

# Estudio de la interacción de la radiación gamma con la materia

Pablo Cappagli & Karim Ogando  
*Instituto Balseiro - Experimental II*

Se estudió la interacción de la radiación gamma con muestras metálicas, utilizando fuentes radiactivas de baja intensidad. Se midió la atenuación de la radiación debida a placas metálicas en función del espesor de la placa para hierro y aluminio. Se obtuvo el coeficiente de atenuación  $\mu$ , para ambos metales y distintas energías, encontrándose un aumento con el número atómico y una disminución con la energía de la radiación. Se estudió el efecto Compton, verificándose experimentalmente las predicciones teóricas y obteniéndose un valor de  $m_0c^2 = (0,47 \pm 0,05)MeV$  para la energía en reposo del electrón. Finalmente se estudió la radiación de fondo, encontrándose picos de eventos a energías relacionadas con el decaimiento radiactivo de elementos comunes en la naturaleza.

## I. INTRODUCCIÓN

Al atravesar la materia, la radiación gamma, se ve atenuada en intensidad por la acción de diversos mecanismos de interacción, capaces de absorber por completo un fotón o desviarlo de la dirección de incidencia original. Los mecanismos de interacción, de mayor importancia, entre la radiación gamma y la materia son: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y creación de pares.

Para rayos gamma de baja energía, algunos cientos de KeV, predomina el efecto fotoeléctrico. En este proceso, el fotón gamma, desaparece completamente al interactuar con un átomo del material absorbente. La energía del fotón es transferida a un electrón de las capas externas, que luego es liberado con una energía  $E_e = h\nu - E_l$ , siendo  $h\nu$  la energía del fotón incidente y  $E_l$  la energía de ligadura del electrón con su núcleo. Este fenómeno se esquematiza en la figura 1. Generalmente, la energía de ligadura es liberada en forma de rayos X.

El efecto Compton ocurre cuando un fotón gamma interactúa con un electrón del material absorbente. Como resultado, el fotón es deflelado un ángulo  $\theta$  y parte de su energía es transferida al electrón, que retrocede con un ángulo  $\varphi$  respecto a la dirección del fotón incidente, como se muestra en la figura 2

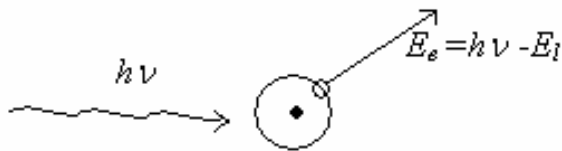


Figura 1: Esquema que muestra el efecto fotoeléctrico. Un fotón, de energía  $h\nu$ , incide sobre un átomo. Un electrón de la capa externa es liberado con energía  $h\nu - E_l$

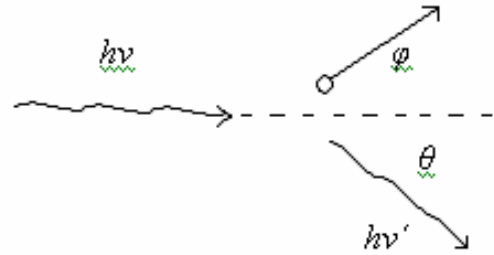


Figura 2: Esquema que muestra el efecto Compton. Un fotón de energía  $h\nu$  incide sobre un electrón. El fotón es deflelado un ángulo  $\theta$

La energía de del fotón gamma deflelado en función del ángulo, esta dada por:

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

donde  $h\nu$  es la energía del fotón incidente y  $m_0c^2$  es la energía en reposo del electrón, 0,511 MeV.

El tercer mecanismo de interacción es la creación de pares. Este proceso ocurre cerca del núcleo del material absorbente y corresponde a la creación de un par electrón-positrón, haciendo desaparecer por completo al fotón gamma incidente.

Al atravesar un material de un espesor dado, cada uno de estos procesos ocurre con una cierta probabilidad, haciendo que la cantidad de fotones en el haz transmitido se reduzca considerablemente. Si suponemos que el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la creación de pares son los únicos responsables de esta atenuación, y que estos ocurren con una probabilidad  $\tau$ ,  $\sigma$  y  $\kappa$  respectivamente, tenemos que la probabilidad de que un fotón sea removido del haz incidente esta dada por:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (2)$$

donde  $\mu$  recibe el nombre de coeficiente de atenuación lineal. Luego, el número de fotones que atraviesan un

material de espesor  $x$  viene dado en función de  $\mu$  por:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3)$$

donde  $I_0$  es el número de fotones incidentes.

## II. MÉTODO EXPERIMENTAL

La radiación gamma se producía por medio de fuentes radiactivas de baja intensidad. Se utilizaron fuentes de  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  y  $^{137}\text{Cs}$  de alrededor de  $1\mu\text{Curie}$  y de  $^{137}\text{Cs}$  de aproximadamente  $500\mu\text{Curies}$  de intensidad.

Para detectar la intensidad y distribución energética de la radiación, espectro de radiación, se utilizó un detector de centelleo de NaI, el cual está basado en un cristal que, como resultado de la incidencia de un fotón, produce fotones menos energéticos. Al detector se adosa un fotomultiplicador, de manera que, por cada foton incidente, se obtenía un pulso de corriente proporcional a su energía. La principal desventaja de estos detectores es que, al interactuar la radiación con el cristal, principalmente por efecto Compton, produce una gran cantidad de fotones de menores energías, que aparecen en los espectros como una cola o meseta. El fotomultiplicador se alimentó con una fuente de alta tensión.

La señal de salida del fotomultiplicador se conectó a un analizador multicanal Tracor Northern TN 1706, que identificaba la energía de cada foton, realizando un histograma con los pulsos detectados. Se configuró el multicanal en un rango de 512 canales y el contador de tiempo del mismo en *live*. Esto quiere decir que no contabilizaba el tiempo en el que estaba recibiendo más de un pulso a la vez, no pudiendo analizar ninguno de los dos. Para controlar el multicanal se utilizó el puerto paralelo de una PC, por medio de un programa en C.

El programa activaba la adquisición de datos del multicanal, dejaba pasar un tiempo de exposición especificado y luego desactivaba la adquisición. A continuación activaba la salida para teletipo del multicanal, y la leía, guardando los datos en un archivo. En el canal cero del histograma, el multicanal enviaba el *tiempo vivo*.

La primera parte de la experiencia consistió en la medición del coeficiente de atenuación del aluminio y del acero. La figura 3 muestra un esquema del dispositivo experimental utilizado.

Se colocó el detector frente a una fuente de radiación de aproximadamente  $1\mu\text{Curie}$  de intensidad. En medio de ellos se colocó una cantidad variable de chapas de hierro y aluminio, de  $(2,0 \pm 0,1)\text{mm}$ , teniendo cuidado de mantener fija la distancia entre la fuente y el detector.

Un esquema del dispositivo experimental utilizado en la segunda parte de la experiencia, en la que se estudió el efecto Compton, se muestra en la figura 4.

Esta consistió en la observación del efecto Compton mediante la medición de la intensidad de la radiación deflectada en función del ángulo de deflexión. Para esto se montó sobre el centro de una mesa con graduación angular, el goniómetro, la fuente radioactiva de  $^{137}\text{Cs}$  de

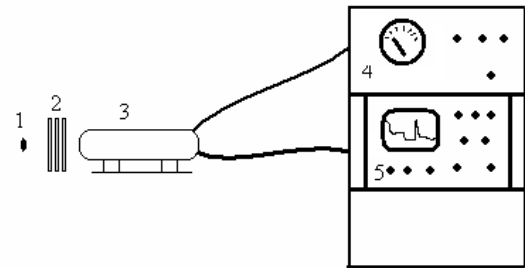


Figura 3: Dibujo esquemático de la disposición experimental para la medición del coeficiente de atenuación, donde 1. fuente de radiación gamma, 2. placas metálicas, 3. fotomultiplicador adosado a un detector de centelleo, 4. fuente de alta tensión del fotomultiplicador. 5. analizador multicanal

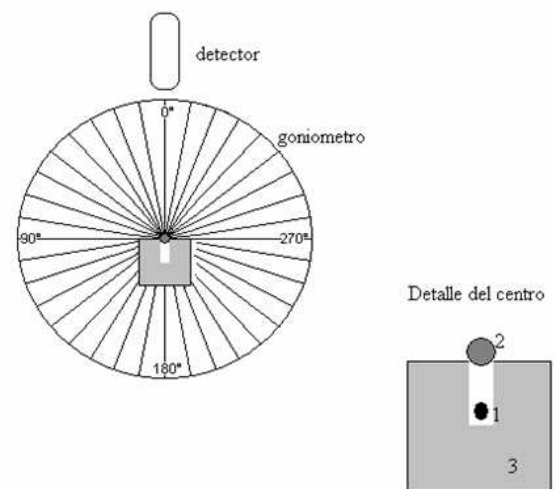


Figura 4: Dibujo esquemático de la disposición de los elementos utilizados en la observación del efecto Compton. En el detalle del centro se puede observar: 1. la fuente radioactiva, 2. el blanco central de acero, 3. soporte de madera con blindaje de plomo.

alrededor de  $500\mu\text{Curies}$  de intensidad, sostenida por un soporte de madera con blindaje de plomo. La radiación incidía sobre un cilindro de acero ubicado frente a la fuente. El detector podía moverse angularmente alrededor de la fuente, siempre a una distancia fija del centro.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### A. Atenuación

Se midió el espectro de radiación colocando, entre una fuente de  $^{60}\text{Co}$  de intensidad del orden del  $\mu\text{Curie}$  y el detector, chapas de hierro, con exposiciones de 600 s. En la figura 5 se muestra un ejemplo los espectros obtenidos,

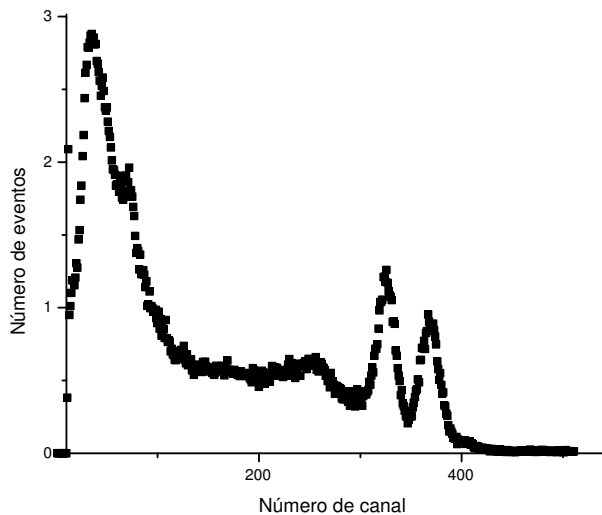


Figura 5: Espectro de radiación obtenido con una fuente de  $^{60}\text{Co}$  en el ensayo de atenuación

una vez normalizados por el *tiempo vivo*.

Se observan los dos picos característicos del  $^{60}\text{Co}$ , de 1,173 MeV y 1,333 MeV, y la cola Compton del espectro, debida a la interacción de la radiación con el detector. A medida que se aumentaba el número de placas, se veía claramente disminuir la altura de los picos.

Para analizar estos resultados numéricamente, se tomó cada pico y se le restó una aproximación lineal del espectro de fondo. Luego se lo integró, obteniéndose un valor para la intensidad en unidades arbitrarias, y se determinó la posición de su máximo suponiéndolo gaussiano.

Para cada pico característico, se tomaron los valores de intensidad correspondientes a los distintos números de placas y se realizaron gráficas como la de la figura 6. Se ve claramente que los datos ajustan bien a un modelo lineal, cuya pendiente es, según la ecuación 3, el coeficiente de atenuación lineal  $\mu$ .

Luego, se realizaron mediciones similares para la superposición de una muestra de  $^{133}\text{Ba}$  y una de  $^{137}\text{Cs}$ , con una exposición de 300 segundos. Los espectros obtenidos son del tipo ilustrado en la figura 7. Se observa el pico característico del  $^{137}\text{Cs}$  de 0,661 MeV, y tres picos característicos del  $^{133}\text{Ba}$  a bajas energías. De estos últimos, solo se utilizaron los dos más energéticos para el estudio de atenuación. Además, se marca la aproximación lineal al espectro de fondo realizada para el pico de  $^{137}\text{Cs}$ .

Al graficar la intensidad en función del espesor de la barrera atenuadora, se obtuvieron gráficos como el que se muestra en la figura 8. Se observa que algunos datos ajustan a una recta, mientras que el resto ajustan a otra paralela a la primera.

Se revisaron los datos y se determinó que las mediciones correspondían a días diferentes, en los que, posible-

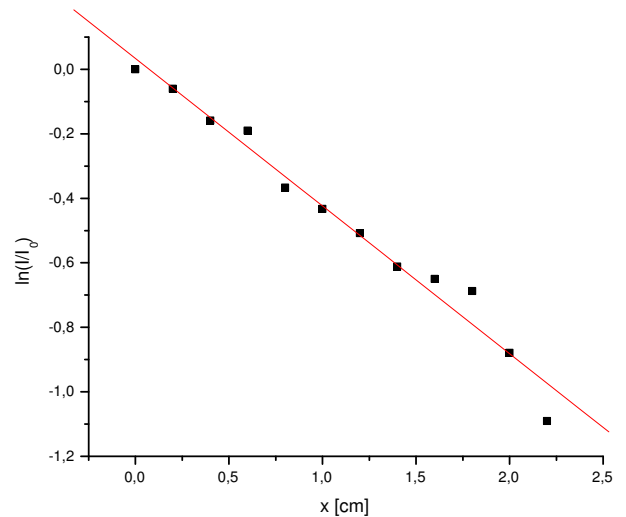


Figura 6: Logaritmo de la intensidad relativa del pico característico de 1333 MeV del  $^{60}\text{Co}$  en función del espesor de la barrera atenuadora,  $x$ , en cm

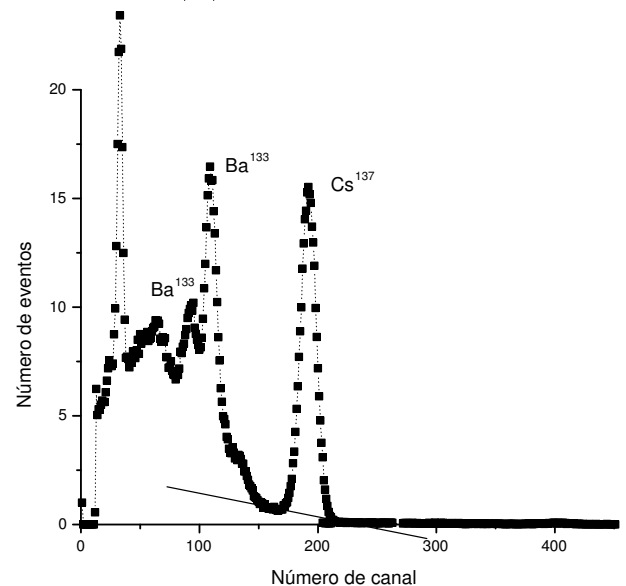


Figura 7: Espectro de radiación obtenido con la superposición de una fuente de  $^{133}\text{Ba}$  y una de  $^{137}\text{Cs}$  superpuestas, y una placa de hierro atenuando

mente, se cometió un error al armar el arreglo experimental, invirtiéndose el orden de las fuentes. Así, en el día I la fuente de  $^{137}\text{Cs}$  atenúa a la de  $^{133}\text{Ba}$ , en el día II la de  $^{133}\text{Ba}$  a la de  $^{137}\text{Cs}$  y en el día III el orden se invierte nuevamente. Se pudo aplicar coeficientes normalizadores a los datos, ya que cada día se repetía la última medición del día anterior, y utilizarlos de todos modos, pero es interesante observar la importancia de los factores geométricos en los ensayos de radiación.

Luego, se realizaron mediciones para placas de alumi-

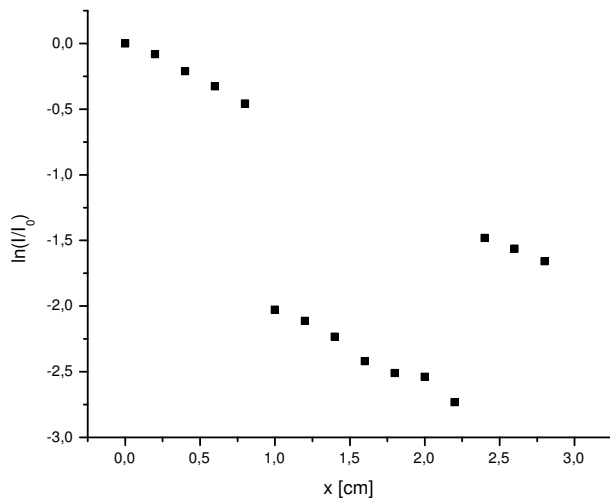


Figura 8: Gráfico obtenido para el logaritmo de la intensidad realtiva del pico característico del  $^{137}\text{Cs}$  de 0,661 MeV en función del espesor de la barrera atenuadora

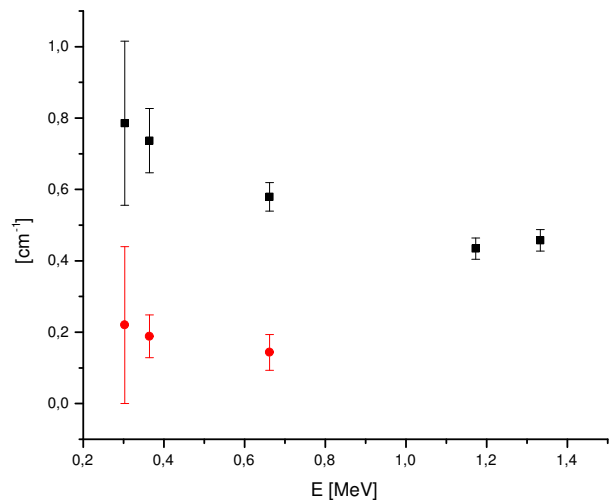


Figura 9: Coeficiente de atenuación  $\mu$  en función de la energía de la radiación. Los cuadrados corresponden al hierro y los círculos al aluminio

nio, utilizando la superposición de las fuentes de  $^{133}\text{Ba}$  y  $^{137}\text{Cs}$ , con exposiciones de 150 segundos. Los datos se procesaron del modo explicado para los ensayos con placas de hierro.

Si se grafica  $\mu$  en función de la energía del pico característico utilizado, como se muestra en la figura 9, se ve que la atenuación disminuye con el aumento de la energía de la radiación, como era de esperarse para materiales metálicos. Además,  $\mu$  es mucho menor para el aluminio que para el hierro, lo que parecería indicar un aumento con el número atómico.

A continuación se tomaron las posiciones medidas de picos característicos conocidos y se realizó una calibración en energía, como se muestra en la figura 10.

Se ve claramente que la respuesta del sistema es lineal en energía, con una equivalencia dada por  $1\text{ canal} = 0,00348\text{ MeV}$ .

## B. Efecto Compton

Se tomaron mediciones del espectro para ángulos de entre  $20^\circ$  y  $70^\circ$ , con saltos de  $10^\circ$  y para  $0^\circ$ , con exposiciones de 50 minutos. Realizar mediciones a intervalos menores de ángulo no hubiera sido útil, ya que el detector tenía una precisión de aproximadamente  $8^\circ$ . En la figura 11 se muestran varios de los espectros obtenidos.

Se observa que con el aumento del ángulo el pico característico del  $^{137}\text{Cs}$  disminuye en intensidad y en energía. Además, se observa que el comienzo del espectro varía sensiblemente con el ángulo, lo que puede ser atribuido a factores geométricos tales como rebotes en las paredes. Sin embargo, en la zona del pico de interés el fondo se mantiene constante, por lo que esta variación no tiene

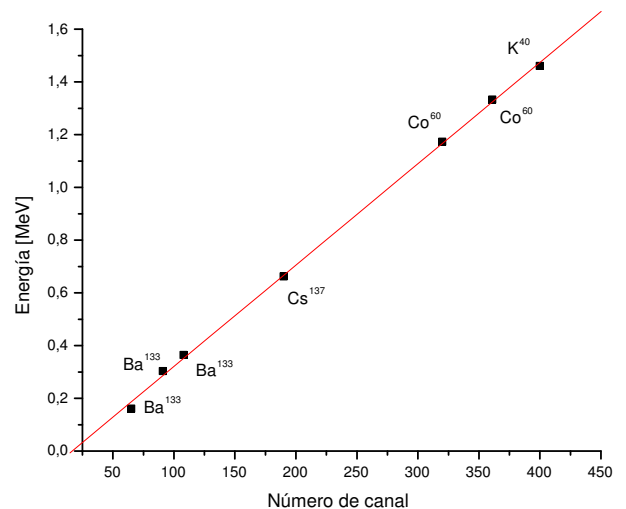


Figura 10: Calibración en energía: Valores tabulados de energía para picos característicos de las fuentes en función de su posición en número de canal

por qué afectar nuestro estudio del efecto Compton. Finalmente, en la zona del canal 400, se observa un pico que no varía con el ángulo. Si se miran los espectros de atenuación con más detalle, se encontrará el mismo pico, que puede ser identificado con el decaimiento del  $^{40}\text{K}$ , elemento que se encuentra en grandes cantidades en la naturaleza.

Aunque no afectaba nuestras mediciones, se intentó esclarecer la variación del fondo atribuida a factores geométricos ya comentada. Para esto, se repitieron to-

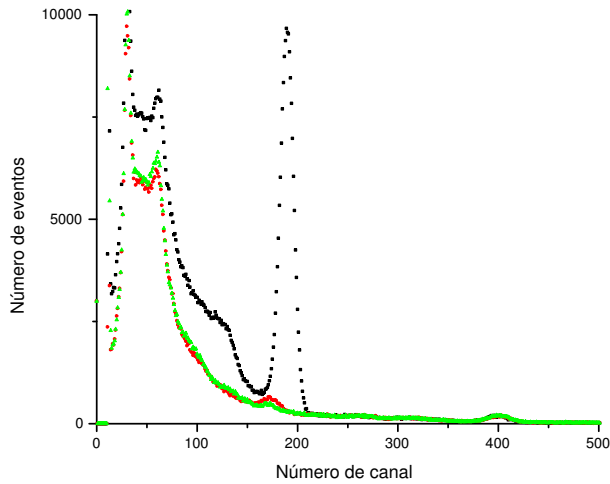


Figura 11: Espectros obtenidos en el ensayo de efecto Compton para ángulos de  $0^\circ$  en negro,  $20^\circ$  en gris oscuro y  $50^\circ$  en gris claro

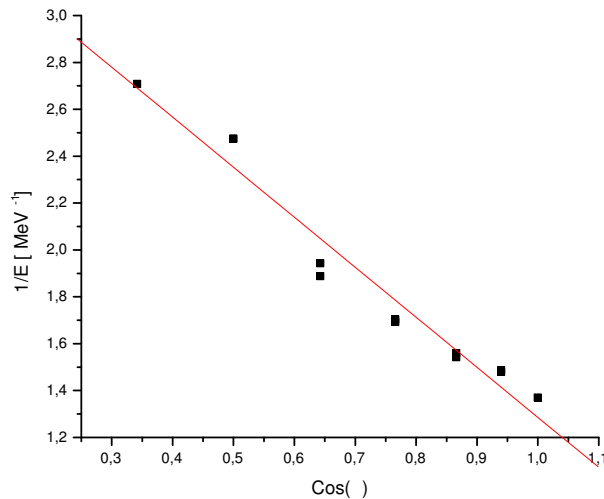


Figura 12: Inversa de la energía del pico característico en función del ángulo de deflexión

das las mediciones para ángulos negativos. Se esperaba no encontrar el efecto comentado, ya que en este caso el detector no apuntaba hacia una pared cercana. Sin embargo, sí se lo observó, y aumentado. En resumen, no se pudo esclarecer el origen preciso de las variaciones, probablemente porque se debían a factores geométricos muy complicados de analizar.

A continuación, se graficó la inversa de la energía del pico característico en función del coseno del ángulo entre el haz principal de la fuente y el detector, como se muestra en la figura 12.

Se ajusta bastante bien un modelo lineal cuya pendiente es, según la ecuación 1, menos la inversa de la energía en reposo del electrón. En nuestro caso,  $m_0c^2 = (0,47 \pm 0,05)MeV$ , resultado que es compatible con los tabulados.

#### IV. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Se estudió la interacción de la radiación gamma con muestras metálicas, utilizando fuentes radiactivas de baja intensidad. Se midió la atenuación de la radiación debida a placas metálicas en función del espesor de la placa para hierro y aluminio. Se obtuvo el coeficiente de atenuación  $\mu$ , para distintas energías, encontrándose un aumento con el número atómico y una disminución con la energía de la radiación. Se estudió el efecto Compton, verificándose experimentalmente las predicciones teóricas y obteniéndose un valor de  $m_0c^2 = (0,47 \pm 0,05)MeV$  para la energía en reposo del electrón. Se observó la alta influencia de los factores geométricos en las mediciones de radiación electromagnética. Finalmente se estudió la radiación de fondo, encontrándose picos de eventos a energías relacionadas con el decaimiento radiactivo de elementos comunes en la naturaleza.