

Colisiones de fotones y electrones

E. Kropff, J. von Stecher.

Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Se estudian espectros de radiación gama para distintas muestras de materiales radiactivos. A partir del estudio del Efecto Compton se contrastan los resultados experimentales con la dinámica relativista y clásica. Se determina la energía en reposo del electrón obteniéndose como resultado un valor de 518 ± 23 Kev.

I. Introducción

En el presente experimento se estudia el efecto. Se pretende determinar la masa en reposo del electrón y contrastar en el estudio los modelos clásico y relativista.

La interacción entre los rayos γ y la materia se produce básicamente de tres maneras: por efecto fotoeléctrico, efecto Compton y por creación de pares.

En un espectro típico realizado con un centellador para un material radioactivo, como el que se muestra en la Fig. 1, se observan picos correspondientes a las energías de emisión de la fuente. Estos picos provienen de la interacción de los rayos γ emitidos por la muestra con el material del centellador por efecto fotoeléctrico y por creación de pares (no siempre). Además por cada pico se observa una meseta que decae antes de alcanzar la energía de emisión correspondiente. Estas mesetas provienen de la interacción de los rayos γ emitidos por la fuente con los electrones del material del centellador por efecto Compton.

Para explicar la forma que presentan las mencionadas mesetas supóngase en primera instancia que cada electrón excitado por efecto Compton recibe energía por un único choque con un rayo γ . Según esto, y teniendo en cuenta la conservación de energía e impulso totales durante un choque de esta naturaleza, la energía

final del electrón dependerá únicamente del ángulo relativo con que salen el electrón y el fotón luego del choque (suponiendo que inicialmente el electrón estaba quieto). De esta manera existe un valor máximo de energía transmitida del fotón al electrón, que corresponde a un ángulo de 180° , llamado borde compton. De aquí que la

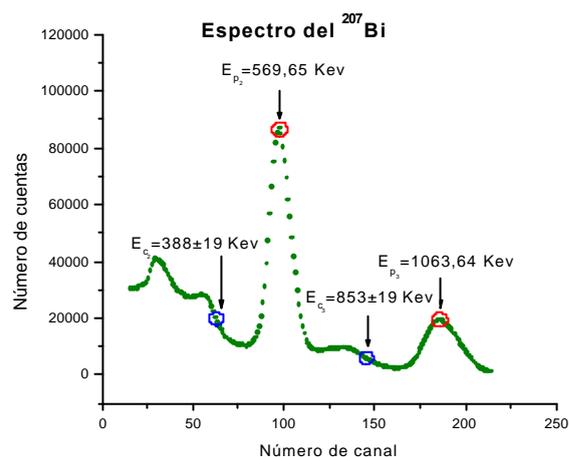


figura típica sea una meseta.

Fig. 1 Espectro del ^{207}Bi . Se observan las mesetas de Compton y los picos por efecto fotoeléctrico.

Experimentalmente se observan dos efectos que escapan a lo explicado anteriormente. El primero de ellos es una suavidad en la caída de la meseta. Esto se debe en parte a las limitaciones en resolución y en parte a que los electrones no están quietos. El segundo efecto observable es que la meseta no cae a cero antes de llegar al fotopico correspondiente sino a un valor

intermedio. Esto se debe a que, dado el tamaño de detector, no es despreciable la ocurrencia de choques múltiples de tipo efecto Compton, que posibilita que algunos electrones tengan energía mayor a la del borde Compton.

La energía cinética máxima de los electrones debido al efecto Compton (luego de un único impacto) es el borde de Compton, o E_c , siendo este el caso en que el electrón y el rayo γ en juego se mueven en todo momento en la misma dirección. Por conservación del momento lineal y la energía se tiene en este caso¹:

$$p \cdot c = 2 E_\gamma - T \quad (1)$$

donde p es el impulso lineal de el electrón, c es la velocidad de la luz en el vacío, E_γ es la energía del rayo γ y T es la energía cinética del electrón (igual a E_c en el caso tratado).

La relación (1) vale tanto para el caso clásico como relativista. Tanto aquí como en adelante se utiliza el término *clásico* como sinónimo de *no relativista*. A partir de la relación entre energía cinética e impulso lineal en ambos marcos teóricos pueden obtenerse las relaciones:

$$m_{hr} = \frac{(2 E_\gamma - T)^2}{2 T} \quad (2)$$

para el caso clásico, donde m_{hr} es la masa no relativista del electrón, y

$$m_0 \cdot c^2 = \frac{2 E_\gamma (E_\gamma - T)}{T} \quad (3)$$

para el caso relativista, donde m_0 es la masa en reposo. De aquí puede despejarse:

$$T = \frac{2 E_\gamma^2}{2 E_\gamma + m_0 \cdot c^2} \quad (4)$$

A partir de las definiciones de β y γ pueden obtenerse para el caso relativista las relaciones:

$$\beta = \frac{2 E_\gamma - T}{T + m_0 \cdot c^2} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{T + m_0 \cdot c^2}{m_0 \cdot c^2} \quad (6)$$

Además la energía total relativista del electrón se escribe:

$$E = T + m_0 \cdot c^2 \quad (7)$$

o bien,

$$E = \gamma m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{(1 - \beta^2)^{1/2}} \quad (8)$$

A partir de estas relaciones es posible determinar la masa del electrón a partir de T (es decir E_c), y E_γ , tanto en el caso clásico como relativista.

II. Desarrollo experimental

Como se comenta en la introducción se utiliza un centellador para medir la radiación proveniente de una fuente radioactiva (^{22}Na , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{207}Bi). En la Fig. 2 se muestra un diagrama de la disposición de aparatos.

Al penetrar el centellador de NaI(Tl) ¹ un porcentaje de los rayos γ provenientes de la fuente interactúa con la materia que lo compone. La interacción se produce básicamente de tres maneras: efecto fotoeléctrico, Efecto Compton y creación de pares². Como resultado de la interacción la energía de los fotones es transmitida a electrones. A su vez estos electrones excitan la red cristalina haciendo que esta emita fotones ópticos cuyo número es proporcional a la energía del fotón inicial incidente en el caso de que el

mismo haya sido absorbido por efecto fotoeléctrico. En el caso de interacción por efecto Compton, como los fotones incidentes no transmiten toda su energía en el primer impacto, esta relación de proporcionalidad se pierde.

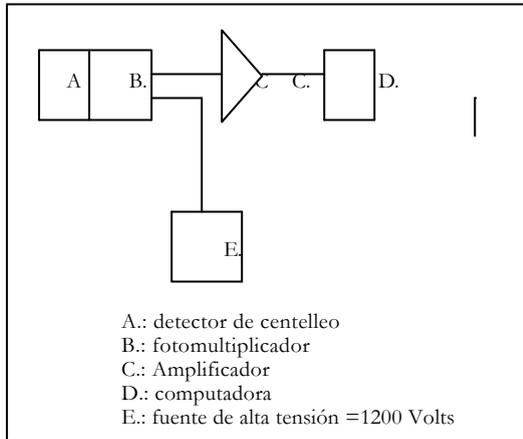


Fig. 2 Diagrama de los aparatos. La radiación proveniente de la muestra incide sobre el detector de centelleo (A).

Los fotones provenientes del centellador inciden sobre el fotocátodo de un fotomultiplicador. Por cada fotón incidente se emiten electrones por efecto fotoeléctrico. Al pasar los mismos por una serie de electrodos producen la emisión de nuevos electrones, amplificando de esta manera la señal. La salida del fotomultiplicador entrega un pulso de tensión cuya amplitud es proporcional a la energía del rayo γ inicial, siempre que el mismo haya sido absorbido por efecto fotoeléctrico. En el caso de que el mismo hubiera sido absorbido por Efecto Compton en sucesivos impactos, se producirán varios pulsos de menor amplitud.

A la salida del fotomultiplicador se coloca un amplificador que además conforma el pulso mencionado. El multicanal recolecta la señal amplificada y la digitaliza. Cada canal corresponde a un rango de energías distinto de los fotones incidentes. Se utiliza un software que grafica el

número de fotones detectados por cada canal.

Para saber qué rango de energías corresponde a cada canal es preciso hacer una calibración. Para ello se utilizan los valores de tabla para los picos de emisión de las fuentes utilizadas.

Para completar la información que aportan las mediciones se utilizan datos de otros espectros medidos con un detector de Germanio. Estos detectores tienen mucha mayor resolución que los de NaI.

III. Análisis de datos

Dados los inconvenientes explicitados en la introducción para determinar el borde de Compton, E_c , es necesario establecer un criterio. El criterio utilizado se basa en el trabajo de P. L. Jolivette y N. Rouze³. El mismo consiste en tomar al borde de Compton como el valor de energía en que la meseta decae a un 54% de su diferencia de valores máxima. En el mismo trabajo se estudia el error proporcionado por este método, que resulta ser de un 4%. Sin embargo, se comprueba que el error instrumental en la determinación del borde de Compton es mucho mayor.

Las energías E_γ correspondientes a cada muestra se sacan de tablas⁴.

IV. Resultados

En la Fig. 3 se muestra la curva de calibración del centellador, realizada a partir de las muestras utilizadas.

En la Fig. 4 se muestra el gráfico del borde de Compton versus la energía del fotopico correspondiente. Se ajusta la función según (4) obteniéndose la energía en reposo del electrón como parámetro de ajuste.

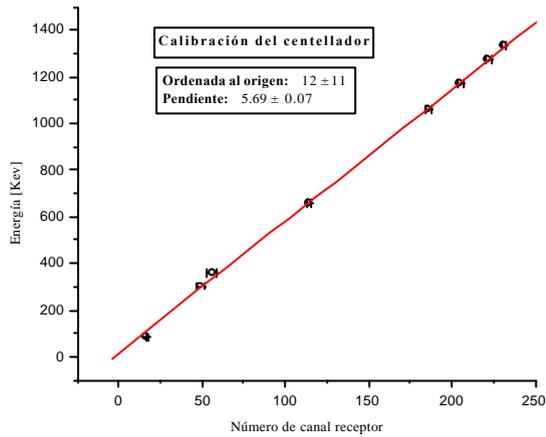


Fig. 3 Calibración del centellador. Las energías correspondientes a los fotopicos se sacan de tablas.

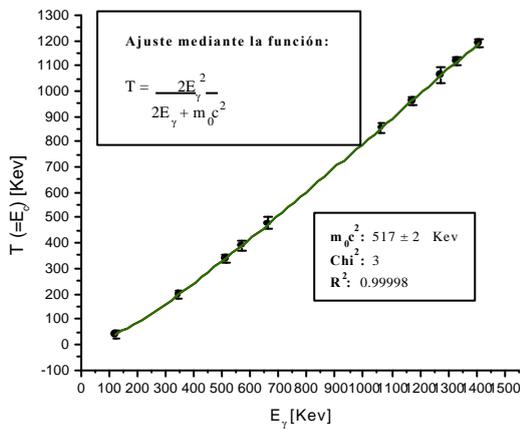


Fig. 4 Energía de borde de Compton versus energía del fotopico correspondiente. Se ajusta mediante (4).

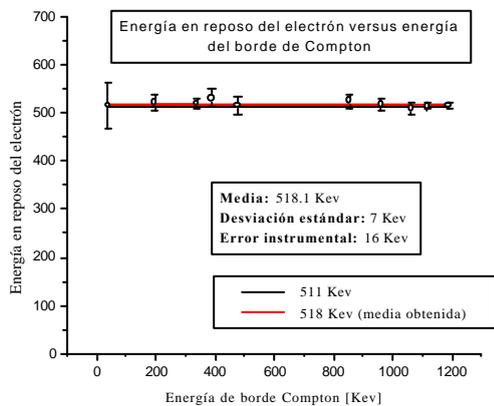


Fig. 5 Se grafica $m_0 c^2$ (energía en reposo del electrón) versus la energía del borde de Compton para cada medición.

En la Fig. 5 se muestra el gráfico de la masa en reposo del electrón versus la energía de borde de Compton.

En la Fig. 6 se muestra el gráfico de la masa no relativista del electrón versus la energía cinética para cada medición.

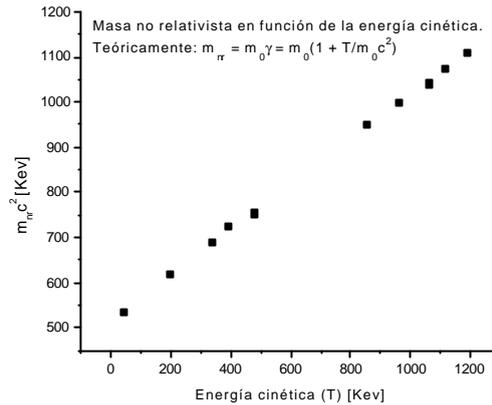


Fig. 6 Masa no relativista versus energía cinética. Se observa una relación lineal.

En las Figs. 7 y 8 se muestran los gráficos de la energía total del electrón versus β y γ respectivamente. Se ajusta en ambos casos utilizando (8) quedando $m_0 c^2$ como parámetro de ajuste.

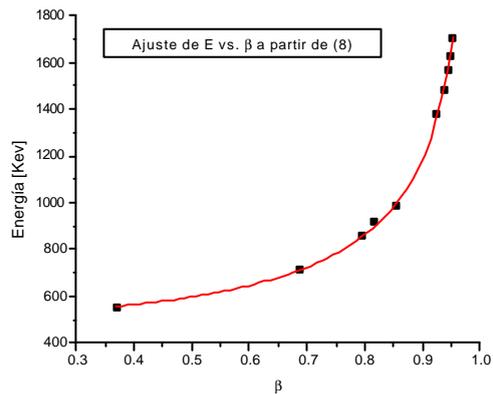


Fig. 7 Energía del electrón versus β . Se ajusta según (8). El valor de ajuste para $m_0 c^2$ es 516 ± 5 .

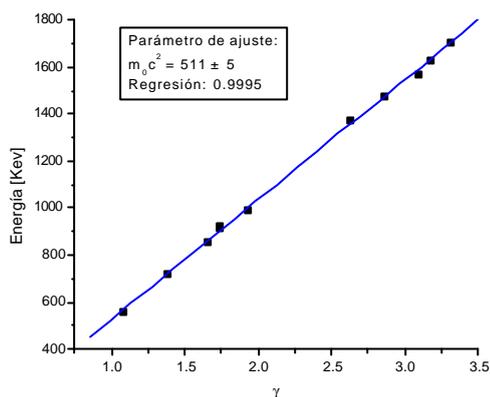


Fig. 8 Energía vs. $g m_0 c^2 = 511 \pm 5$.

V. Conclusiones

El resultado obtenido para la energía en reposo del electrón, que se exhibe en la Fig 5, es de 518 ± 23 Kev, que concuerda con el valor de tablas.

Los otros valores para la energía en reposo del electrón obtenidos como parámetros de ajuste de distintas funciones no tienen en cuenta los errores instrumentales. Si bien en todos los casos el valor que se asigna a la energía en reposo está dentro de la banda de indeterminación mencionada más arriba, el error correspondiente es mucho menor, pues es puramente estadístico.

Se observa por el buen ajuste de las funciones en cada caso que todos los resultados experimentales están dentro del marco de la dinámica relativista.

En la Fig. 6 se observa que la dinámica clásica es insuficiente para estudiar estos fenómenos debido a que la m_{nr} no se mantiene constante y crece linealmente con la energía cinética como se espera a partir de la dinámica relativista.

VI. Referencias

¹Para mayor información sobre el funcionamiento de estos centelladores consúltese: G. F. Knoll, "Radiation detection

and measurements", 2stEd., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1989, Capítulos 3 y 10.

² Para mayor información con respecto a estos fenómenos de interacción de la radiación con la materia consúltese: N. Tsoulfanidis, "Measurement and Detection of Radiation", Mc. Graw-Hill, New York, 1983, Capítulo 4; o bien G. F. Knoll, "Radiation detection and measurements", 2stEd., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1989, Capítulo 2.

³ "Compton Scatering, the electrón mass, and relativity: A laboratory experiment", P. L. Jolivette & N. Rouze, Am. J. Phis. **62**, 266 (1994)

⁴ "Table of Radioisotopes", Lederer, Hollander y Perlman, 6thEd., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967.