

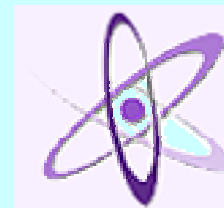


UNIVERSIDAD  
DE LA REPUBLICA

# Espectrometría de Radiación gamma

**B.C. Paola Audicio**

**Asistente de Radiofarmacia, CIN**



**C I N** Centro de  
Investigaciones  
Nucleares  
Facultad de Ciencias - Universidad de la República

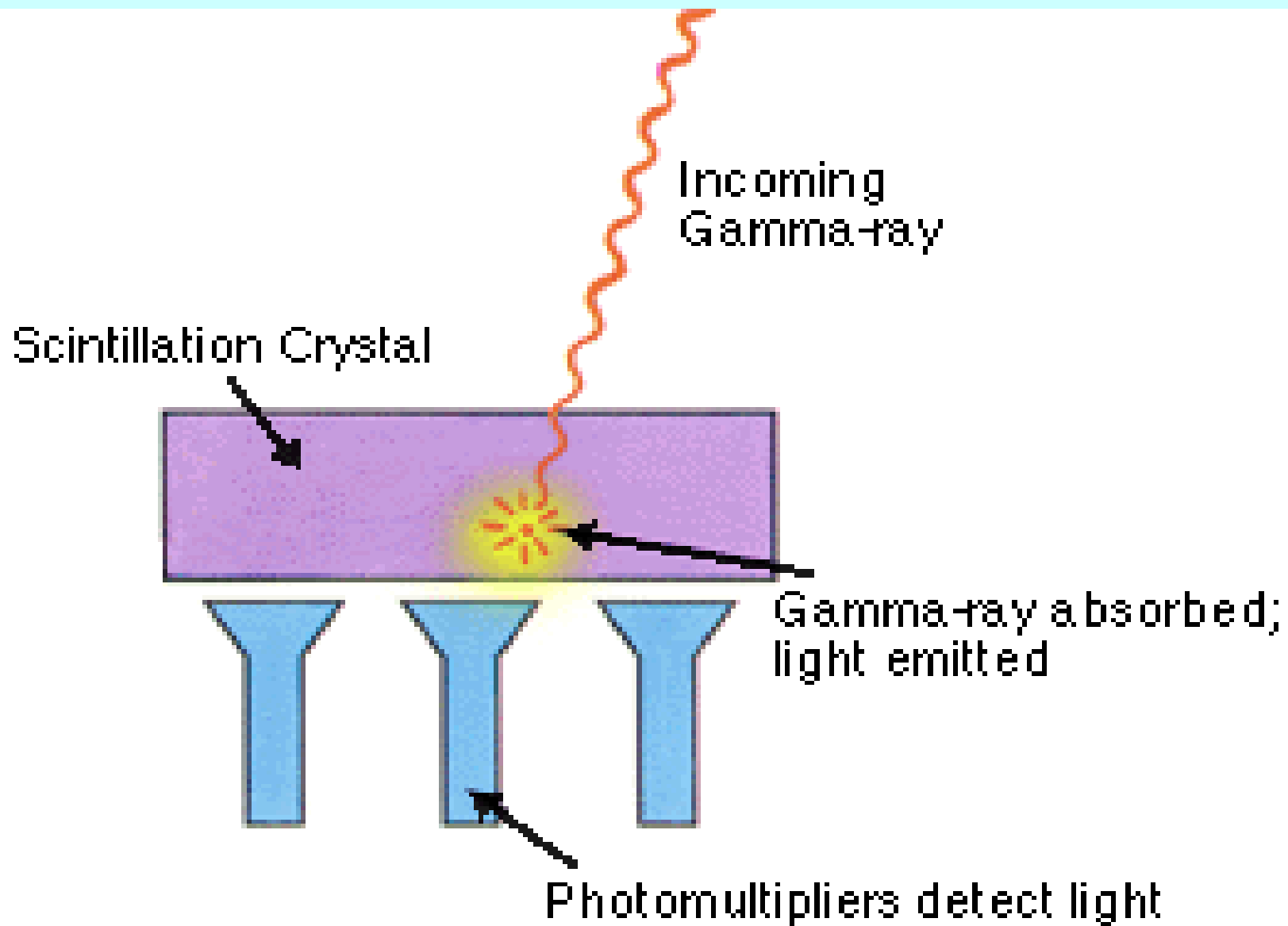
# Fundamento

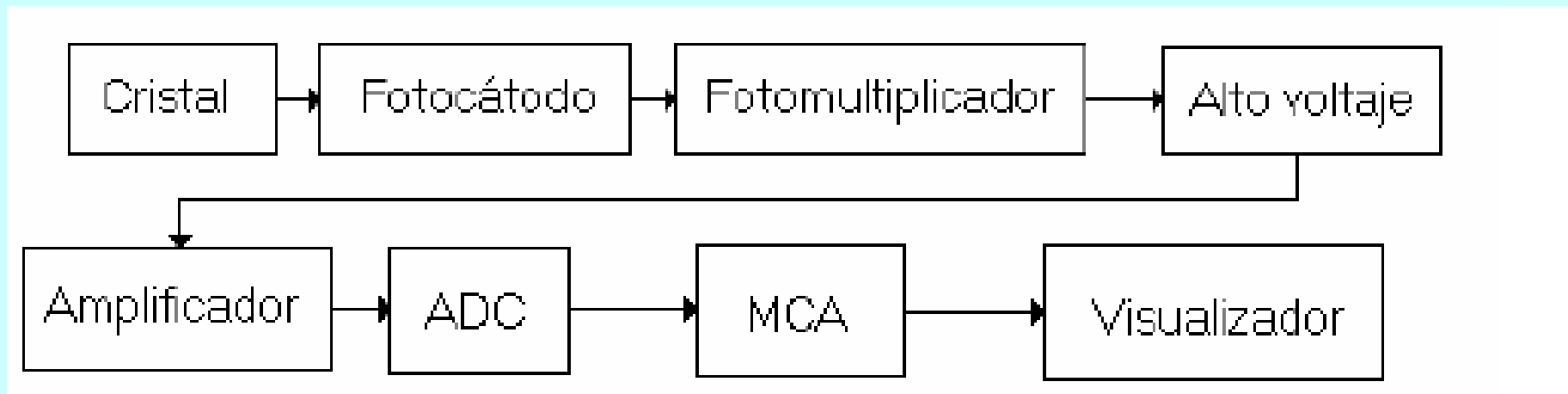
- La espectrometría gamma consiste en la obtención del espectro de las radiaciones gamma emitidas por los radionucleidos.
- La espectrometría gamma clásica está asociada con los detectores de centelleo sólido, especialmente los de NaI(Tl).
- Recientemente han aparecido los detectores de semiconductores (Si, Ge, CdTe,  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ,  $\text{HgI}_2$ ,  $\text{PbI}_2$ ) cuya aplicación ha revolucionado completamente esta técnica debido a su elevado poder de resolución.

- Se basa en que la respuesta del detector es proporcional a la energía del rayo gamma detectado, lo que permite obtener su espectro de energías.
- Espectro diferencial:  $dN/dE$  vs.  $E$
- Factores que determinan el espectro
  - Tipo de detector
  - Energía de la radiación
  - Tamaño del detector
  - Materiales que rodean el detector (especialmente blindaje)
  - Otras radiaciones de la muestra

# Detectores de centelleo sólido

- La interacción del rayo gamma con el material centelleante produce emisión de luz de baja energía que es captada por los fotomultiplicadores.
- La eficiencia aumenta con el tamaño de detector.
- Resolución depende entre otras cosas de las condiciones de crecimiento del cristal

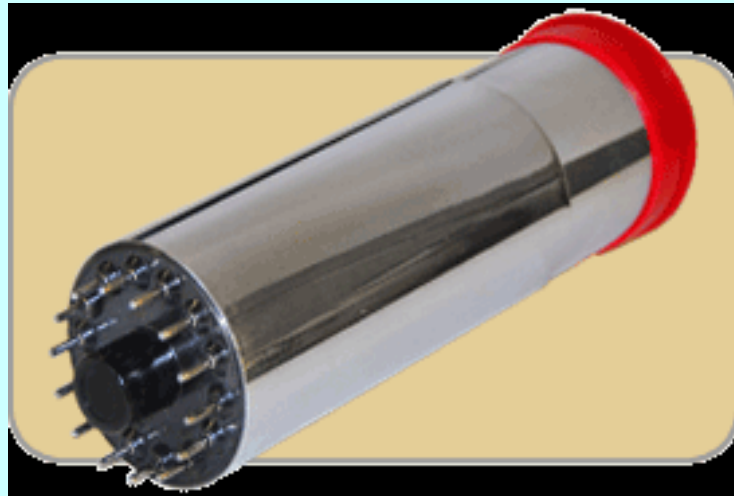




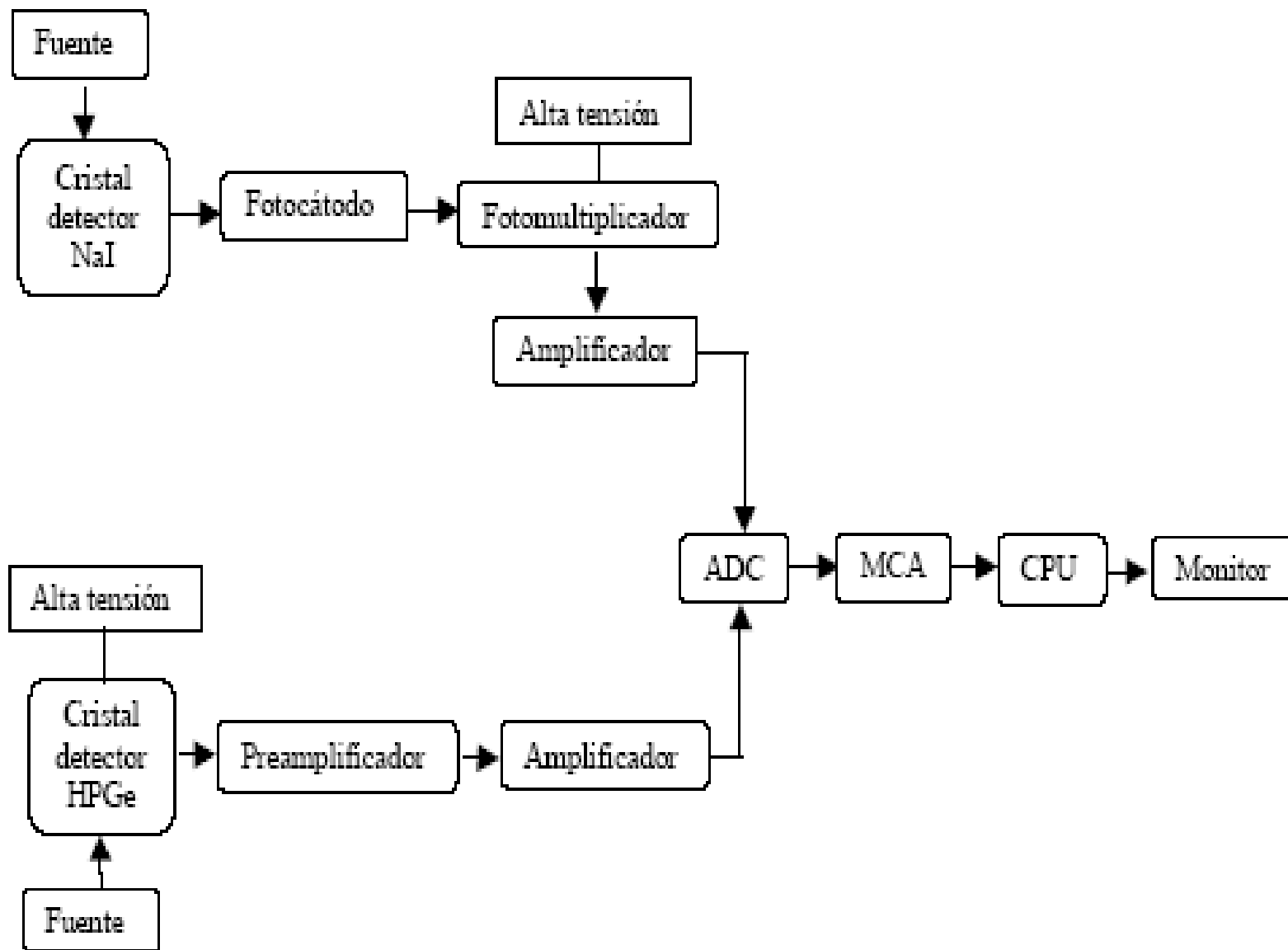
- **MCA:** Clasifica los pulsos según su amplitud o altura la cual es proporcional a la energía de la radiación incidente. Al contar los pulsos de determinada altura y hacer con estos un histograma el MCA almacena el espectro tal como es visto por el detector.

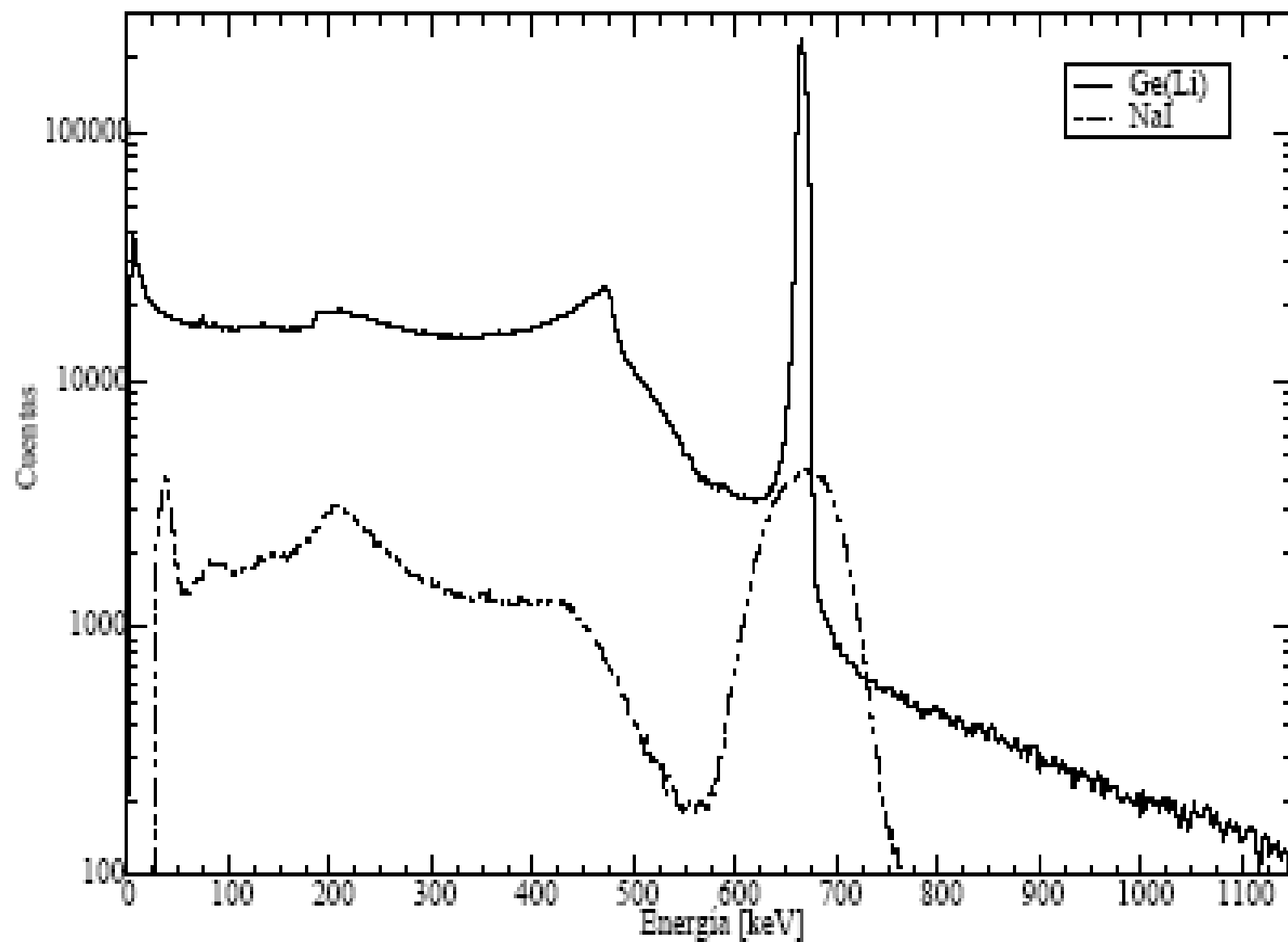
# Detectores de Semiconductores

- Sólidos cristalinos (ej Ge y Si) con pequeñas cantidades de materiales llamados dopantes que permiten el control de la conducción eléctrica.
- Si alguna radiación penetra, crea un par electrón-hueco, los electrones fluyen en una dirección y las vacantes en la otra. El número final de electrones recogidos pueden crear un pulso electrónico cuya amplitud es proporcional a la energía de la radiación.









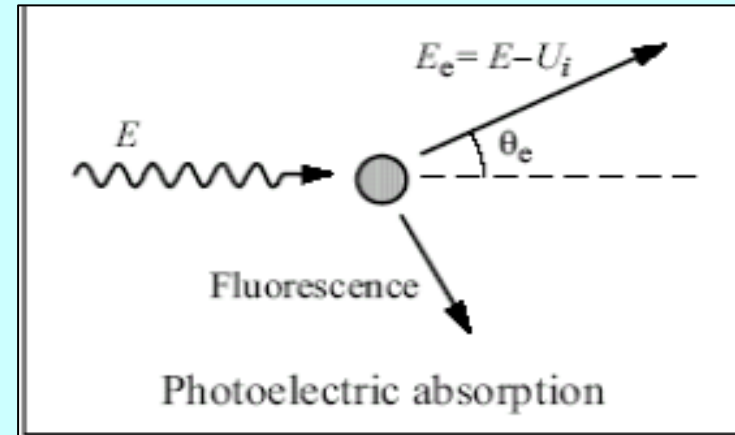
Espectro  $\gamma$  de  $^{137}\text{Cs}$

# Procesos en el detector

- efecto fotoeléctrico,  $\mu_f$
- efecto Compton,  $\mu_c$
- efecto de producción de pares,  $\mu_{pp}$

## Efecto fotoeléctrico:

$$E_{e^-} = E_{\gamma} - E_I \approx E_{\gamma}$$

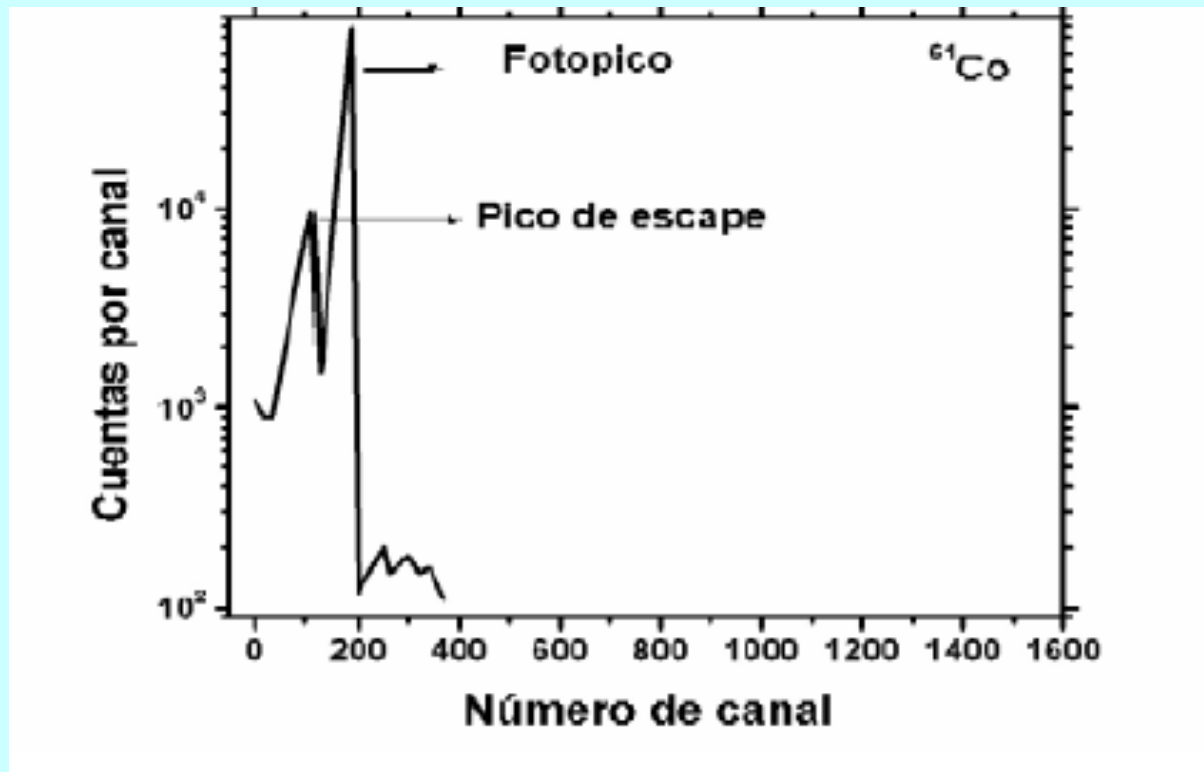


Resultado del proceso:

Ocurre una vacante en una capa electrónica de los átomos del cristal, emisión de rayos X:  
para detectores de ***NaI (TI) rayo X de 28 keV correspondiente al yodo***

## Rayo X de 28 keV

- Nuevo efecto fotoeléctrico:  
Toda la energía es cedida al cristal
- Escapa fuera del cristal:  
Aparece PICO DE ESCAPE DE RAYOS X a 28 keV menos que fotopico



## Pico de escape:

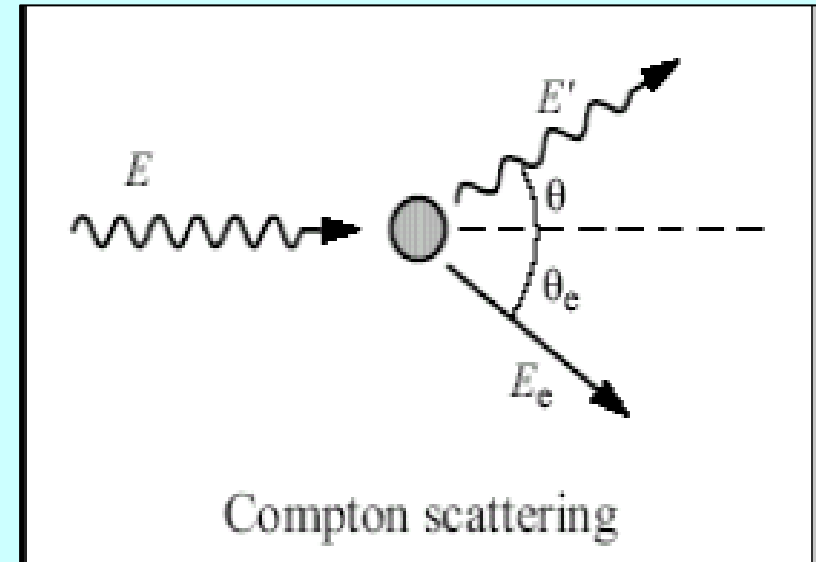
- Disminuye al incrementarse la energía del fotón
- No se observa cuando la energía incidente es superior a 160 keV.

## Efecto Compton:

Fotón cede parcialmente su energía al cristal

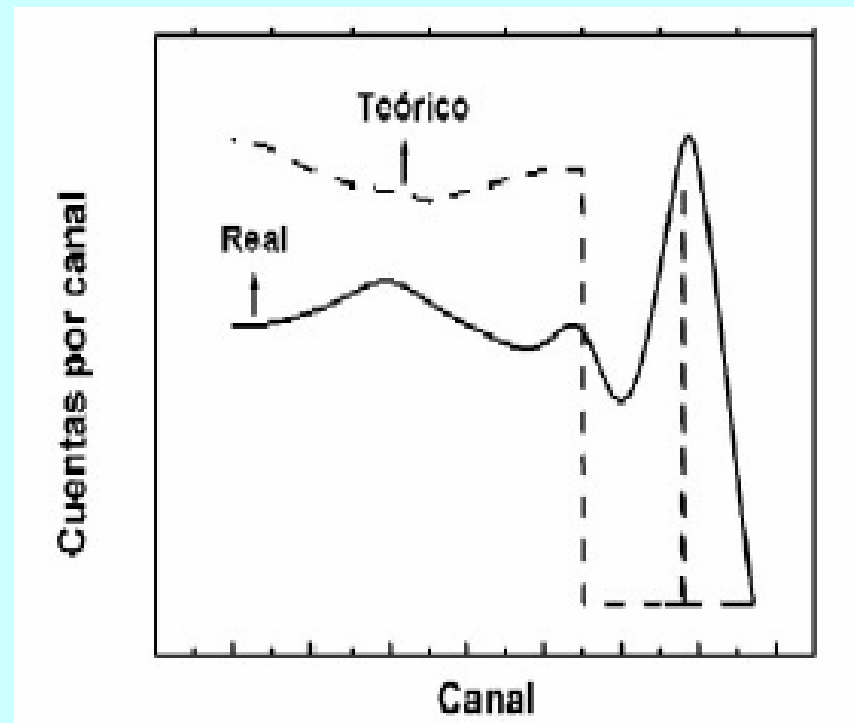
La nueva radiación gamma puede dar:

- Nuevos efectos Compton + Efecto fotoeléctrico → Cede completamente su energía
- Efectos Compton → Escapa del cristal → Cede parcialmente su energía



## Diferencias entre espectro real y teórico

- Forma gaussiana distorsión introducida por los procesos de detección, procesamiento y medida por el sistema de espectrometría.
- Área del fotopico ampliada: teórico considera solo un efecto Compton





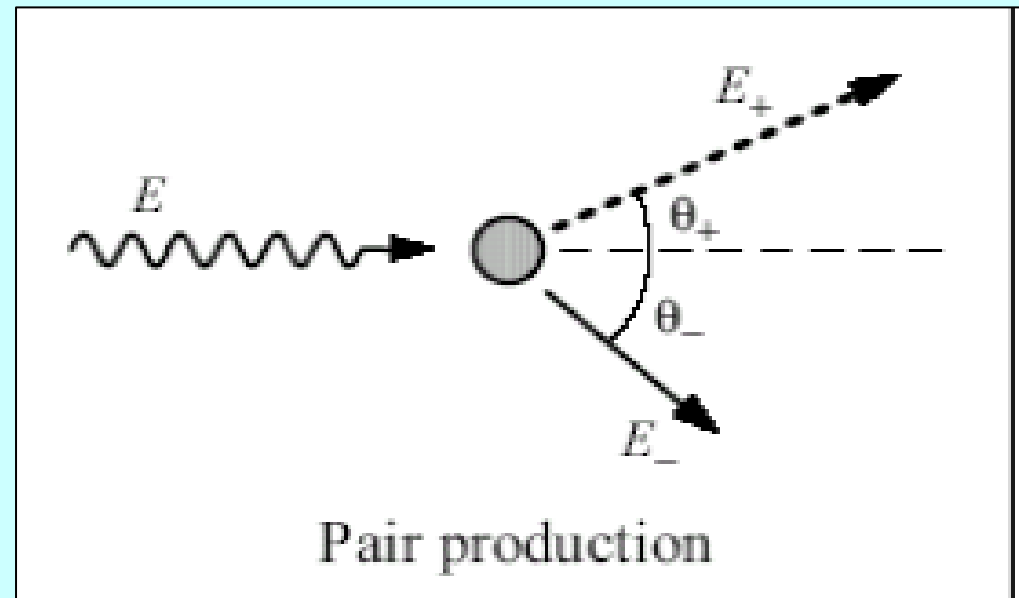
➤ *Borde Compton:*

- debido a la baja probabilidad de que radiación de muy baja energía abandone el cristal.
- corresponde a la máxima energía que puede depositar un rayo gamma en una única interacción Compton dentro del centelleador. Se determina como:

$$E_{em\acute{a}x} \cong \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{1}{4 \cdot E_{\gamma}}} \quad \text{con } E_{\gamma} \text{ en MeV}$$

## Producción de pares: $e^-$ y $e^+$ :

El proceso puede ocurrir sólo si la energía del fotón incidente es  $> 1.02$  MeV.



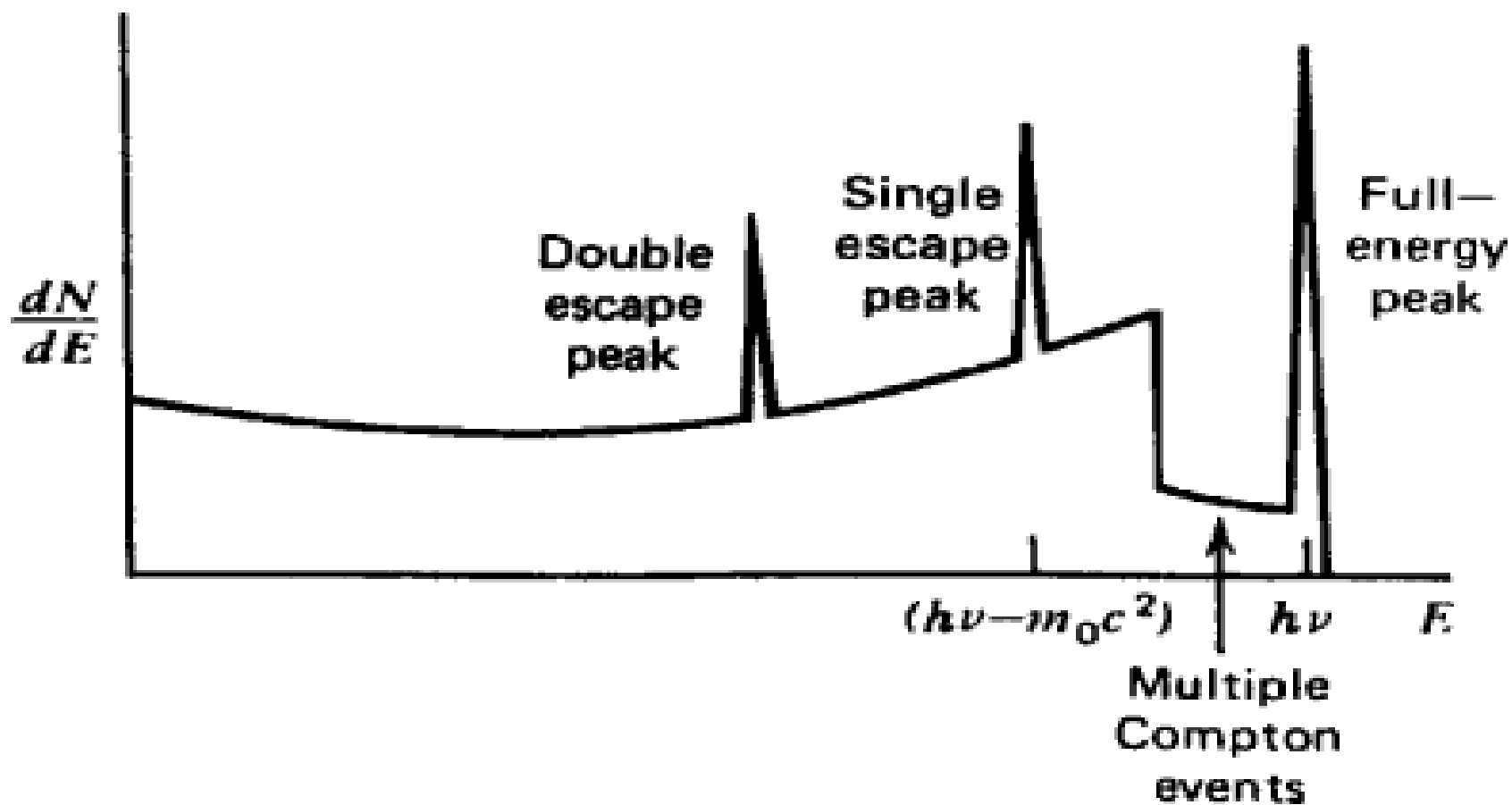
Energía cinética de las partículas:

$$E_c = (E_\gamma - 1.02) \text{ MeV}$$

***Se observa cuando la energía de la radiación gamma es superior a los 3 MeV.***

- El electrón producido cede su energía a los electrones del cristal y por tanto su efecto se suma al Compton continuo.
- El positrón colisiona con un electrón: PROCESO DE ANIQUILACION, dando lugar a 2 fotones gamma de 0.51 Mev c/u que salen en direcciones opuestas.
  - Si ambos fotones se absorben dentro del cristal su efecto se suma al FP.
  - Si uno de ellos escapa del cristal: PICO DE ESCAPE SIMPLE, en 0.51 Mev menos que el FP.
  - Si ambos escapan del cristal: PICO DE ESCAPE DOBLE, en 1.02 Mev menos que el FP.
- Estos fenómenos dependen en gran medida del tamaño y geometría del medio sensible, así como del lugar donde se produce la aniquilación.

$$h\nu \gg 2m_0c^2$$

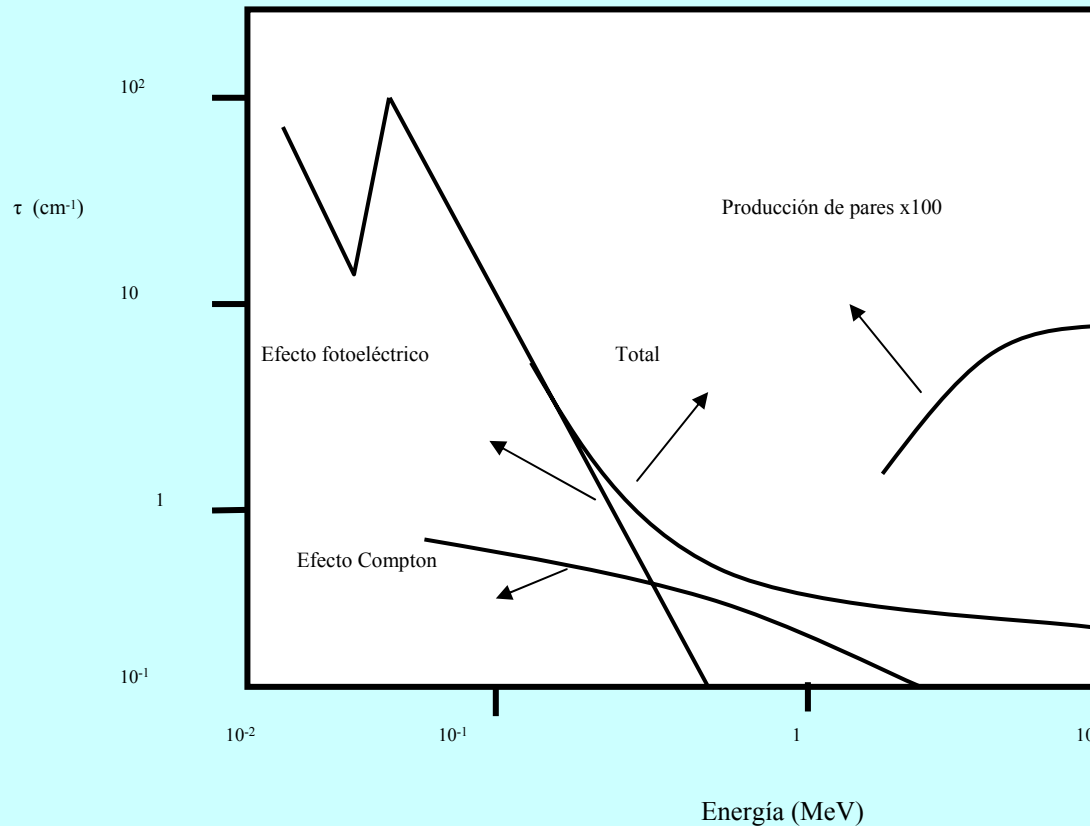


# Probabilidad de absorción de la radiación gamma por cualquiera de estos procesos

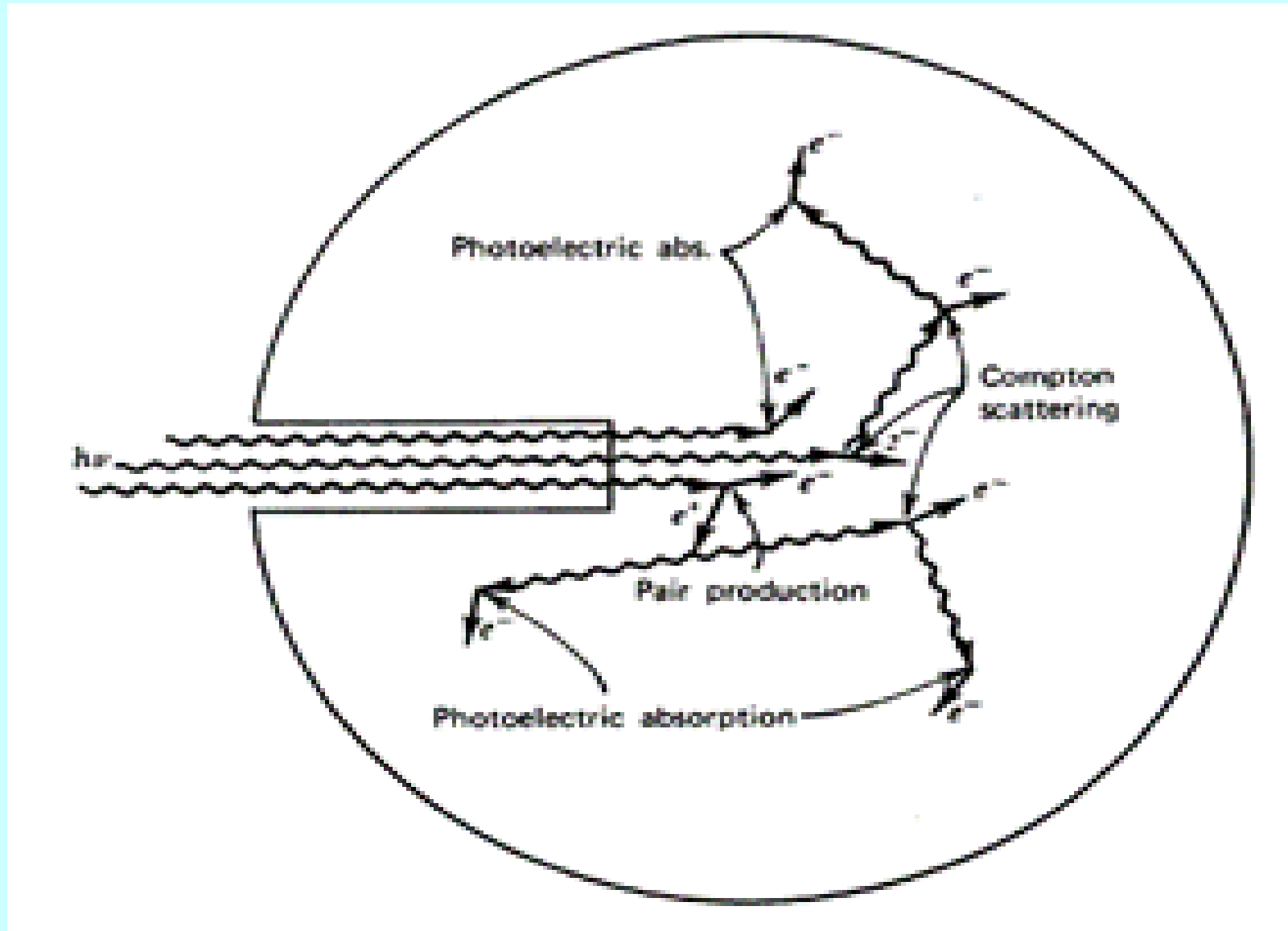
**$E_\gamma < 300 \text{ keV}$  →  
predomina efecto  
fotoeléctrico**

**$E_\gamma > 300 \text{ keV}$  →  
predomina efecto  
Compton**

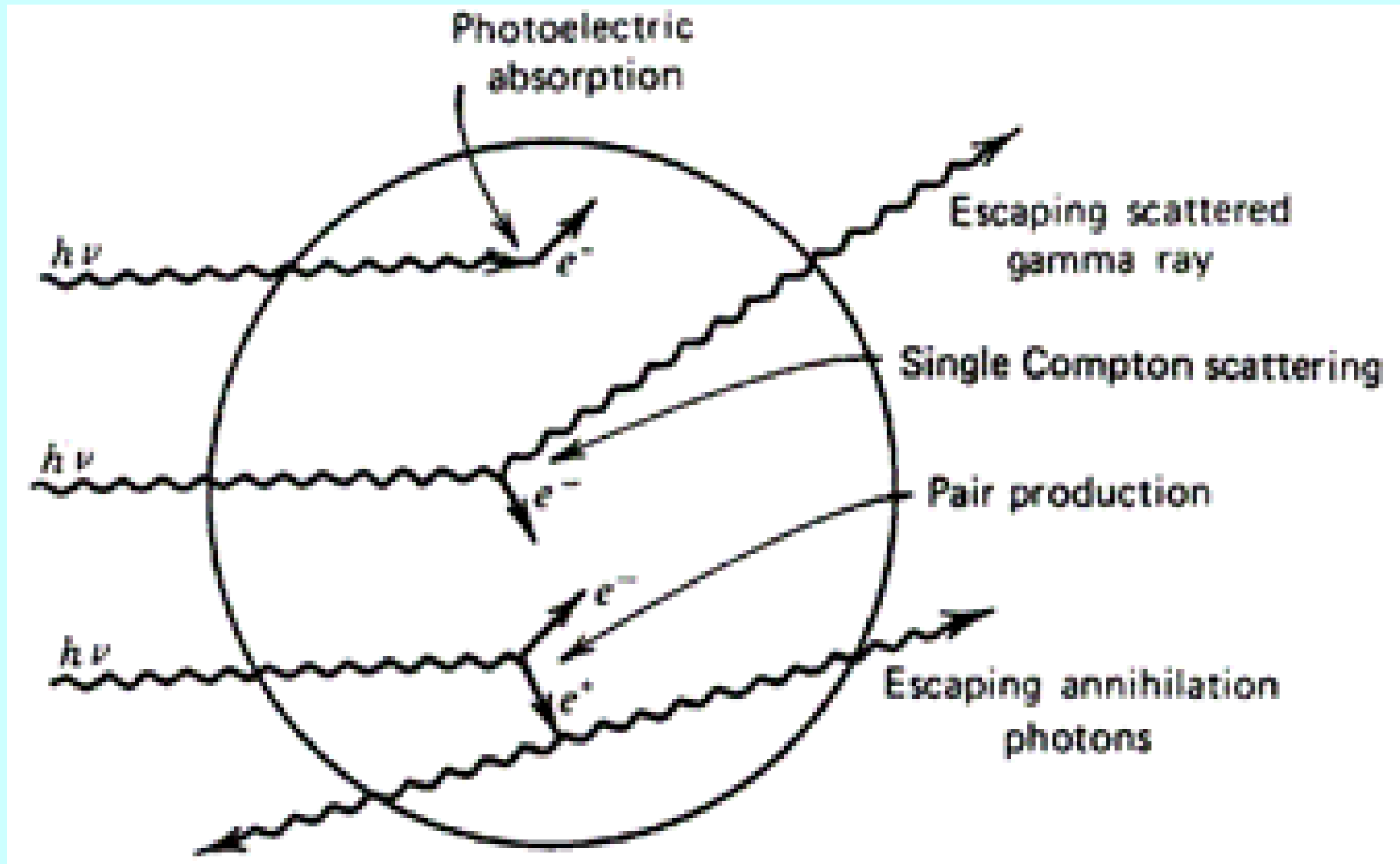
**$E_\gamma > 3 \text{ MeV}$  →  
Comienza a ser  
significativa la  
producción de  
pares**



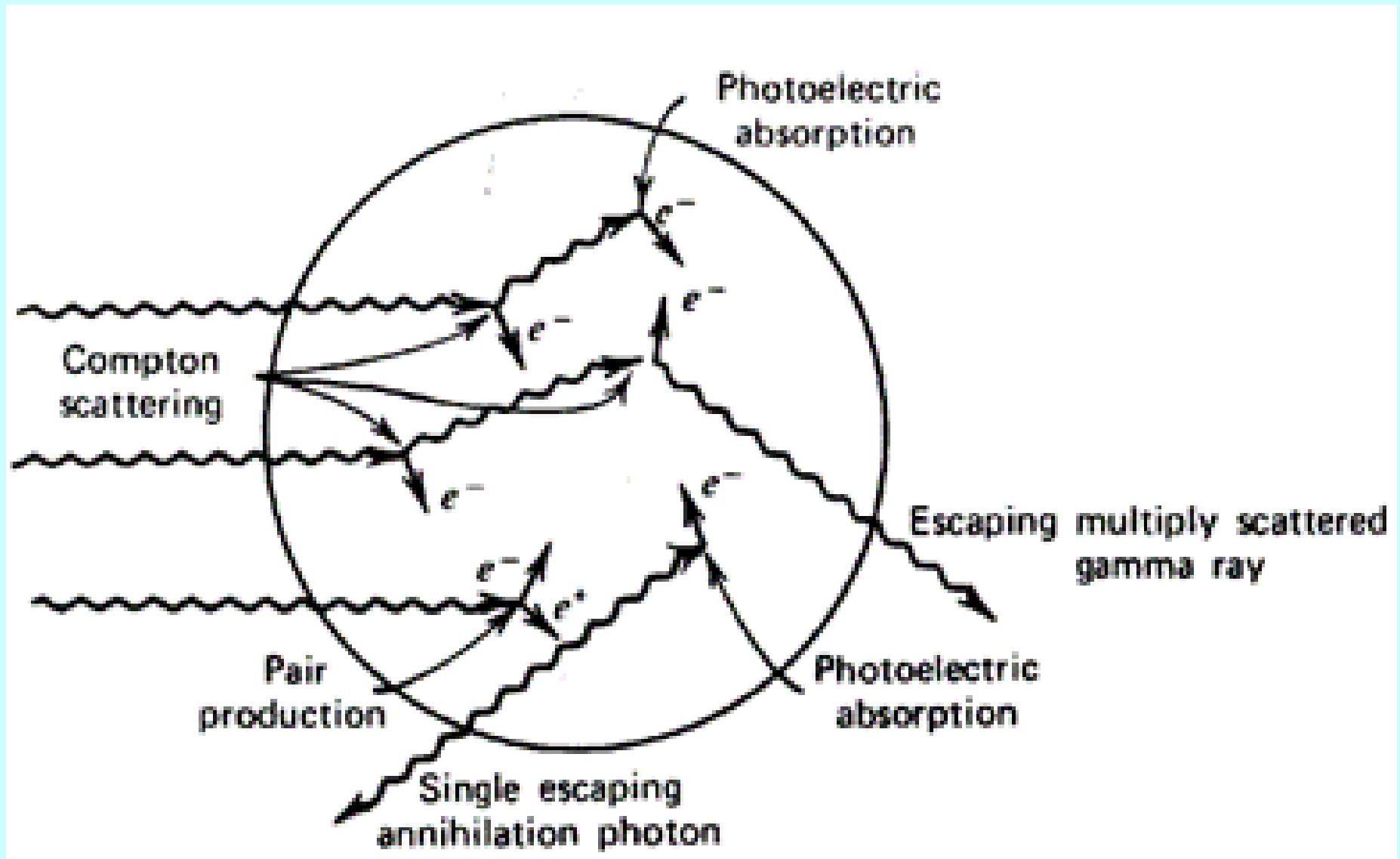
## Detector de gran tamaño



## Detector de tamaño pequeño



## Detector de tamaño medio

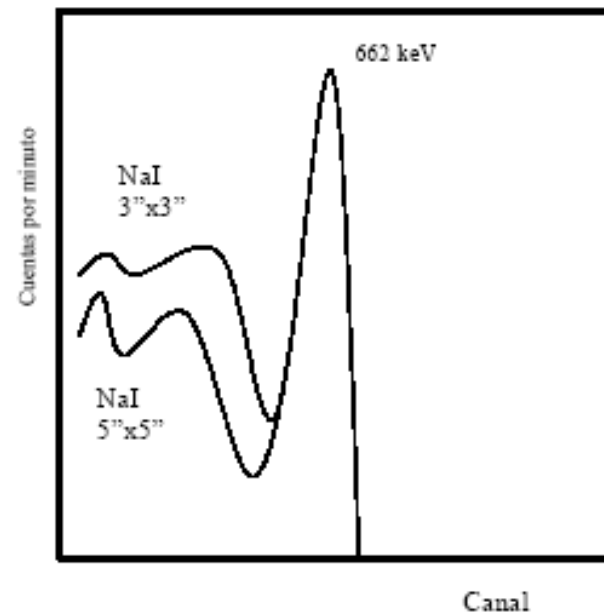




# Tamaño del detector

Aumento de tamaño:

- Aumenta probabilidad de absorción por efecto fotoeléctrico → Aumenta tamaño del fotopico y disminuye efecto Compton
- Disminución de los picos de Escape simple y Escape doble



# Efectos debido al medio que rodea al detector

- Producción de rayos X en el blindaje
- Efecto de rebote o dispersión
- Efecto de radiación de aniquilación

## Producción de rayos X en el blindaje

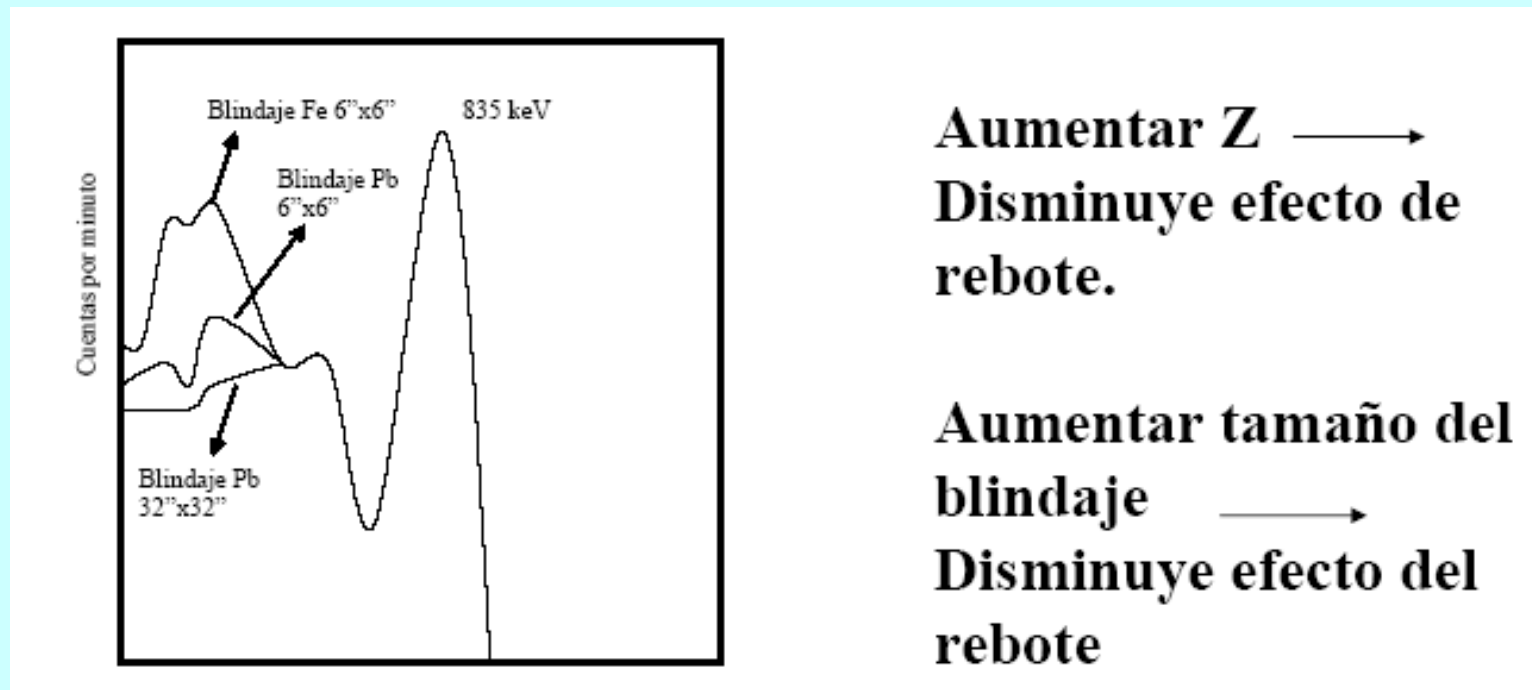
Fotones gamma producen efecto fotoeléctrico en el Pb del blindaje → Rayo X característico del Pb 72 keV

Para evitarlo:

- Recubrimiento del blindaje con materiales de menor Z (Cd, Cu)
- Aumento de las dimensiones del blindaje

## Efecto de rebote o dispersión

Fotones gamma que tienen interacción Compton con los átomos del blindaje y salen rechazados con energía menor. Aparece "banda" en 200-300 keV. Influyen dos variables: número atómico del blindaje y dimensiones del blindaje.



**Aumentar  $Z$   $\longrightarrow$   
Disminuye efecto de rebote.**

**Aumentar tamaño del blindaje  $\longrightarrow$   
Disminuye efecto del rebote**

# Radiación de Aniquilación

- Formación de Pares en el Blindaje si  $E_{\gamma} > 1.02 \text{ MeV}$  → Aparece fotopico a 510 keV
- Disminuye eliminando de las cercanías del detector los materiales de alto Z

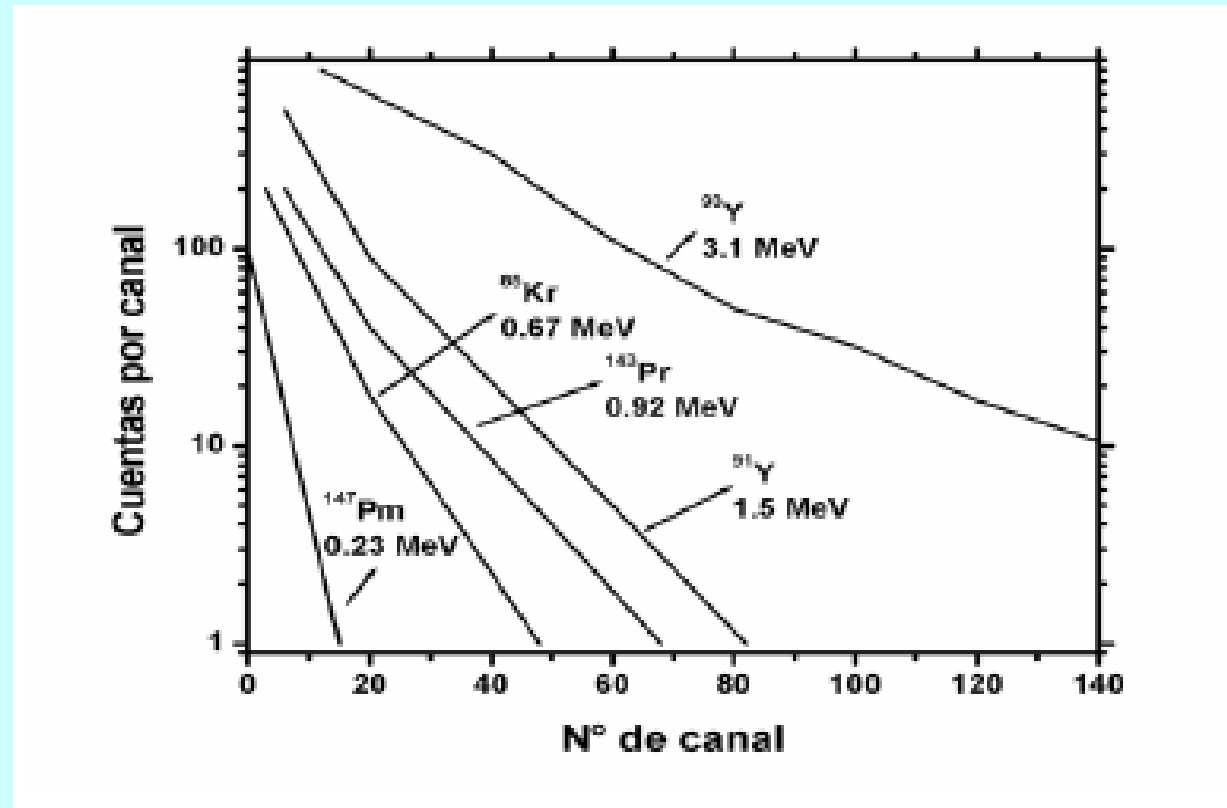
# Efectos especiales de respuesta del detector

- Bremsstrahlung
- Efectos de detección de positrones
- Efectos de suma (por coincidencia o por azar)

# Bremsstrahlung

- Si la muestra es emisor beta, la radiación beta es frenada por detector, ventana y blindaje y se emite radiación X continua.

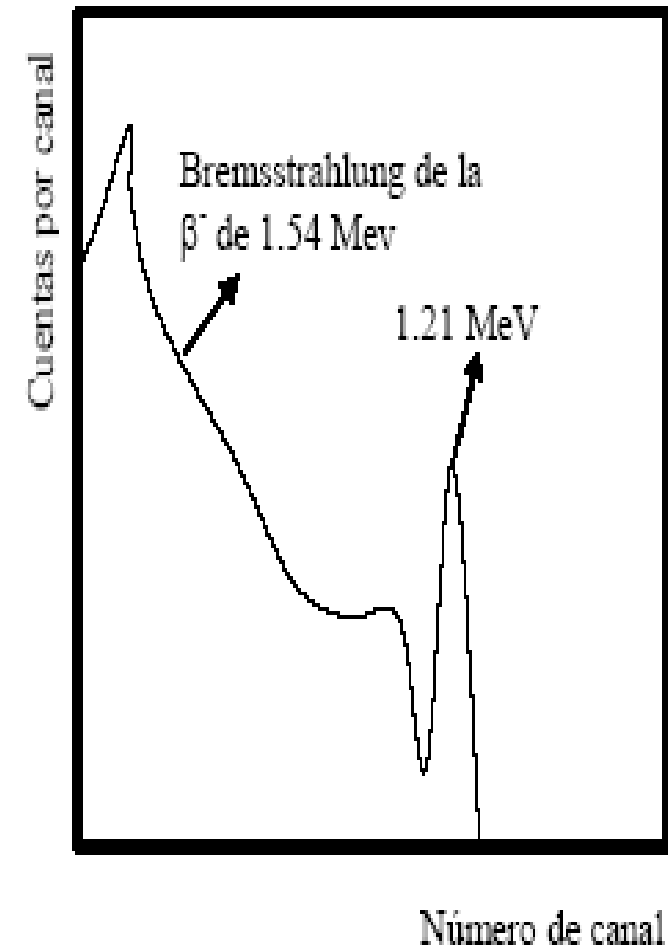
- Espectro continuo de 0 a  $E_{\text{máx}}$  de la radiación beta



➤ Presente en la mayoría de las muestras pues casi todos los emisores gamma son emisores beta

➤ Para minimizarlo → absorbente de bajo Z (poliestireno, berilio, aluminio)

➤ Cambio en la sima Compton a costa de la disminución del fotopico



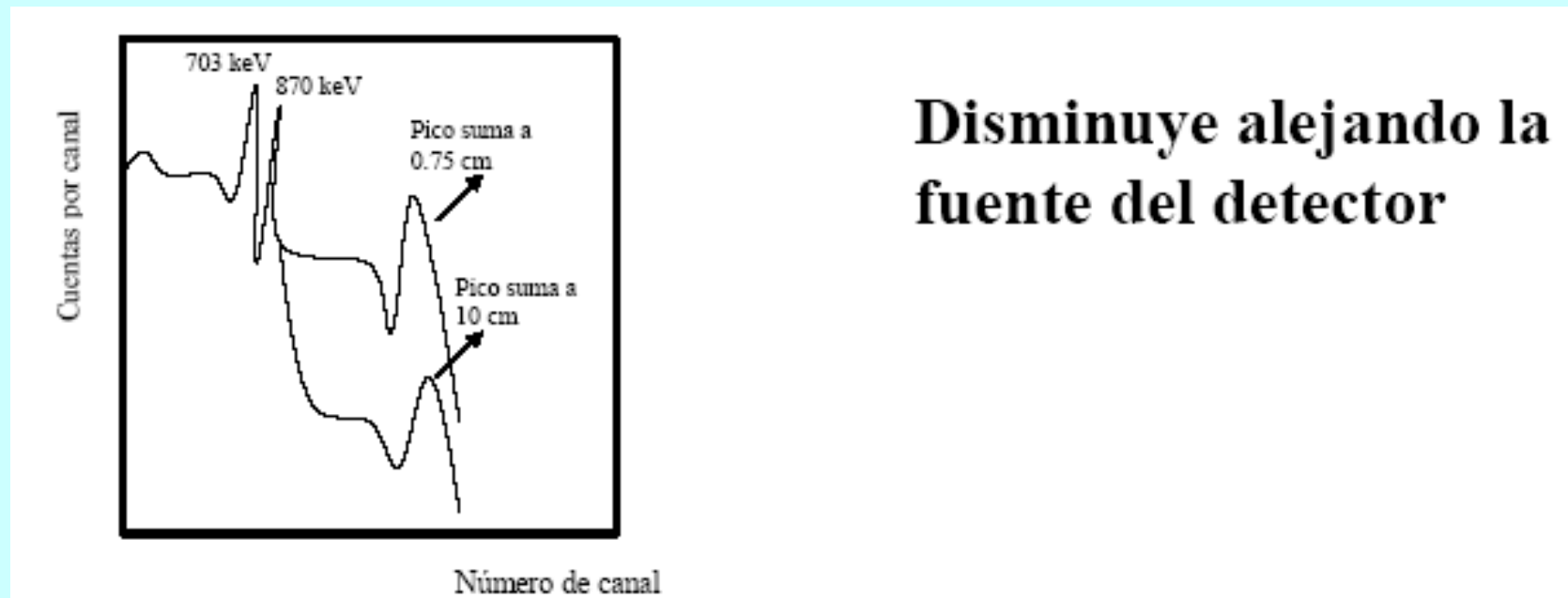


## Efectos de Suma

- Debidos al tiempo finito de respuesta del sistema aparece pico que es suma de las energías de las diferentes radiaciones gamma. Dos tipos de efectos suma:
  - Suma por coincidencia
  - Suma por azar

## Suma por coincidencia

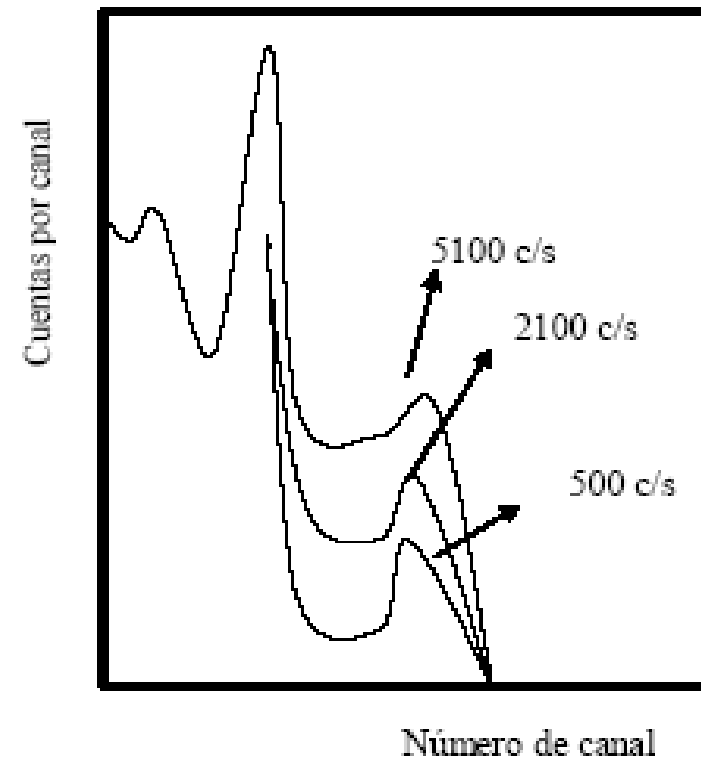
- Decaimiento beta seguido frecuentemente por la emisión de dos radiaciones gamma
- probabilidad finita que ambos sean detectados simultáneamente



## Suma por azar

- Para fuentes de alta intensidad → probabilidad que dos radiaciones gamma cedan su energía en el mismo tiempo al detector

Influencia de la velocidad de conteo del detector



# ALGUNOS PARAMETROS CARACTERISTICOS DEL DETECTOR

- **tamaño y geometría del medio sensible**
- **eficiencia:** es la relación entre los pulsos realmente captados por el detector y los fotones de esa energía emitidos por la fuente.

$$\text{Eff} = \frac{\text{Cuentas/t}}{\text{Desinteg/t}}$$

- **poder de resolución:** es una medida de las posibilidades del detector de distinguir en el espectro la presencia de dos fotones gamma de energías muy próximas.

$$\text{Res (\%)} = \frac{X}{Y} \times 100$$

X= ancho del FP en la mitad de su altura máxima  
Y= energía del FP (en keV)

El ancho del FP es una consecuencia de las fluctuaciones estadísticas en cada etapa de la cadena de sucesos que siguen al efecto generador de la ionización de los átomos del detector.

# Series radiactivas naturales

- De los más de 2000 nucleidos conocidos al presente, sólo un poco más del 10% son estables (271) siendo el resto inestables: radionucleidos.
- Estos presentan 1 ó más etapas de decaimiento hasta alcanzar un nucleido estable.
- Todos los elementos con  $Z > 83$  (Bi) son radioactivos. De ellos sólo 3 presentan  $T_{1/2}$  suficientemente largos como para todavía existir en la naturaleza, siendo el punto de partida de las 3 SERIES RADIOACTIVAS NATURALES :

- LA SERIE (4n) DEL Th:            232-Th ----- 208-Pb  
ESTABLE
- LA SERIE (4n+2) DEL U-Ra:    238-U ----- 206-Pb  
ESTABLE
- LA SERIE (4n+3) DEL Ac:        235-U ----- 207-Pb  
ESTABLE

Además siempre se encuentra al 40-K, también por su largo período

	Ventajas	Desventajas
NaI(Tl)	<p>Bajo Precio</p> <p>Operación a T amb</p> <p>Alta Eficiencia</p>	<p>Baja resolución</p>
Ge(Li)	<p>Alta resolución</p>	<p>Operación a 77K, refrigeración con N<sub>2</sub> L</p> <p>&gt; Relación Compton/ fotoeléctrico</p> <p>&gt; Probabilidad de escape de <math>\gamma</math> secundarios</p>