

Optimización de la medida de contaminación radioactiva contenida en la sal de Gadolinio utilizada en el experimento Super-KGd.

Diego de Hoz Le Gléau

Universidad Autónoma de Madrid

Tutor: Luis A. Labarga Echeverría

Trabajo de Fin de Grado en Física

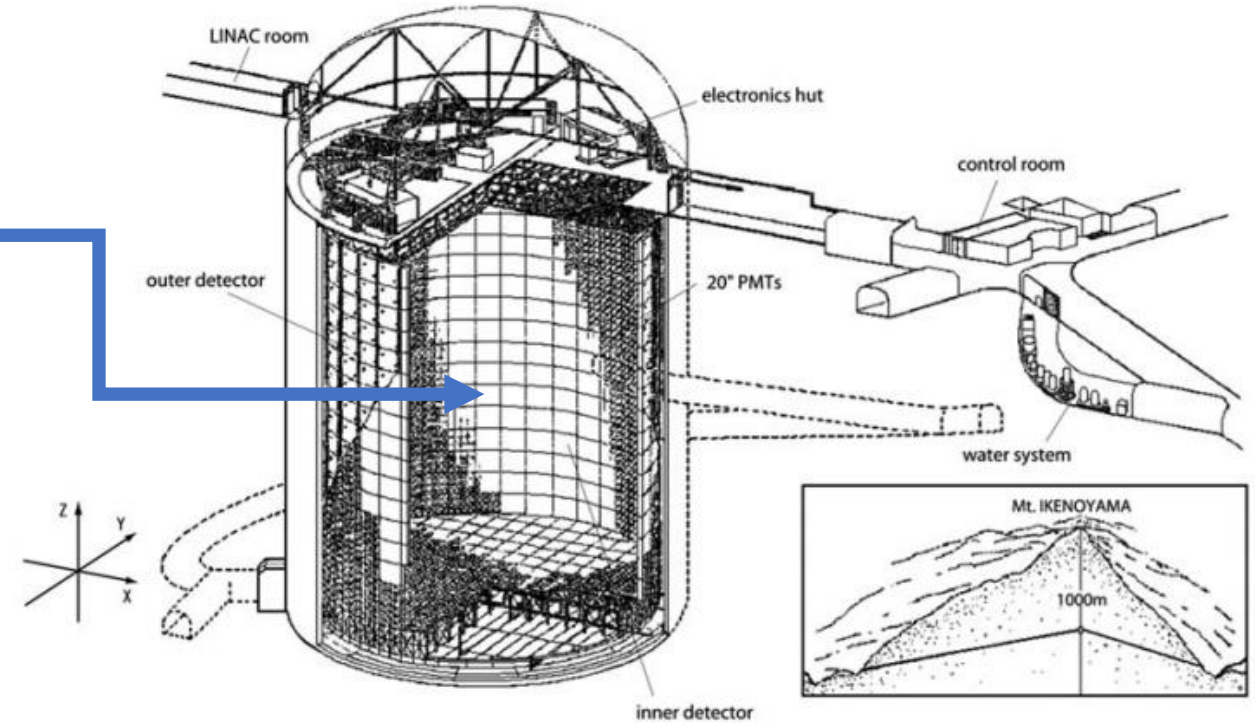
2/07/2021

Introducción: Sal de Gadolinio en Super-Kamiokande

- Super-Kamiokande: detector de luz Cherenkov diseñado para la detección de neutrinos
- Experimento Super-KGd: introducción de sal de Gadolinio en el tanque del detector

- Sal de gadolinio: mejora la sensibilidad de SK hacia neutrones térmicos y mejora la reconstrucción de los estados finales en interacciones de neutrinos.
- Los productos de las desintegraciones de la contaminación radioactiva de la sal puede ser un fondo muy serio para la física de SK

- Para 2022 se quieren disolver 20 toneladas de sal: son 40 lotes de 500Kg
- Medimos una muestra (4Kg) de cada lote
- Cada medida dura unas 4 semanas



Muchas muestras,
demasiado tiempo de medida

Objetivo: Optimizar el proceso de medida, en términos de velocidad, de los lotes de la sal de Gadolinio

Contaminación radioactiva

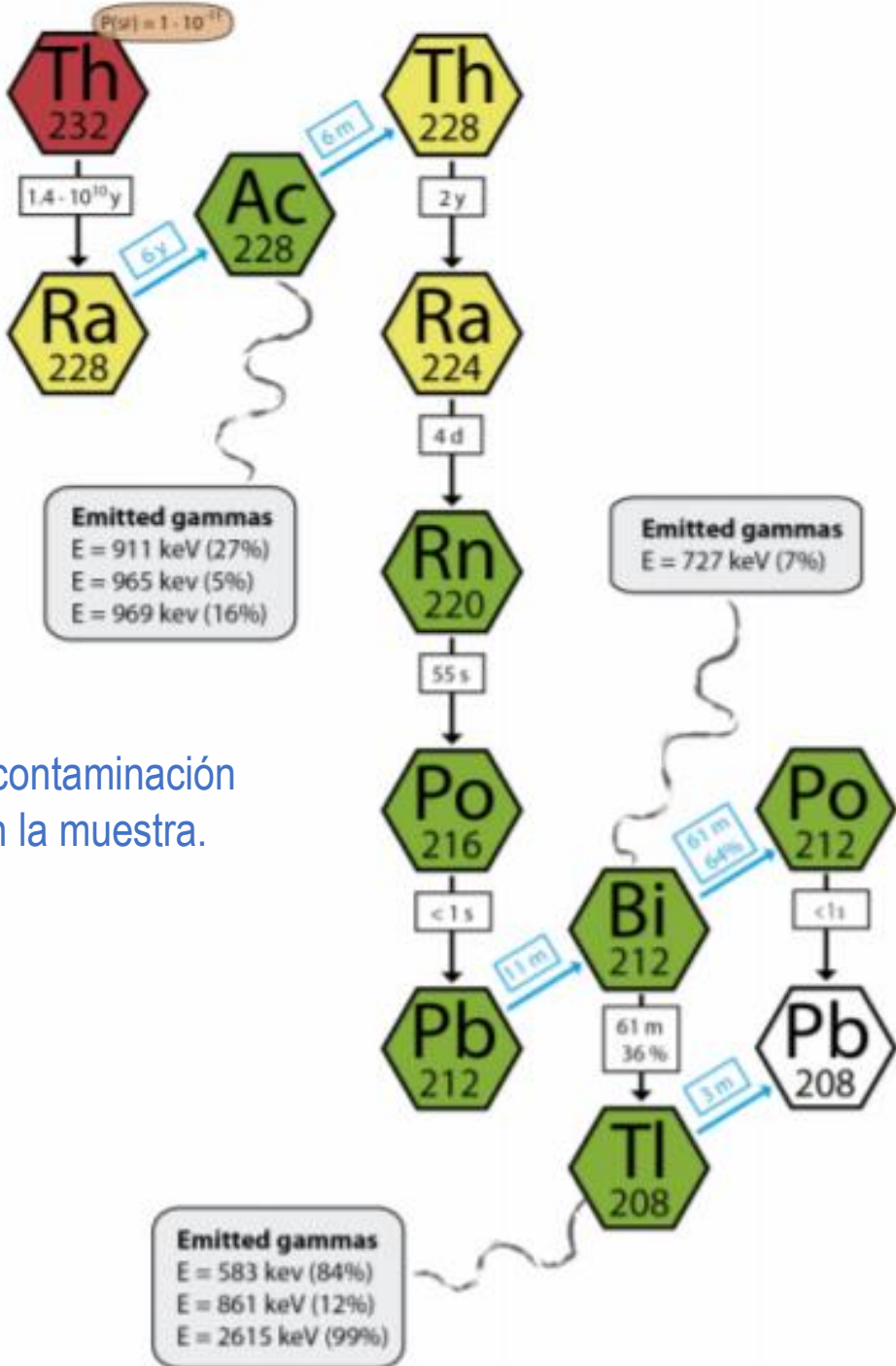
- Los isótopos más comunes están en cadenas radioactivas
- La contaminación por un isótopo dado se cuantifica por el número de sus desintegraciones por segundo (Bq) por kilogramo de muestra
- Tales desintegraciones se identifican mediante la detección de los fotones característicos emitidos en ellas

$$N_{muestra}^{AZ} / M = (N_{gamma-MEDIDAS}^{AZ} / EFF) / BR / M$$



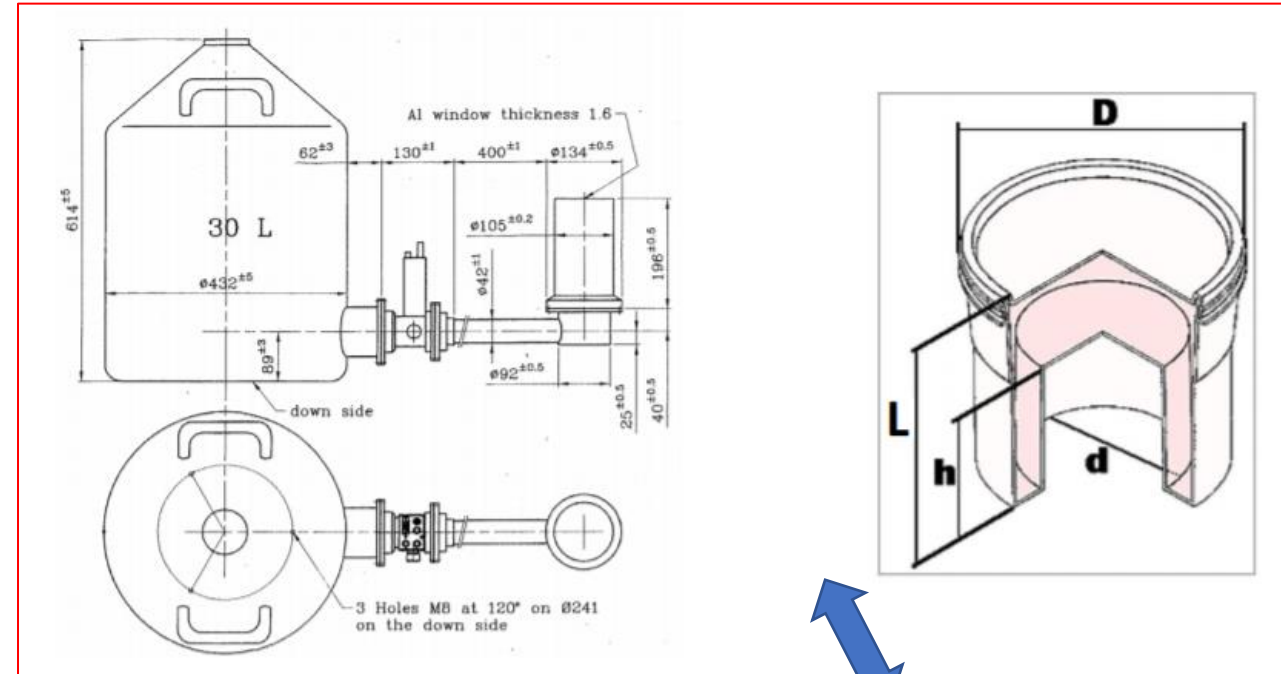
cuantifica la contaminación del isótopo en la muestra.

- $N_{muestra}^{AZ}$: número de desintegraciones/segundo del isótopo AZ en la muestra
- $N_{gamma-MEDIDAS}^{AZ}$: número de fotones medidos
- BR: branching ratio o tasa relativa
- M: Masa de la muestra
- EFF: eficiencia de detección de fotones



Medida de la contaminación radioactiva: detectores de Ge de alta pureza HPGe

- Se utiliza Ge de alta pureza por su alta resolución para detectar fotones: crea pares electrón-hueco fácilmente
- UAM hace las campañas de medidas de Super-KGd en el laboratorio subterráneo de Canfranc (LSC).
- Sala del LSC con los detectores HPGe:



Optimizar ($EFF \cdot M$)

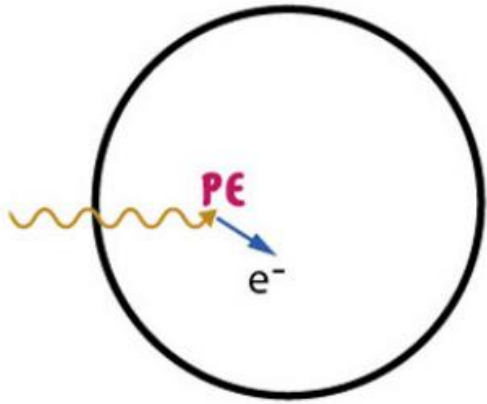
$$N_{\text{gamma-MEDIDAS}}^{\text{NAZ}} = (EFF \cdot M) \cdot (N_{\text{muestra}}^{\text{NAZ}} / M) \cdot BR$$

Queremos maximizar $N_{\text{gamma-MEDIDAS}}^{\text{NAZ}}$

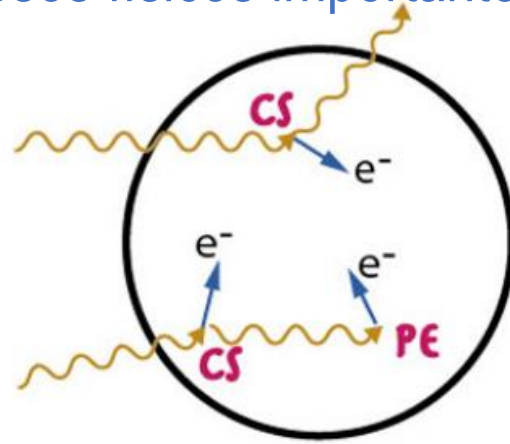


Medida de la contaminación radioactiva: Interacción radiación-materia y su detección

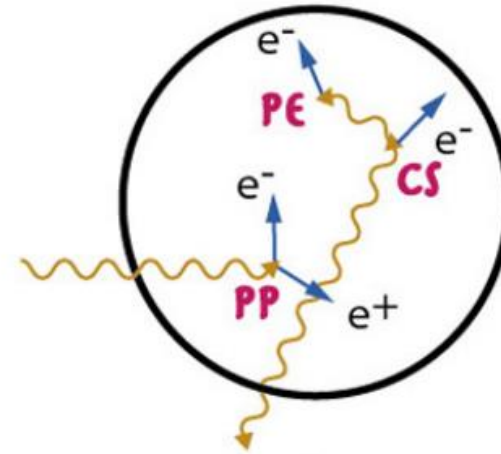
Esquema de los tres procesos físicos importantes:



Photoelectric Effect (PE)



Compton Scattering (CS)

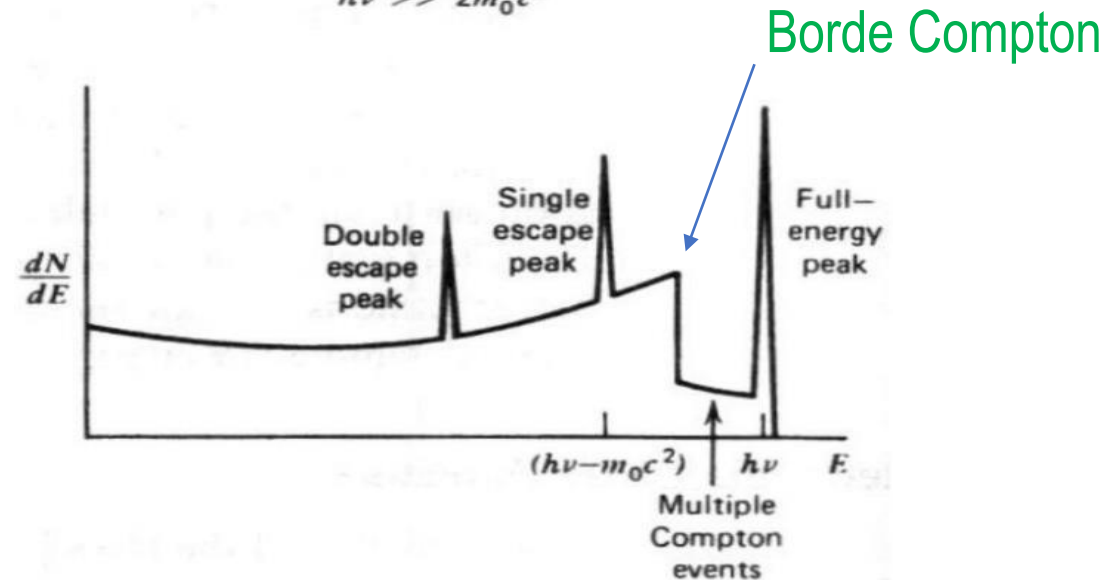


Pair Production (PP)

Para balances energéticos
ver material adicional

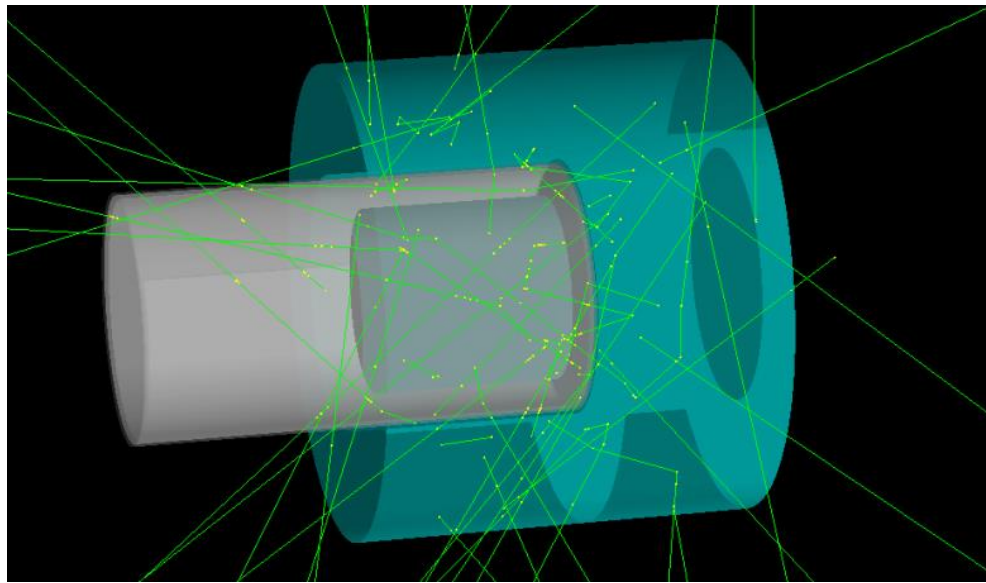
$$h\nu \gg 2m_0c^2$$

Espectro teórico de energía:



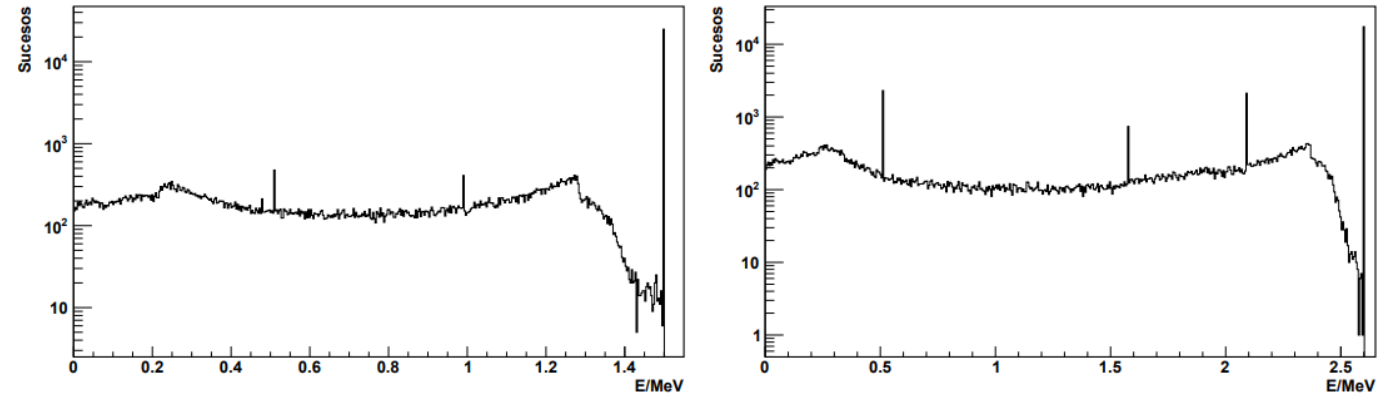
Proceso de optimización de la eficiencia: Programa de simulación Geant4

Geant4: Programa de simulación Montecarlo de interacción de radiación con materia para cualquier situación geométrica. Escrito en C++. <https://geant4.web.cern.ch>

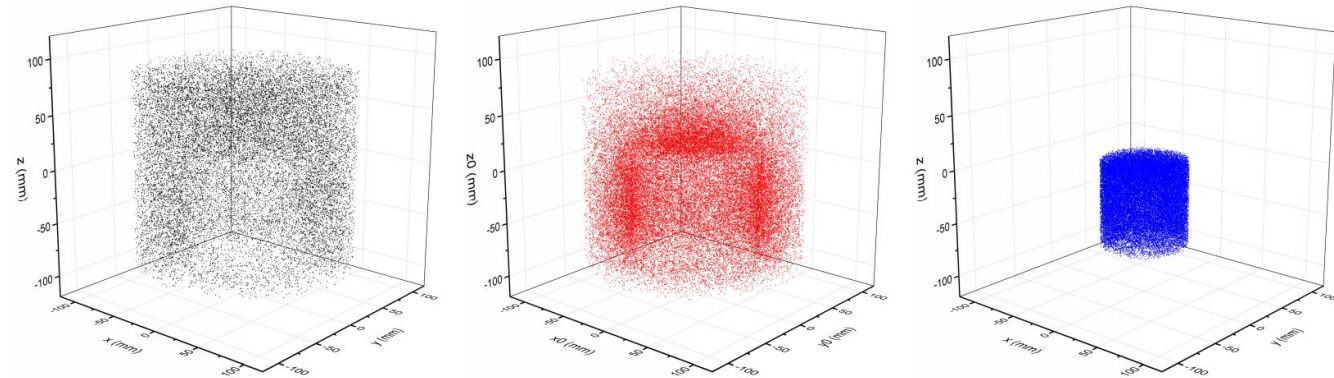


Vista gráfica del proceso de simulación

Espectros de energía medidos por el Ge para fotones generados en la sal de Gd a una cierta energía

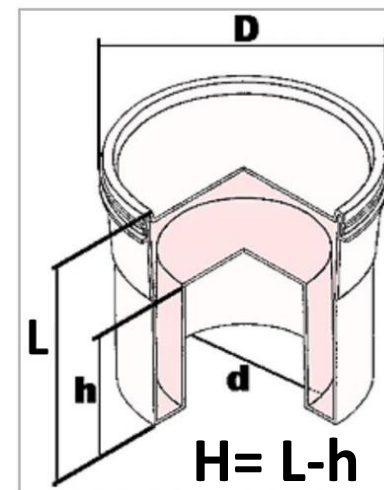


Comprobación gráfica de generación e interacción:

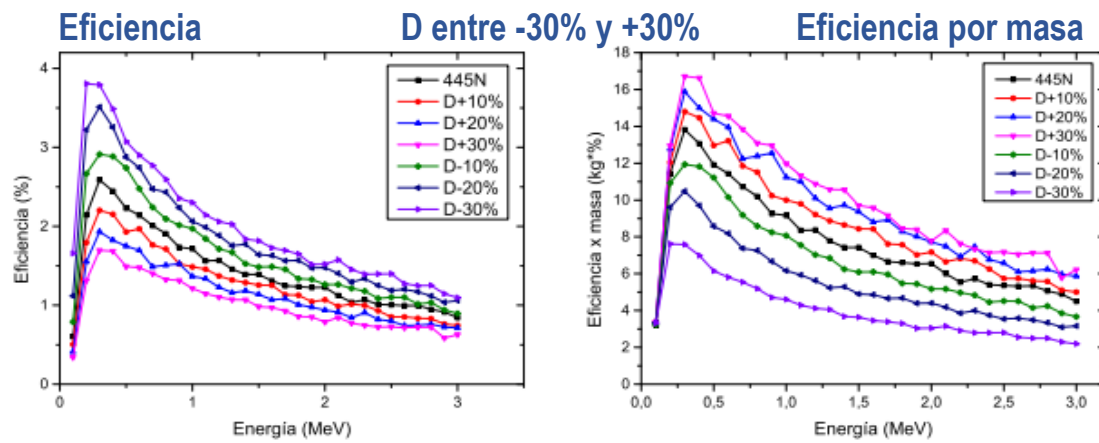
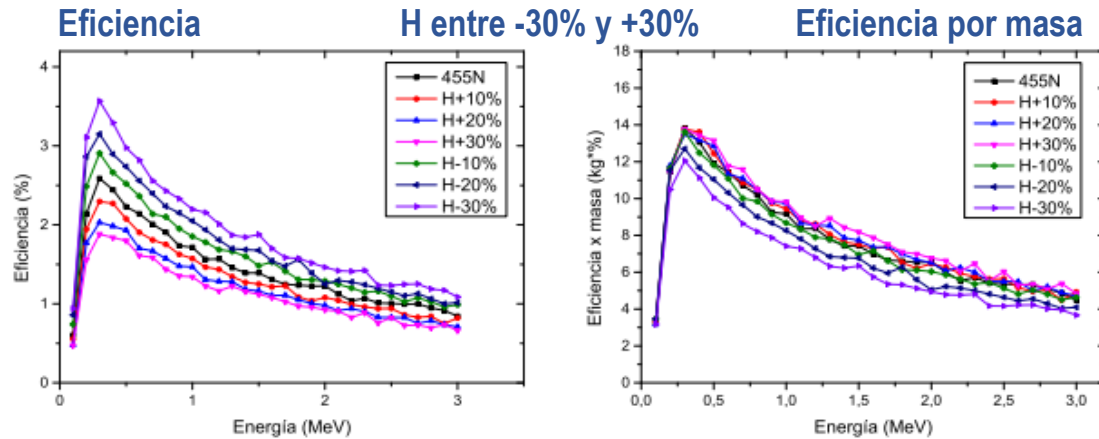
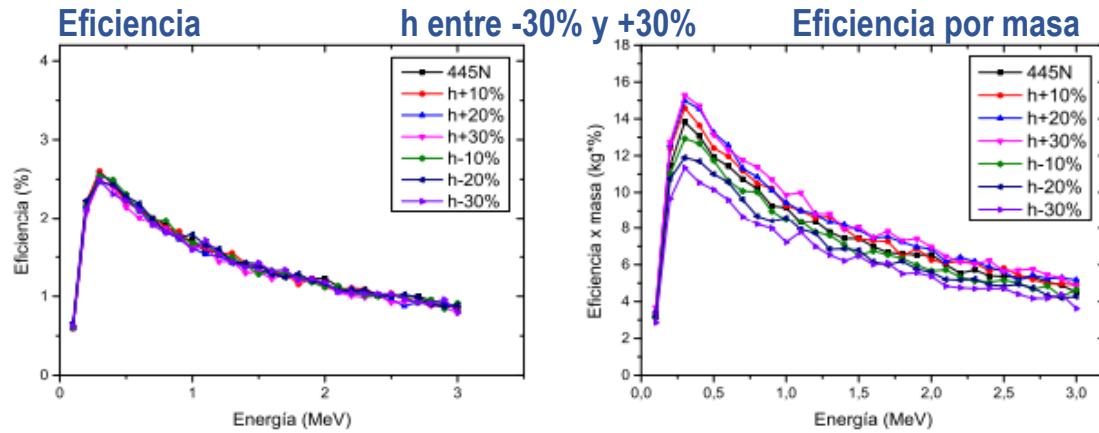


- Conseguimos generar los fotones y las geometrías de manera adecuada
- Los procesos físicos también se simulan de manera satisfactoria

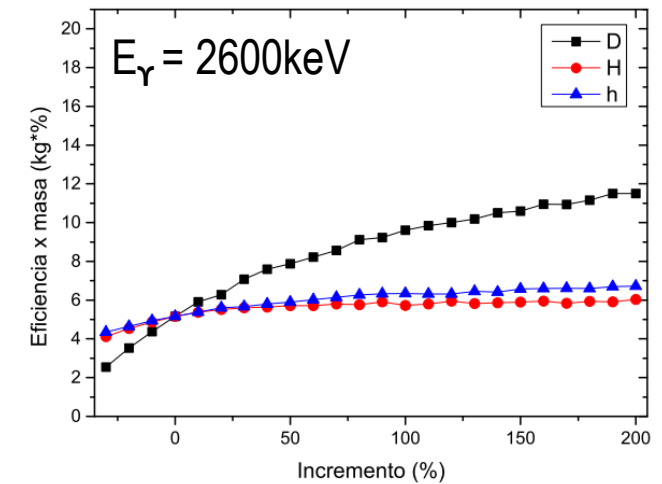
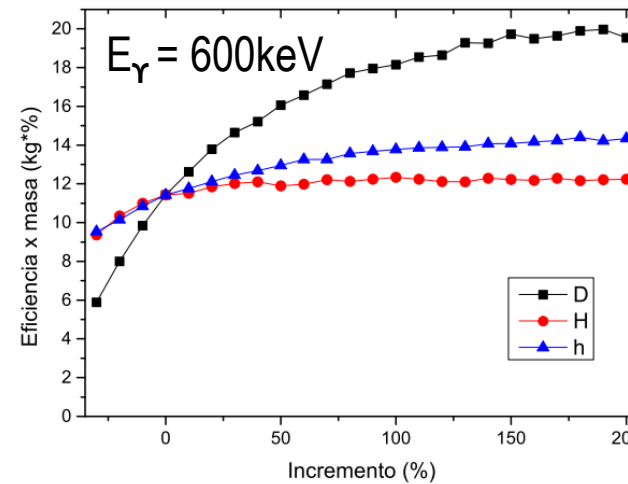
Proceso de optimización eficiencia · masa: Dimensiones marinelli



Evolución de la eficiencia y eficiencia por masa para los cambios de D, H y h



Eficiencia por masa para cambios de D, H y h de -30% a 200%

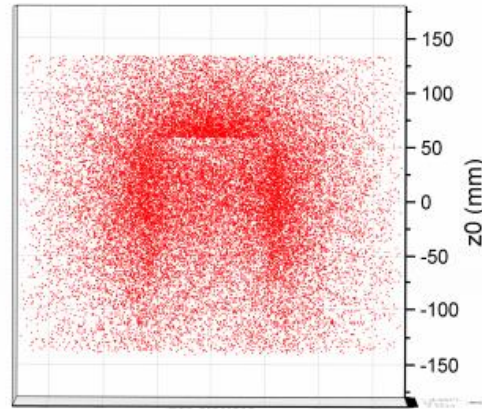
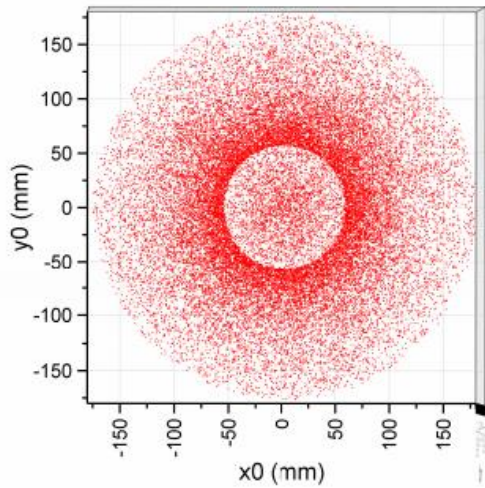


Se observa que:

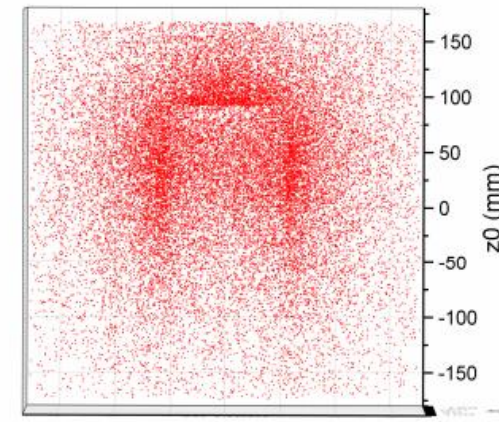
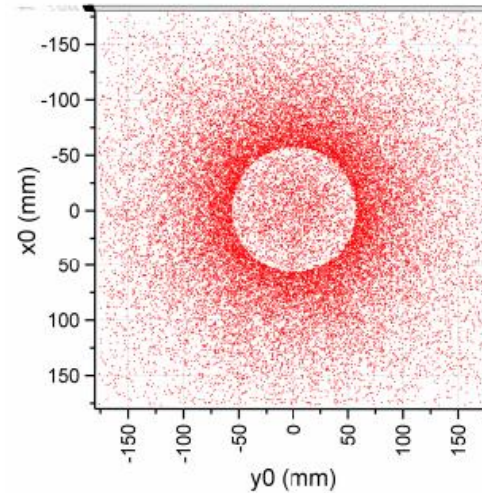
- El cambio de D es el más eficiente (cambio cuadrático)
- El cambio de h también aumenta la eficiencia por masa
- El cambio de H no tiene casi efecto

Proceso de optimización eficiencia · masa: Configuración óptima

Configuración cilíndrica

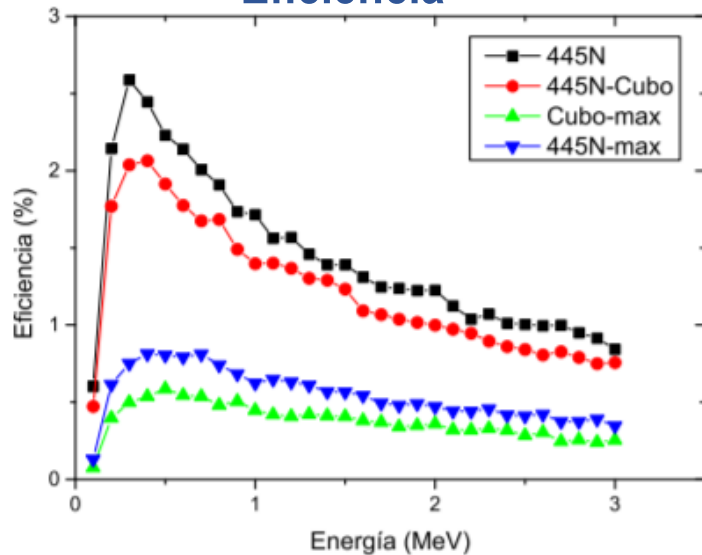


Configuración cúbica

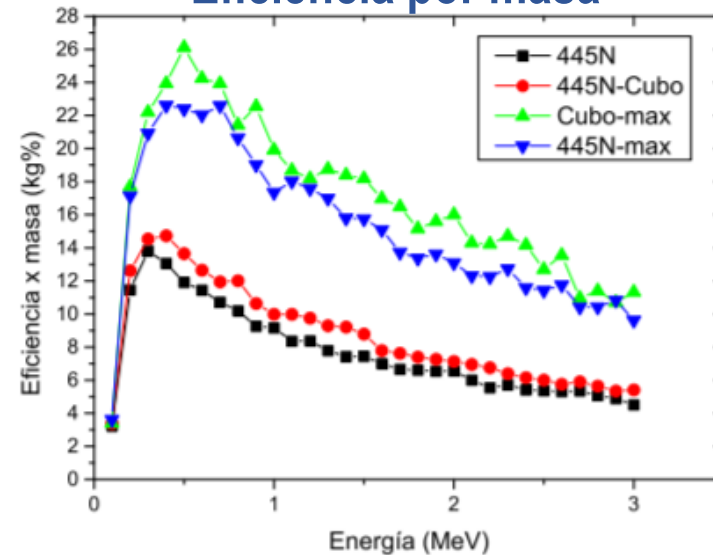


Resultados finales

Eficiencia



Eficiencia por masa



Se observa un aumento claro de la eficiencia por masa con ambas geometrías: la cúbica es mejor

Se consigue aumentar la eficiencia por masa hasta un 85% aproximadamente (a 600keV)

Resumen y Conclusiones

- Se ha intentado optimizar el proceso de medida de la contaminación radioactiva en sales de Gadolinio para Super-KGd
- Se ha utilizado para ello el paquete de programas Geant4 para la simulación de la interacción de radiación con la materia
- Se ha identificado como variable clave la eficiencia de detección por la masa de la muestra.
- Se ha simulado el dispositivo estándar de medida que se utiliza por ejemplo en el laboratorio subterráneo de Canfranc, detector HPGe y sal de Gd dispuesta en vaso marinelli, e intentado optimizar su geometría
- Se concluye que el aumento de volumen ocupado alrededor del detector es la mejor forma de aumentar la eficiencia por masa
- Se prueba una geometría cuadrada que simule la ocupación del volumen disponible experimentalmente y se obtiene un aumento de la eficiencia por masa de hasta un 85%

Esta configuración va a ser utilizada por el grupo SK-UAM en sus próximas medidas

Material adicional

Medida de la contaminación radioactiva

Interacción radiación-materia y su detección

Efecto fotoeléctrico:

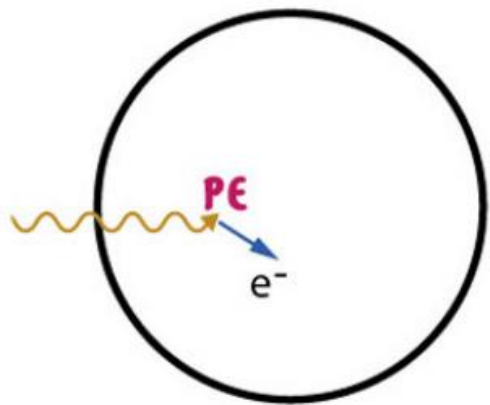
Dispersión Compton:

Producción de pares:

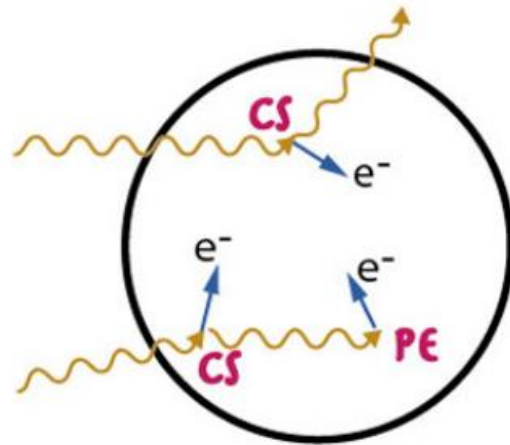
$$E_e = h\nu - E_b$$

$$E_e = h\nu - h\nu'$$
$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}$$

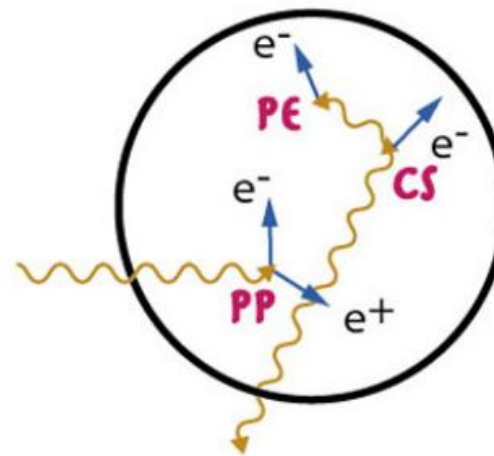
$$E_{e^-} + E_{e^+} = h\nu - 2m_0c^2$$



Photoelectric Effect (PE)

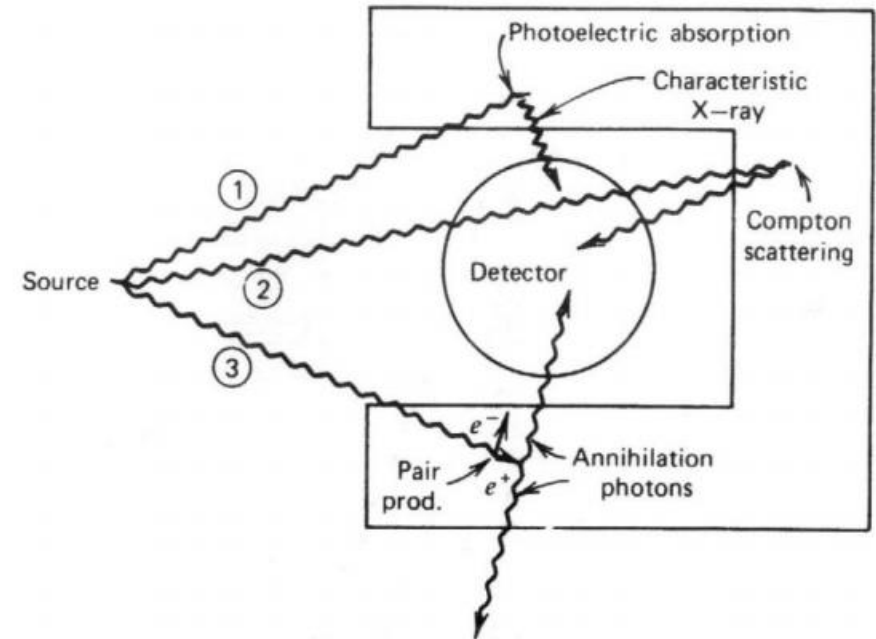
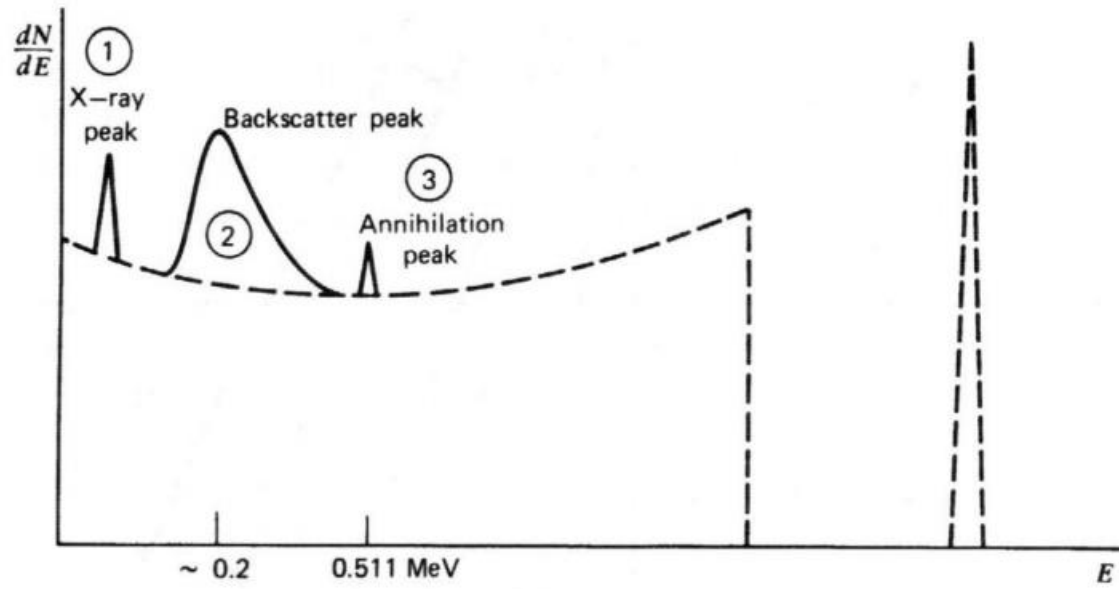


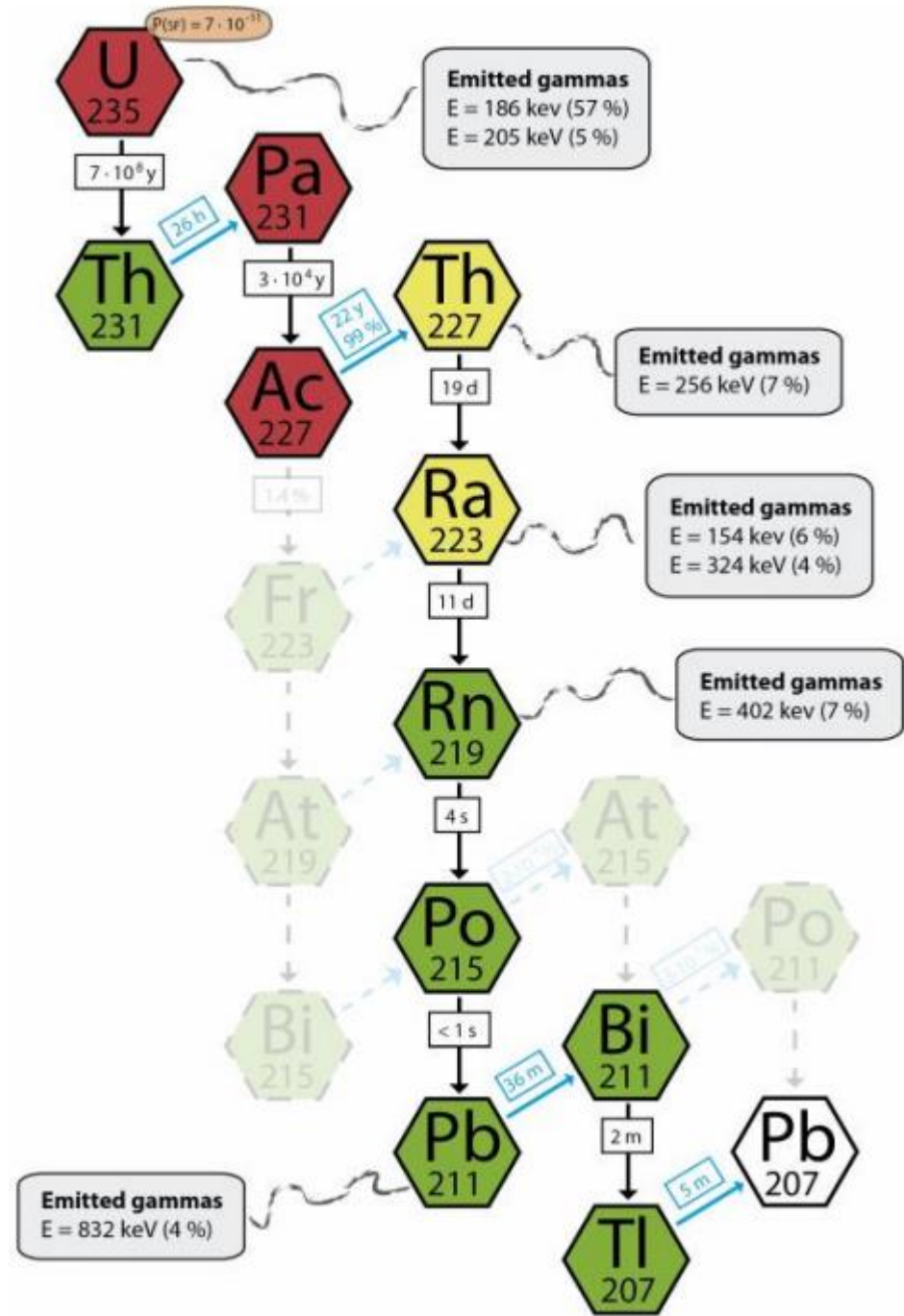
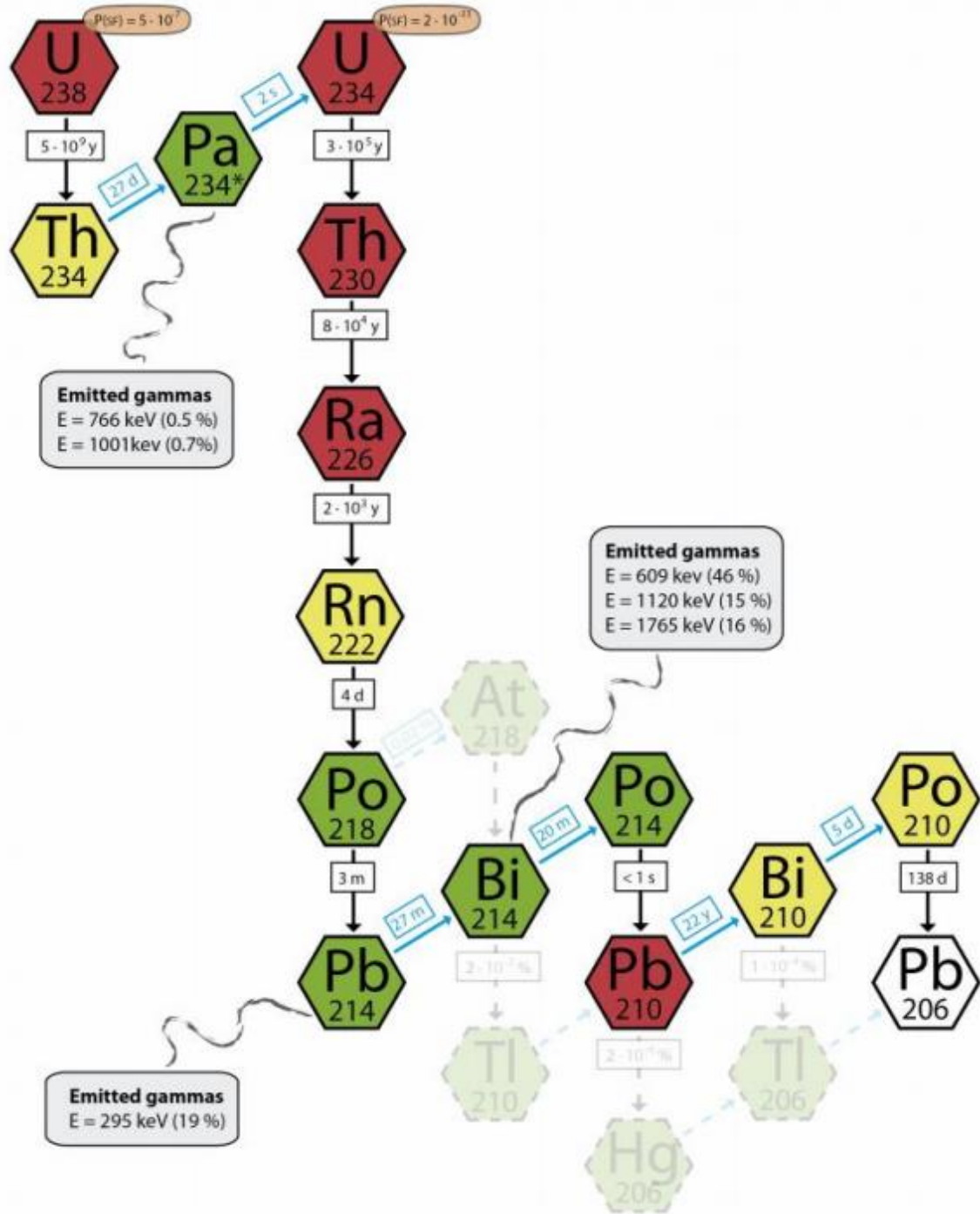
Compton Scattering (CS)



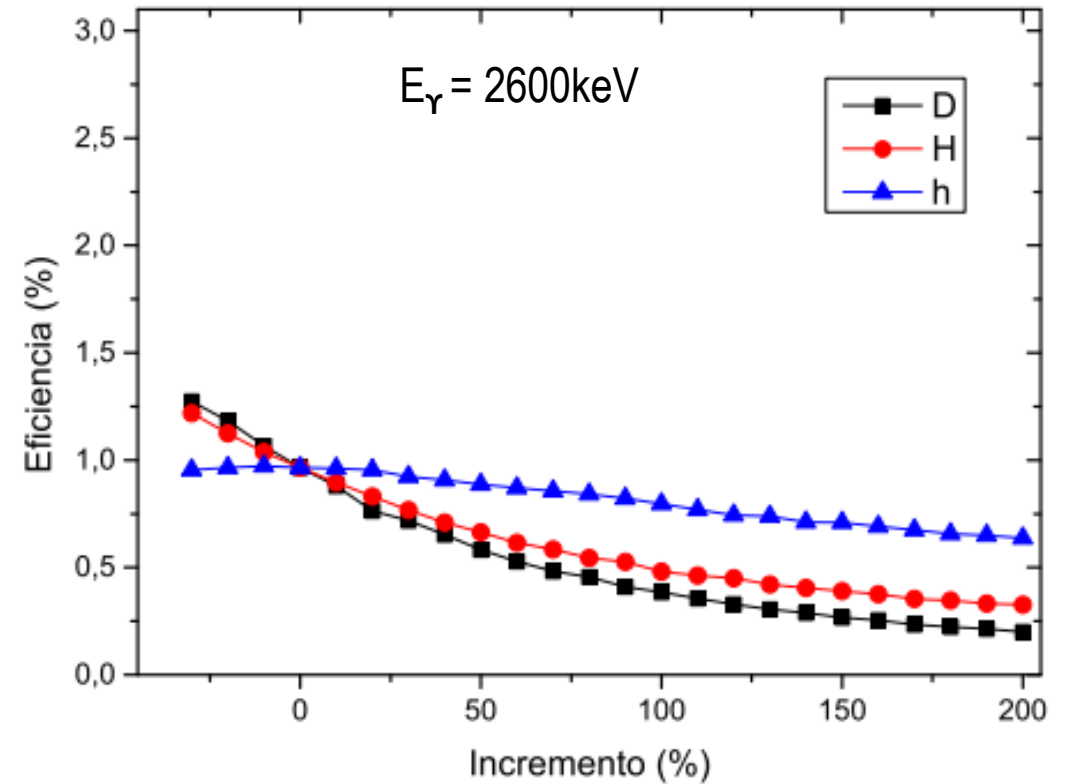
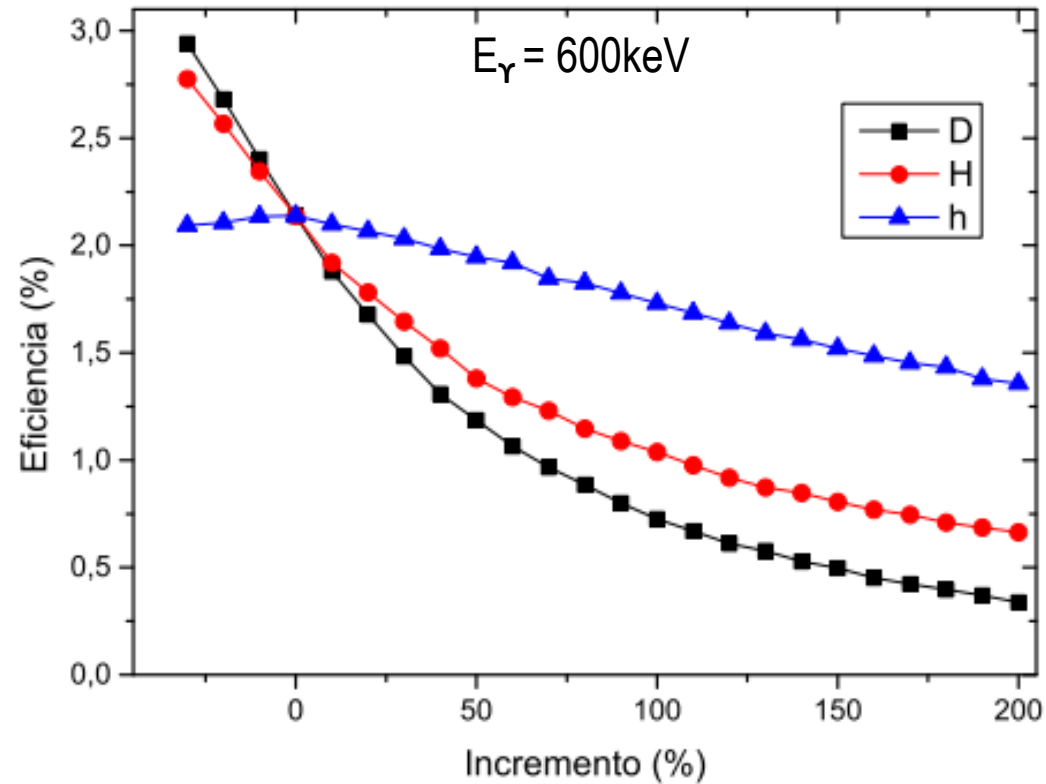
Pair Production (PP)

Efectos del contorno





Eficiencia para cambios de D, H y h de -30% a 200%



Sea V_c un volumen crítico a partir del cual no aumenta el número de fotones detectados, N_{detec} el número de fotones detectados, $N_{gen}(V)$ número de fotones generados en un volumen V y $Ef(V)$ la eficiencia de un volumen V . Para un volumen V mayor que el volumen crítico se tiene lo siguiente:

$$Ef(V) = \frac{N_{detec}}{N_{gen}}; \quad N_{gen}(V) = N_{gen}(V_c) \cdot \frac{V}{V_c}$$

$$Ef(V) = \frac{N_{detec}}{N_{gen}(V_c) \cdot \frac{V}{V_c}} = \frac{N_{detec}}{N_{gen}(V_c)} \cdot \frac{V_c}{V} = Ef(V_c) \cdot \frac{V_c}{V} \quad (4.1)$$

$$\therefore Ef(V) \cdot kg = Ef(V_c) \cdot \frac{V_c}{V} \cdot V \cdot densidad = Ef(V_c) \cdot V_c \cdot densidad$$

$$\implies Ef(V) \cdot kg = Ef(V_c) \cdot kg_c$$

$$N_{muestra} = \frac{N_{\gamma}}{BR} \implies N_{muestra} = \frac{N_{\gamma medidos}}{effMC \cdot BR}$$

$$\frac{N_{muestra}}{kg} = \frac{N_{\gamma medidos}}{(effMC \cdot kg) \cdot BR} \implies N_{\gamma medidos} = (effMC \cdot kg) \cdot \frac{N_{muestra}}{kg} \cdot BR$$