

# Espectroscopia de Fotones

## Módulo de Instrumentación

José Ocariz (UP, Francia)  
Reina Camacho (CNRS, Francia)



Latin American alliance for  
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el  
programa Erasmus+  
de la Unión Europea





# OBJETIVOS DE ESTA PRÁCTICA

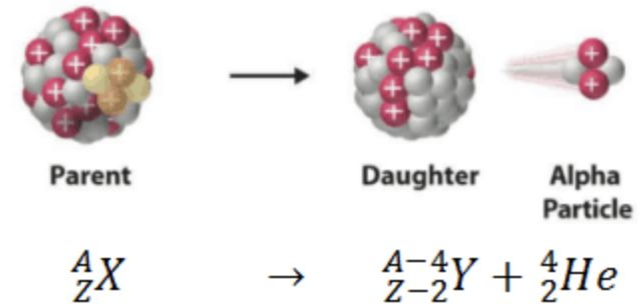
- Estudiar la emisión de rayos gamma de distintos elementos radioactivos
  - El origen de las partículas detectadas en el experimento puede ser diverso:
    - Los fotones son emitidos en las transiciones nucleares desde un estado excitado a otro de menor energía (asociado a procesos radioactivos)
    - O por el contrario, producidos durante la la aniquilación de un positrón emitido por el átomo con un electrón exterior a este
- Familiarizarse con los sistemas de detección en física nuclear y su caracterización
- Analizar los datos de espectroscopia de fotones, usando nociones elementales de estadística



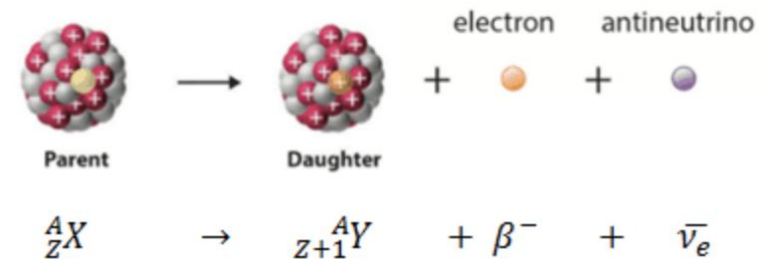
# DECAIMIENTOS RADIOACTIVOS

- La radiactividad es el proceso asociado a la liberación de energía de un átomo cuando pasa de un estado de energía elevado a uno fundamental (o de menor energía)
  - Ocurre naturalmente en isótopos inestables de diferentes elementos como el uranio, el cesio, el sodio, etc.
- La liberación de energía puede ocurrir de diversas formas:
  - Liberando partículas pesadas, sea electrones, protones, neutrones, etc. (rayos  $\alpha$  y  $\beta$ )
  - Variando la energía de su núcleo (rayos  $\gamma$ )
  - Variando la configuración de sus electrones (rayos X)
- Radiación  $\gamma$  es un proceso de desexcitación
  - Sigue a otros fenómenos radioactivos
  - La frecuencia del fotón emitido depende tanto de la diferencia de energías entre el estado inicial y final del nucleón como del elemento al cual pertenece el átomo

Radioactividad  $\alpha$



Radioactividad  $\beta$

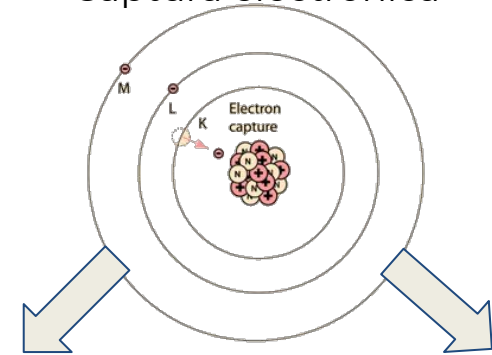




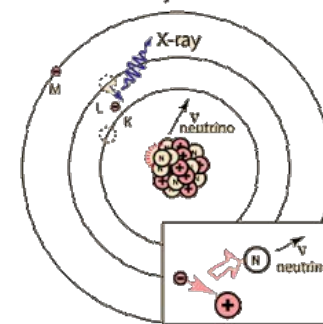
# DECAIMIENTOS RADIOACTIVOS

- La radiactividad es el proceso asociado a la liberación de energía de un átomo cuando pasa de un estado de energía elevado a uno fundamental (o de menor energía)
  - Ocurre naturalmente en isótopos inestables de diferentes elementos como el uranio, el cesio, el sodio, etc.
- La liberación de energía puede ocurrir de diversas formas:
  - Liberando partículas pesadas, sea electrones, protones, neutrones, etc. (rayos  $\alpha$  y  $\beta$ )
  - Variando la energía de su núcleo (rayos  $\gamma$ )
  - Variando la configuración de sus electrones (rayos X)
- Radiación  $\gamma$  es un proceso de desexcitación
  - Sigue a otros fenómenos radioactivos
  - La frecuencia del fotón emitido depende tanto de la diferencia de energías entre el estado inicial y final del nucleón como del elemento al cual pertenece el átomo

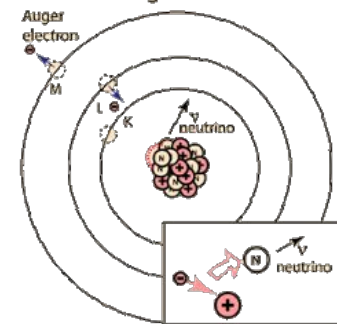
Captura electrónica



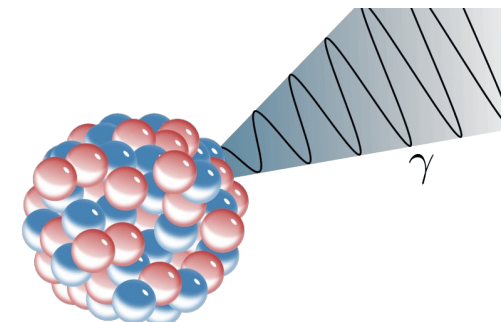
X-ray emission



Auger effect



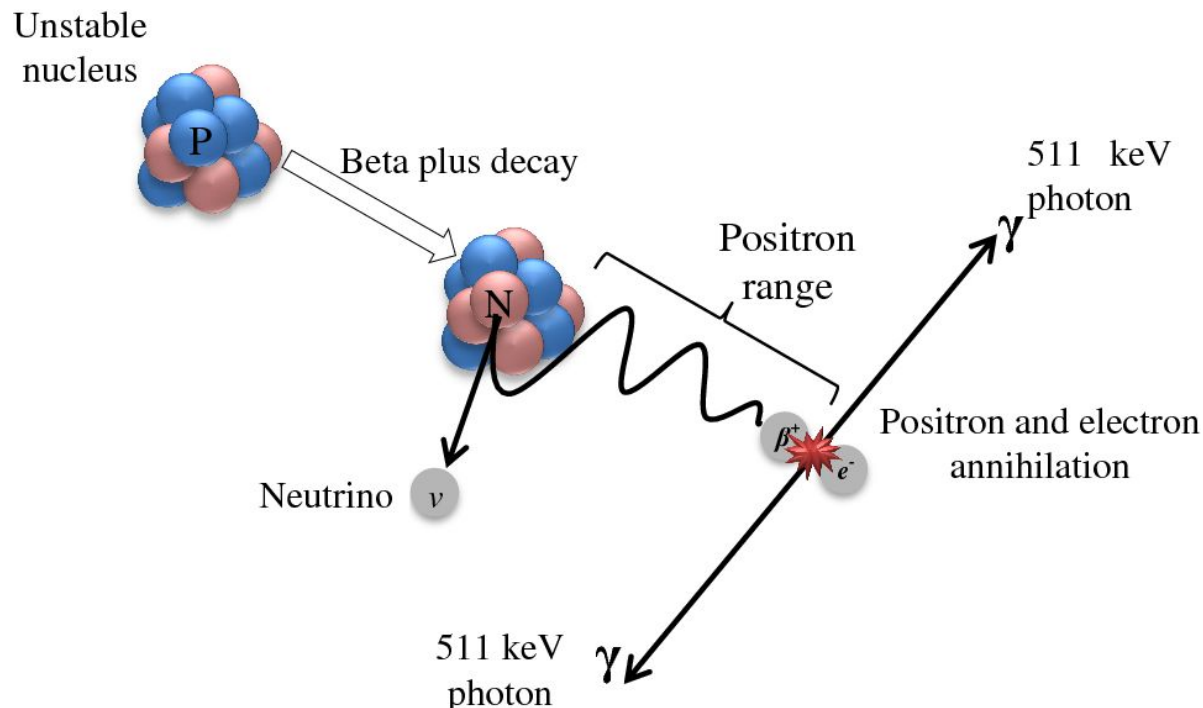
Radiación  $\gamma$





# ANIQUILACIÓN POSITRÓN-ELECTRÓN

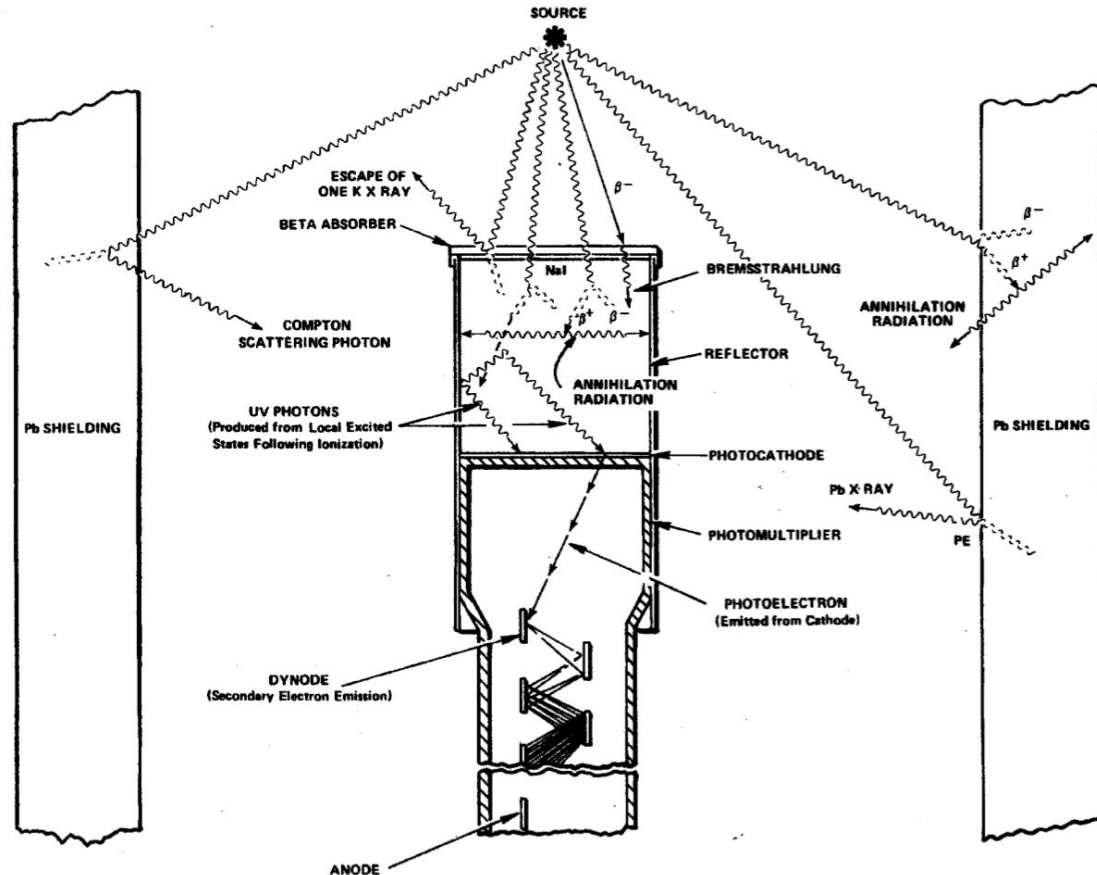
- Los fotones pueden haberse generado debido al decaimiento de un átomo a un nivel inferior de energía o, por el contrario, a la aniquilación de un positrón emitido por el átomo con un electrón exterior a este
- Si el positrón emitido entra en contacto con un electrón ambos se aniquilarán generando un par de fotones viajando en sentidos contrarios. La energía de cada fotón es igual a la energía en reposo del electrón, 511 keV





# ¿Y CÓMO DETECTAMOS LOS FOTONES?

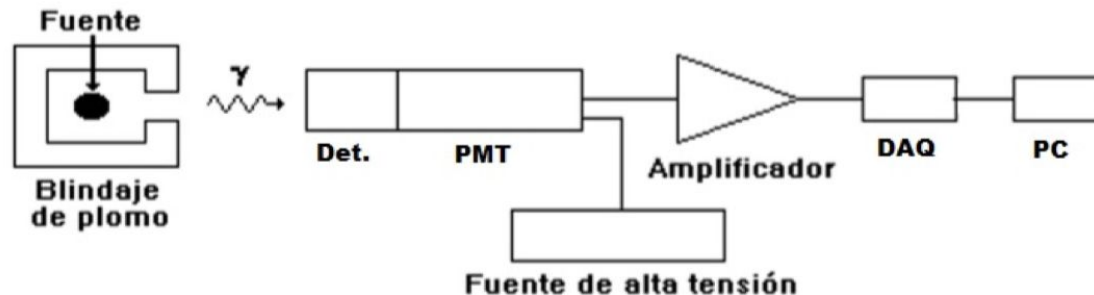
- $\gamma$  interacciona con un cristal de NaI(T) transfiriendo toda (absorción fotoeléctrica, producción de pares) o parte (dispersión Compton) de su energía a un  $e^-$  de aquél, que se mueve de forma errática en él, convirtiendo su energía cinética en luz al colisionar con los átomos de sodio
- Luego, en el fotomultiplicador, estos interactúan con los dinodos del instrumento desprendiendo una cantidad de electrones proporcional a la energía del fotón incidente
- El # de electrones arrancados del fotocátodo es multiplicado por un factor de  $\sim 10^6$





# ¿Y CÓMO DETECTAMOS LOS FOTONES?

- Los electrones terminan generando una corriente que será proporcional al voltaje medido por el sistema de adquisición. El pulso de tensión es amplificado y medido por un Convertidor Analógico Digital (ADC). A los pulsos de tensión entre 0 V y 4 V se les asigna proporcionalmente un entero entre 0 y 4000). A este entero se le llama número de canal.
- La pantalla del PC no muestra la corriente sino su integral en el tiempo, dado que esta es la cantidad de electrones generados por el fotón incidente en función del número de canal (espectro). El proceso de calibración con fuentes que emiten fotones de energía conocida, permite correlacionar el número del canal con la energía del fotón, con lo que el equipo de detección queda calibrado en energía
- Más detalles sobre el montaje experimental en el video a continuación



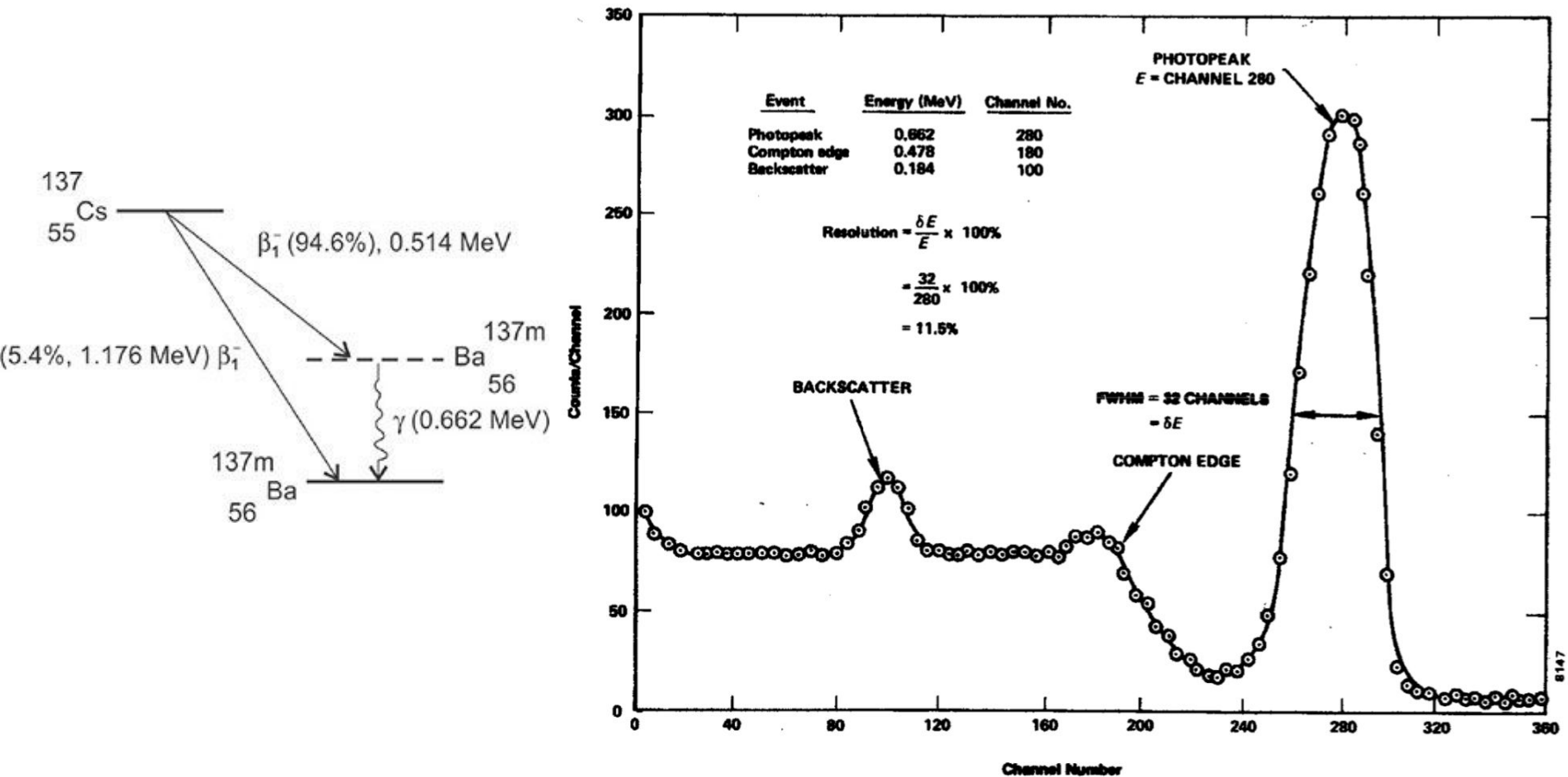
**Det.** Detector de NaI (TI)

**PMT** Fotomultiplicador



# VEAMOS UN ESPECTRO MÁS DE CERCA

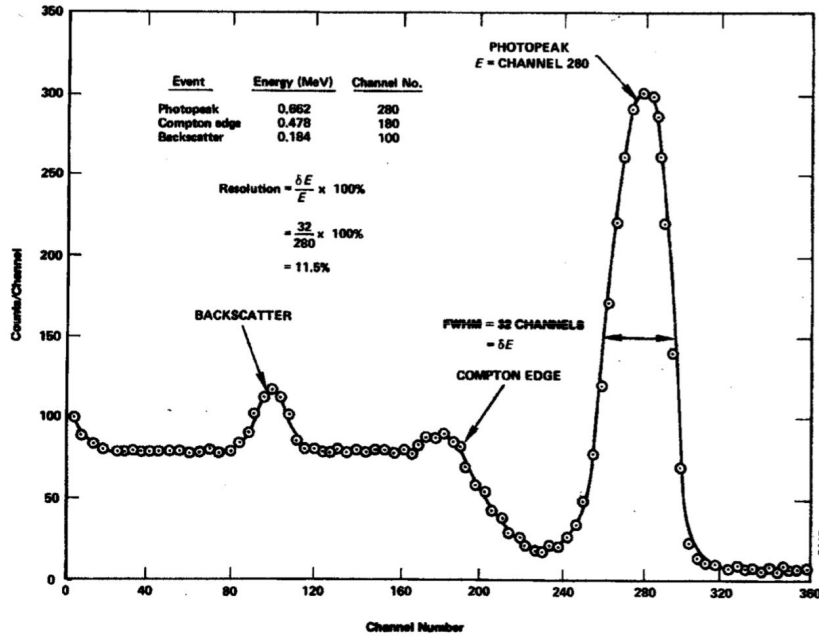
- Un ejemplo: Espectro del Cs-137 obtenido con un detector de NaI(T)
- El espectro gamma de una fuente radioactiva muestra picos pronunciados característicos que corresponden a distintas transiciones nucleares combinadas con la interacción de la radiación con el cristal de NaI



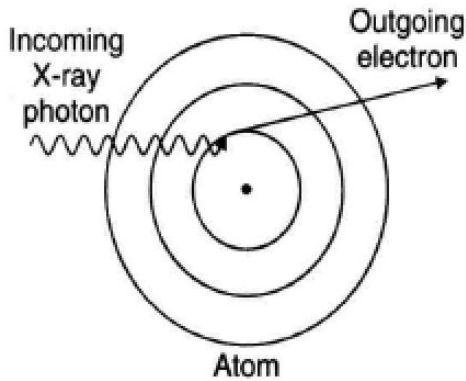




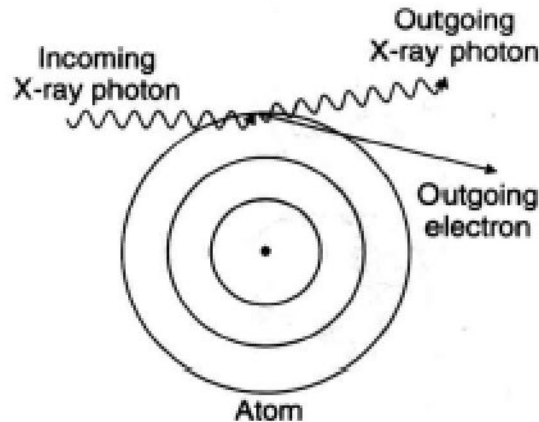
# VEAMOS UN ESPECTRO MÁS DE CERCA



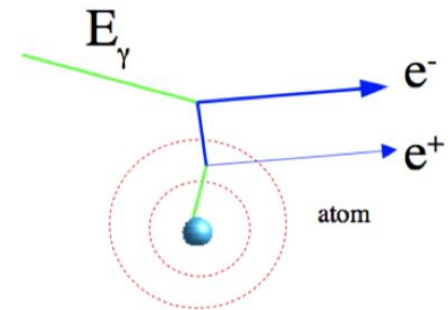
- El **fotopico**: Es el pico más pronunciado del espectro y corresponde al fotón emitido en la desintegración nuclear de la fuente. El proceso de detección es por absorción fotoeléctrica del fotón primario, o bien por dispersión Compton o producción de pares si se produce una detección en coincidencia de las partículas y fotones secundarios
- En el caso del  $^{137}\text{Cs}$ , el fotopico se encuentra a 662 keV



Efecto fotoeléctrico



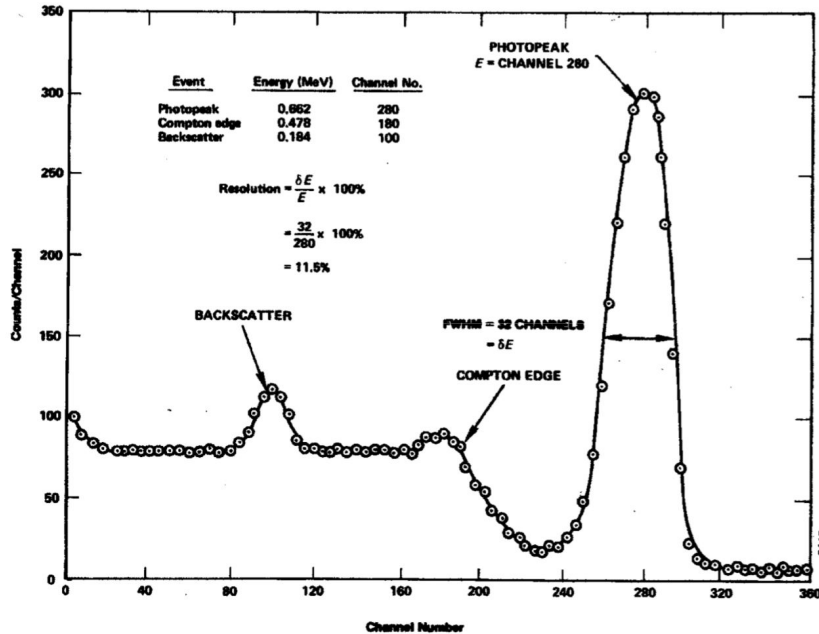
Efecto Compton



Producción de pares



# VEAMOS UN ESPECTRO MÁS DE CERCA



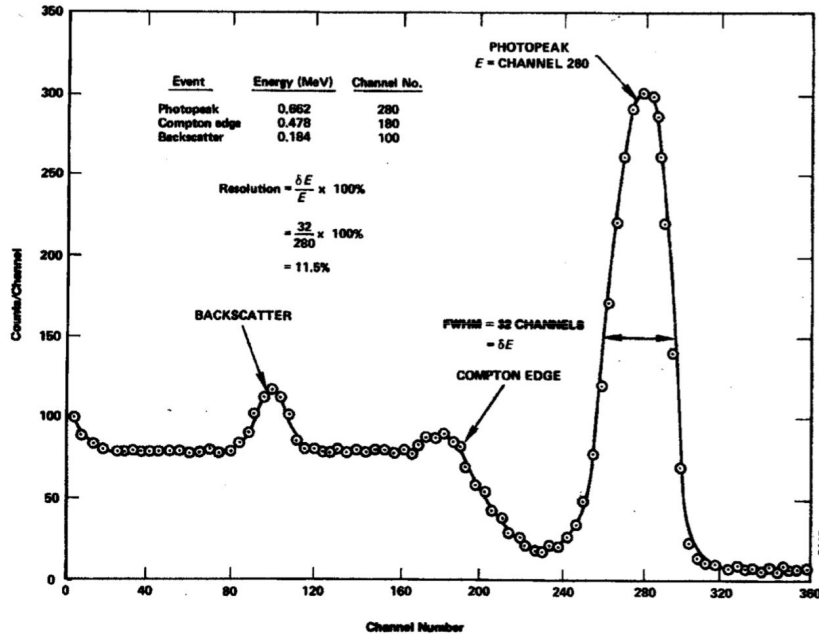
- **El borde de Compton:** en la dispersión Compton, es imposible que el fotón incidente transfiera toda su energía al electrón y la situación es que éste puede llevarse una energía que va desde 0 (que corresponde al caso límite en que el fotón se lleva la máxima energía posible, es decir, toda la incidente) hasta  $T_e(max)$  dada por la ecuación. Puede que el fotón dispersado escape del detector, y en este caso se obtiene un continuo que va desde 0 hasta  $T_e(max)$ , conocido como borde Compton

Si tomamos el espectro del Cs-137, observaremos un pico, o mejor un borde, a unos 477 keV, **el borde Compton**

$$T'_e(max) = \frac{E_\gamma^2}{m_e c^2} \frac{2}{1 + 2(E_\gamma / m_e c^2)}$$



# VEAMOS UN ESPECTRO MÁS DE CERCA



- El **pico de backscatter**: Este fenómeno se produce por dispersión Compton en materiales que rodean al detector. El fotón dispersado puede sufrir una absorción fotoeléctrica en el detector si vuelve a él desde los exteriores del detector (es decir posteriormente, el fotón dispersado sufre una absorción fotoeléctrica en el cristal de NaI), lo que ocurrirá generalmente para ángulos de dispersión muy grandes ( $\theta = 180$ )

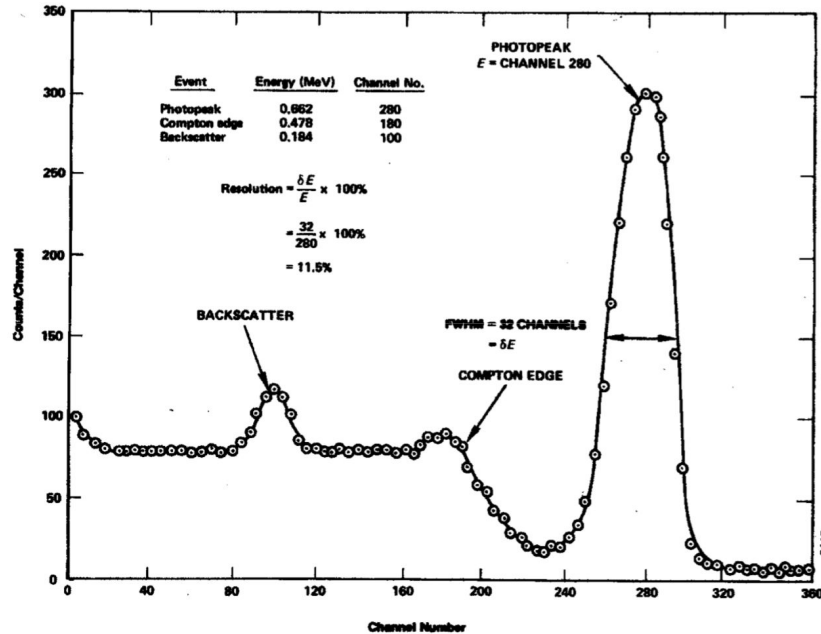
$$E_{\gamma', \text{backscatter}} \approx \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{2E_{\gamma}}{mc^2}}$$

Si tomamos el espectro del Cs-137, observaremos un pico, o mejor un borde, a unos 185 keV, **el pico de backscatter**

En algunos casos una interacción fotoeléctrica sigue a la interacción Compton. Por lo tanto toda la energía incidente es disipada en el detector y contabilizada en el fotopico



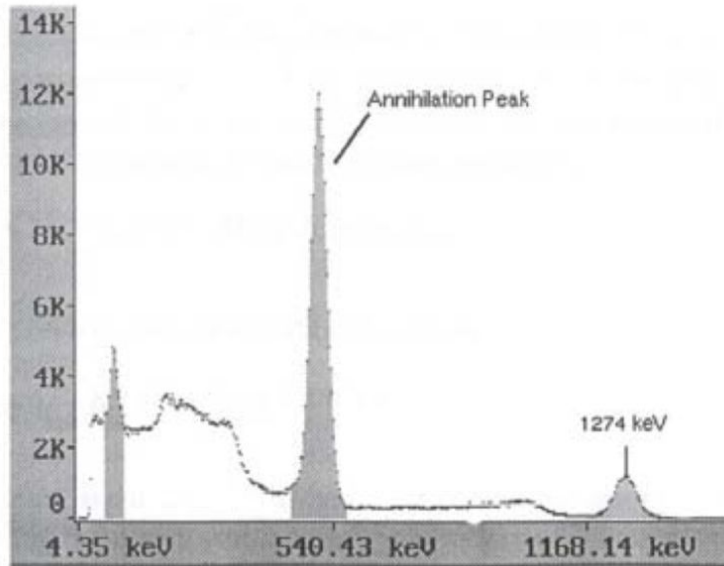
# VEAMOS UN ESPECTRO MÁS DE CERCA



- El **pico de rayos X**: El bario metaestable no sólo puede entregar su energía en forma de un cuanto y con 662 keV, sino en otros casos puede transferirla a un electrón de la órbita 1s de su capa atómica ("Conversión interna"). Los electrones presentan una energía de 625,67 keV, de acuerdo a la energía de excitación del bario menos la energía de enlace del electrón. Contrariamente al decaimiento beta, en el caso de conversión no se obtiene un espectro continuo de la energía de los electrones, ya que no hay una tercera partícula participando. El hueco en la capa 1s es llenado por electrones de las capas superiores, en donde la energía se entrega como rayos X característica del bario, en particular como la línea 32,19 keV.
- Dependiendo de la envoltura del preparado este pico es visible o no

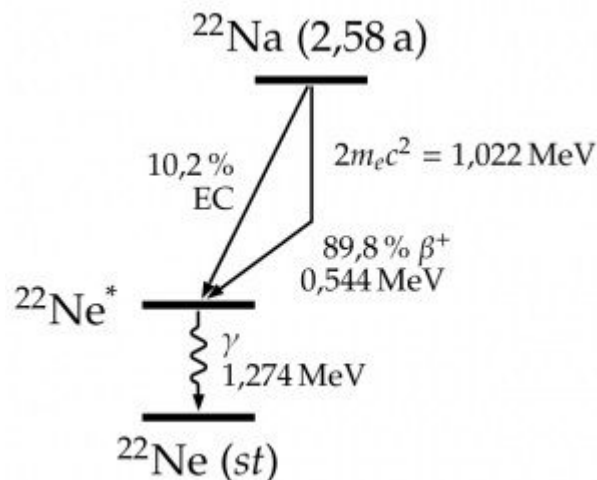


# VEAMOS UN ESPECTRO MÁS DE CERCA



En el caso de una aniquilación electrón-positrón:

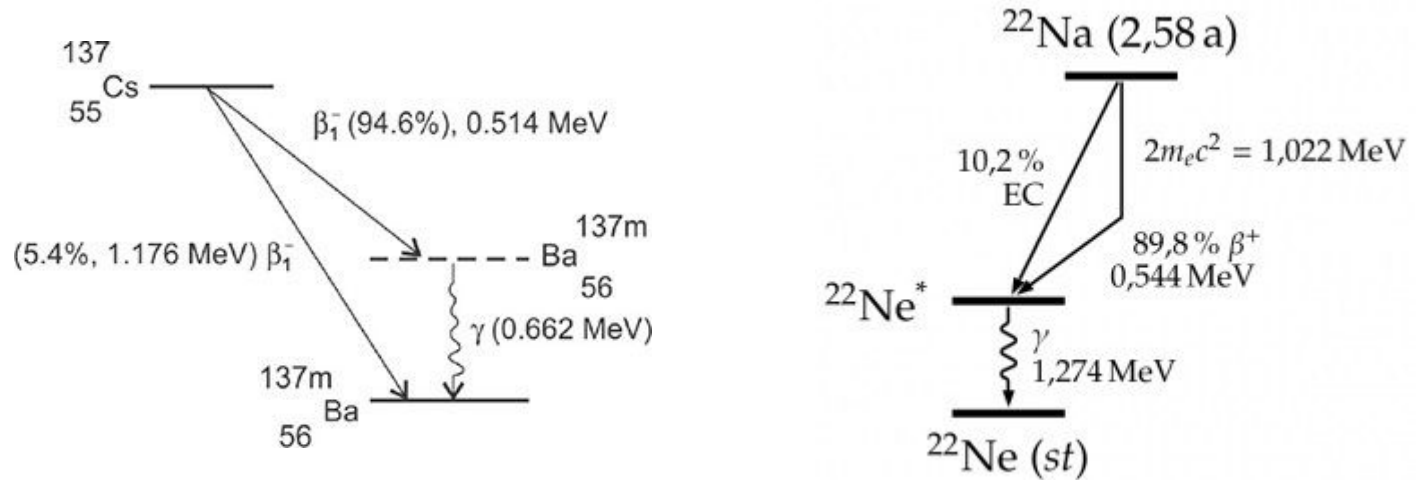
- El **pico de aniquilación**: Si la aniquilación ocurre fuera del detector, sólo uno de los fotones producidos puede alcanzar el mismo ya que el otro saldrá en dirección opuesta, por lo que el efecto será un pico de 511 keV en el espectro
- **Pico de escape simple o doble**: algunas veces puede ocurrir que uno o ambos de los fotones de 511 keV no interaccionen con el detector y, simplemente, escapen. Esto da lugar a un fotopico de energía  $(E_\gamma - 0.511)$  MeV si uno de los fotones ha sufrido absorción fotoeléctrica y el otro escapa (pico de escape simple), o a un fotopico de energía  $(E_\gamma - 1.022)$  MeV si ambos fotones escapan (pico de escape doble)





# NUESTROS DATOS

3 espectros medidos:





# ¿EN QUÉ CONSISTIRÁ LA PRÁCTICA DE HOY?

## 1ra parte: Calibración

- Describe los dos primeros espectros:  $^{22}\text{Na}$  y  $^{137}\text{Cs}$
- Para cada uno de los fotopicos de  $^{22}\text{Na}$ , has un fit Gausiano y determina el canal del centroide y la resolución (en número de canales)
- Efectua una representación gráfica de la curva de calibración: la energía real de los fotopicos (ver valores tabulados) frente a su canal del centroide
- Representa la recta que resulta sobre la gráfica de calibrado. Comprueba si el equipo es o no lineal.
- Usa ahora el procedimiento de calibrado de tres puntos utilizando además de los dos anteriores el pico del  $^{137}\text{Cs}$
- Traza la curva de resolución en energía,  $\sigma(E)=\delta E/E$ , con todos los fotopicos de  $^{22}\text{Na}$  y  $^{137}\text{Cs}$



# ¿EN QUÉ CONSISTIRÁ LA PRÁCTICA DE HOY?

## 2da parte: Describe los espectros de $^{22}\text{Na}$ y $^{137}\text{Cs}$

- Verifica que los umbrales Compton y los picos de backscattering corresponden a la predicción cinemática, conociendo la energía del fotopico

## 3ra parte: Muestra incógnita

- Usando la calibración de la primera parte, determina la energía de los dos fotopicos de la tercera muestra
- Usando información de valores tabulados (ver referencias): ¿a qué elemento corresponde esta muestra?

Más recursos en el siguiente link: [repositorio, datos y jupyter notebook](#)





# REFERENCIAS

- Fuentes radioactivas:  
<https://www.ld-didactic.de/software/524221es/Content/Appendix/RadioactiveSources.htm>
- M. Guigue y M. Ridel. Guía Physique Nucleaire. Sorbonne Université, Paris, Francia
- Dr Moliner. Guía Laboratorio de Física Nuclear y de Partículas. IFIC, Valencia, España



# BACKUP



<http://laconga.redclara.net>



[contacto@laconga.redclara.net](mailto:contacto@laconga.redclara.net)



lacongaphysics



Latin American alliance for  
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el  
programa Erasmus+  
de la Unión Europea

El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido, el cual refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.