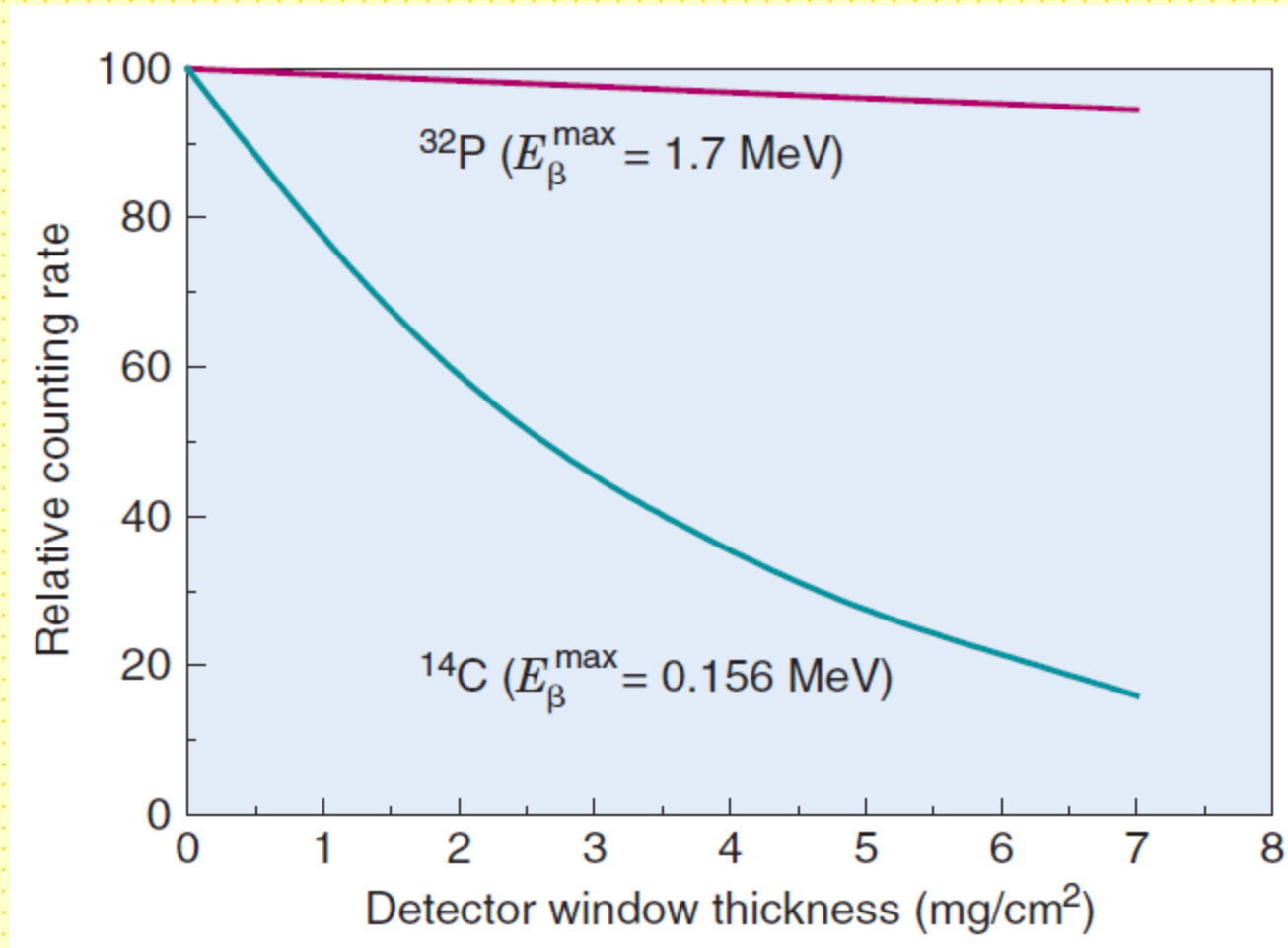
Debido a sus rangos relativamente cortos en materiales sólidos, las partículas β tienen problemas especiales de detección y medición. Estos problemas son especialmente graves con emisores de partículas β de baja energía como ^3H y ^{14}C .

El método preferido para el ensayo de estos radionucleidos es por conteo de centelleo líquido. Sin embargo, esta técnica no es aplicable en todas las situaciones, tal como cuando se estudian problemas de contaminación.

El detector debe tener una ventana de entrada suficientemente delgada para permitir que las partículas β alcancen el volumen sensible del detector.

Ventana de entrada muy fina preferiblemente fabricada con un material de baja densidad (0,03 mm de espesor, mica o berilio). **Frágiles!!!!**
Para partículas β de mayor energía se pueden usar ventanas más gruesas y de, por ejemplo, Al.

Detección de partículas β .

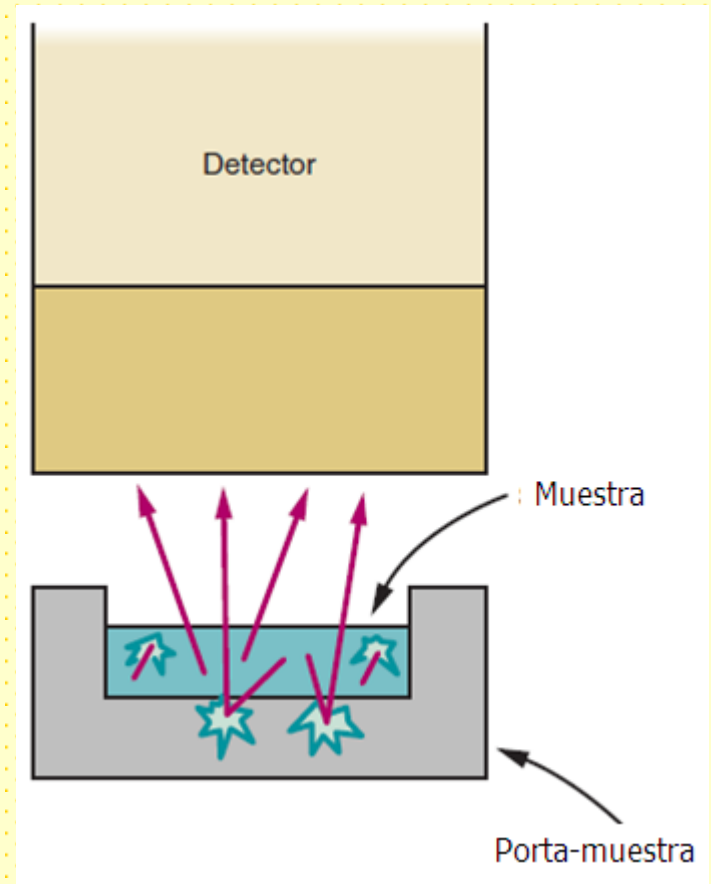
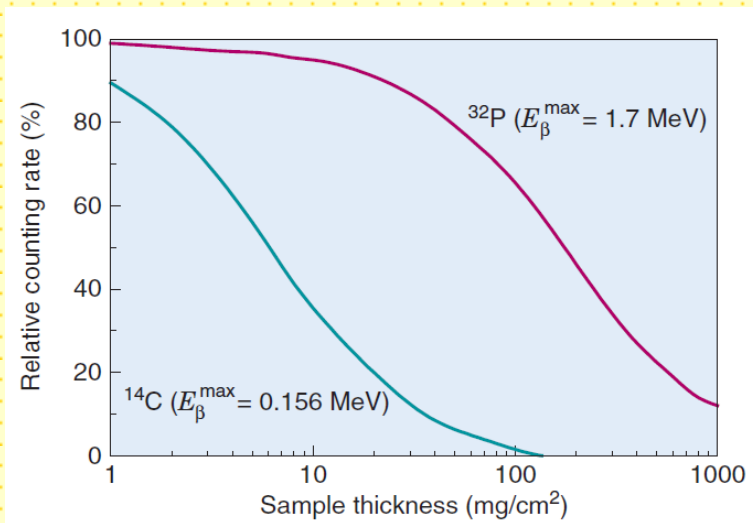


Detección de partículas β .

Problema importante:

Autoabsorción y dispersión de los electrones.

Autoabsorción; depende del espesor y densidad de la muestra y la energía de los electrones.



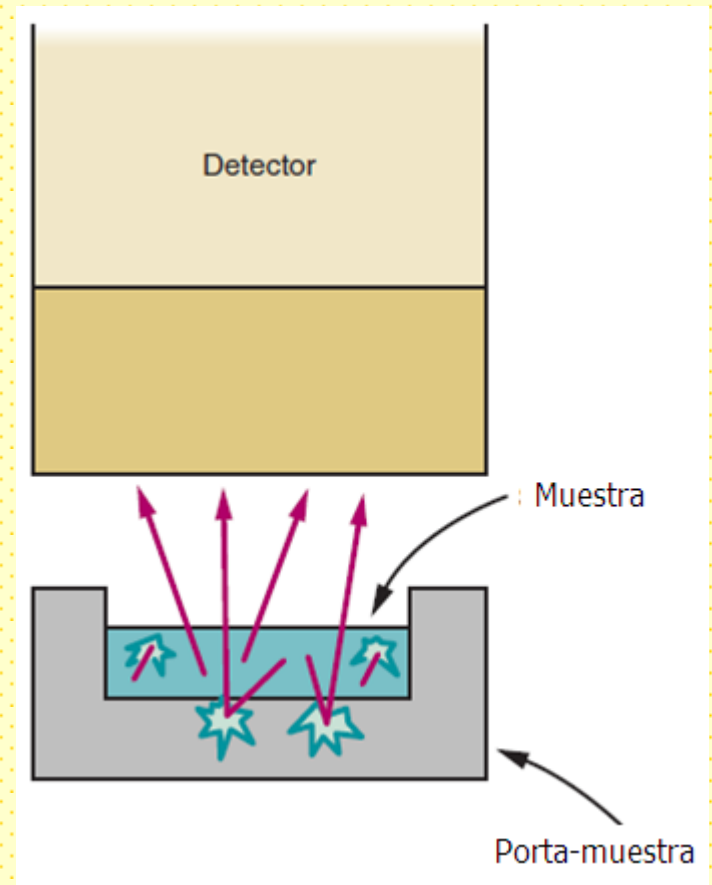
Para agua $\rho = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$. Por lo tanto, $1 \text{ mg}/\text{cm}^2$ corresponde a un espesor de 0.001 cm

Detección de partículas β .

Problema importante:
autoabsorción y dispersión de los electrones.

Dispersión de las partículas β en el porta-muestras y la misma muestra incrementa el conteaje, y un 20-30% del mismo puede corresponder a electrones dispersados.

El problema de dispersión y autoabsorción implica que debe tenerse mucho cuidado en la preparación de las muestras, para lograr la mayor uniformidad en las mismas para poder comparar resultados.





Detección de partículas β .

La radiación de bremsstrahlung puede usarse como método indirecto para detectar partículas β usando detectores sensibles a radiaciones más penetrantes (rayos X y γ) como el NaI (TI)

La detección de la radiación de bremsstrahlung se empleó en estudios pioneros empleando ^{32}P para la detección de tumores cerebrales y aún hoy ocasionalmente se emplea para mapear la distribución de radiofármacos marcados con ^{32}P con fines terapéuticos.

La detección de radiación de bremsstrahlung es efectiva sólo en el caso de partículas β de alta energía (por ejemplo, ^{32}P , $E_{\text{max}} = 1.7 \text{ MeV}$) pero no ^{14}C ($E_{\text{max}} = 0.156 \text{ MeV}$).

El método requiere hasta 1000 veces mayor actividad que un emisor de rayos γ debido a la muy baja eficiencia de la producción bremsstrahlung.



Detección de partículas α .

La radiación α , por su bajo poder de penetración en la materia y por ser emitida por núcleos pesados no es de relevancia en Medicina Nuclear (si en otros campos, como ser el estudio de la radioactividad ambiental y contaminación radioactiva).

Por completitud, comentaremos algunas características de la detección de partículas α .

Existen varios tipos de detectores que pueden ser usados para la medida de nucleídos emisores α :

- Cámaras de ionización. } Alta eficiencia de contaje pero muy pobre resolución en energía.
- Contadores proporcionales. }
- Centelladores líquidos y plásticos } tienen la ventaja que el emisor α puede ubicarse dentro del contador, permitiendo detectar la radiación en un ángulo sólido de 4π .
- Semiconductores. } Normalmente usados para la determinación de emisores α en muestras ambientales y residuos, cuando se necesita información espectroscópica.



Detección de partículas α .

La eficiencia de los detectores semiconductores está en el rango 10-45%, mientras que la resolución en energía varía entre 15 keV y 55 keV.

A pesar que la resolución en energía de estos detectores es buena, las pequeñas diferencias en las energías de la partículas α emitidas por diferentes nucleídos torna difícil separar los picos asociados a los diferentes radionucleídos, como en el caso del ^{241}Am y del ^{238}Pu , o del ^{237}Np , del ^{235}U , del ^{234}U y del ^{230}Th .

Así mismo, la autoabsorción en la muestra reducirá la eficiencia de contaje y empeorará la resolución en energía del espectro.



Detección de partículas α .

La principal desventaja de la espectroscopía α es el largo tiempo requerido para el análisis el cual resulta de los largos y costosos procedimientos de separación y de los largos tiempos de adquisición de datos (de 1 a 10 d de adquisición de datos para muestras con actividades menores a 10 mBq).

Sin embargo, debido al costo relativamente bajo del equipamiento estándar y de su mantenimiento, los laboratorios de radioquímica y radioactividad ambiental suelen estar equipados con unidades detectoras.

Debido a los factores antes mencionados la espectroscopía α no es adecuada para una determinación rápida en situaciones de emergencia, las cuales requieren respuestas rápidas.