

## COLISIÓN ELECTRÓN FOTÓN. Busca, Nicolás Guillermo - Mínces, Victor Hugo

El presente trabajo describe una experiencia de laboratorio destinada a obtener los espectros de diversas fuentes con un centellador de NaI(Tl), analizarlos identificando las diferentes interacciones posibles de la radiación con la materia y comparar las predicciones relativistas y no relativistas con los resultados de la experiencia. Se obtiene además, (a partir del modelo relativista) la masa en reposo del electrón.

**1. INTRODUCCIÓN.** Uno de los modelos más simples que pueden proponerse para explicar la interacción entre radiación electromagnética la materia es pensar en términos de colisiones entre partículas. Así, se supone a la radiación como compuesta por fotones (partículas a las que se le asigna masa cero) “chocando” con los electrones del material.

Para estudiar estas colisiones, se analizaron los espectros de diversas fuentes radioactivas obtenidas con un cristal centellador de NaI dopado con Tl. La fuente provee la radiación que se hace incidir sobre el cristal, provocando las colisiones mencionadas. El cristal, a su vez reemite fotones (en el rango del visible). El número de fotones emitidos depende de la energía del fotón incidente, y de los múltiples procesos que sufre el fotón dentro del cristal (estos procesos se describen en la sección siguiente).

Para tratar estas colisiones que involucran a partículas de masa cero hay dos reglas a tener en cuenta, una “cuántica” y otra “relativista”: primero deben utilizarse las expresiones de de Broglie (ver Apéndice) para asignarle una energía y un impulso al fotón, y segundo, que el fotón viajará a la velocidad de la luz en cualquier sistema de referencia (además se supone válida la conservación de la energía y el impulso).

Cuando se hace incidir entonces radiación E.M. sobre un material, se supone que los fotones colisionan con los electrones del mismo. Si el material es un

semiconductor, una porción de sus electrones se encuentra en la llamada “banda de conducción”. Allí, los electrones están libres de moverse dentro del material.

Es razonable entonces modelar las colisiones con estos fotones como colisiones entre un fotón y un electrón libre. Lo más sencillo que puede ocurrir es que el fotón entregue toda su energía e impulso al electrón (en el estado final no hay fotones). Esto se conoce como efecto fotoeléctrico.

Otro tipo de choque puede ser aquel en el que el fotón entrega parte de su energía e impulso al electrón (en el estado final hay un fotón de menor frecuencia y un electrón con el resto de la energía). Este proceso se conoce como scattering de Compton. Hay una energía máxima que el fotón puede entregare al electrón por scattering Compton. Esta energía está dada por (ver Apéndice):

$$p \cdot c = T_c - 2 \cdot E_g \quad [1]$$

Aquí,  $T_c$  es la energía cinética final del electrón,  $E_g$  es la energía del fotón incidente,  $p$  es el impulso final del electrón y  $c$ , la velocidad de la luz. Cabe destacar que la relación [1] se obtiene sólo de suponer la conservación de la energía.

La relación entre  $p$  y  $T$  se dejó deliberadamente indeterminada, ya que pueden proponerse dos expresiones, una relativista y otra no relativista. La primera está dada por:

$$p \cdot c = \sqrt{(T_R + m \cdot c^2)^2 - m^2 \cdot c^4} \quad [2]$$

y la segunda por:

$$p \cdot c = \sqrt{2 \cdot m \cdot T_{NR}} \quad [3]$$

aquí,  $m$  es la masa del electrón (o masa en reposo).

Midiendo con el centellador el espectro de las distintas fuentes (o sea, distintas energías del fotón incidente) puede obtenerse la energía máxima de Compton ( $T_c$ ).

A partir de estos resultados se graficará la relación 1 y se la comparará con 2 y con 3 en orden de determinar cual ajusta mejor los datos obtenidos.

**2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.** Un esquema del dispositivo experimental se muestra en la fig. 1.

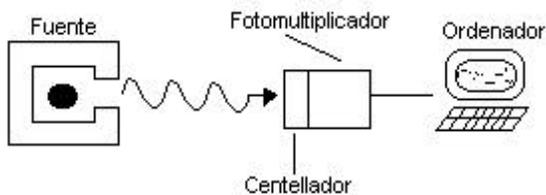


Fig. 1. Detalle del dispositivo experimental.

Este consiste en un centellador de NaI(Tl), sobre el cual se hace incidir radiación de diversas fuentes. El centellador reemite fotones en el rango del visible cuyo número depende de los diferentes procesos en que el fotón incidente interactúe con el material (se volverá sobre este tema más adelante). Los fotones emitidos por el centellador son captados por un tubo fotomultiplicador que entrega un pulso de tensión proporcional a su número. Estos pulsos se adquieren con la computadora y mediante un analizador multicanal se realiza un histograma que los agrupa según su amplitud.

### Funcionamiento de un centellador:

Un centelleador es un semiconductor que se utiliza para producir una cantidad de fotones en el rango del visible proporcional a la energía cinética de una partícula cargada que se mueve dentro de él. Esta partícula cargada decae del rango de conducción al de valencia liberando un fotón con frecuencia conforme a la energía del salto. Si el material fuera puro esta frecuencia sería mayor que la del visible, lo que se hace por tanto es introducir en el material impurezas que permitan que haya niveles intermedios entre los rangos de valencia y conducción de tal manera de que los saltos energéticos sean escalonados con energías compatibles con las frecuencias deseadas. La distancia en que esto se produce es de aproximadamente 2 cm.

Al penetrar un fotón gamma en el centelleador interactúa con la materia de una de las maneras mencionadas anteriormente.

Si se produce el efecto fotoeléctrico el electrón tendrá toda la energía que tenía el fotón incidente por lo tanto esta es la energía que el centelleador detectará.

Si se produce el efecto Compton se detectará solo la energía que tenga el electrón con el que se produce la colisión y habrá además un fotón gamma secundario que a su vez podrá seguir interactuando o podrá escapar.

En caso de producirse creación de pares el centelleador captará toda la energía cinética del electrón y el positrón producidos. Al frenarse el positrón se aniquilará junto con un electrón produciendo un par de fotones de aniquilación cada uno de los cuales tendrá una energía igual a la masa en reposo de este, que podrán a su vez seguir interactuando o escapar sin hacerlo.

Si el centellador es lo suficientemente grande (decenas de centímetros) los fotones secundarios seguirán interactuando hasta liberar toda su energía por lo tanto se obtendrá un pico en la frecuencia del fotón incidente.

Si es lo suficientemente chico todos los fotones secundarios escapan. Por lo tanto se obtendrán, además del pico correspondiente a los electrones excitados por efecto fotoeléctrico (fotopico) una región continua de Compton con un corte bien marcado y, puesto que escapan ambos fotones de aniquilación en la creación de pares también se verá un pico de energía igual a la incidente menos dos veces la energía en reposo del electrón y su correspondiente continuo Compton.

Puesto que en general los fotones secundarios seguirán interactuando en el caso de los centelladores medianos pero también escapan, el corte Compton será menos abrupto, además se dará la posibilidad de que escape un solo fotón de aniquilación en el caso de la creación de pares con lo cual se obtendrá también un pico en la energía correspondiente a la frecuencia incidente menos la energía en reposo del electrón.

Calibración del multicanal. Dado que, como se explicó, el voltaje ( $V$  y por lo tanto el canal), asociado al fotopico es proporcional a la energía del fotón incidente bastará con conocer el canal que corresponde al fotopico fuentes conocidas.

Las fuentes que se utilizaron fueron Na22, Cs137, Co60, Bi207, Ba133.

**3.RESULTADOS.** En el gráfico 1 se muestra el espectro del Cs137. En él se puede apreciar tanto el fotopico como el continuo Compton con su correspondiente corte.

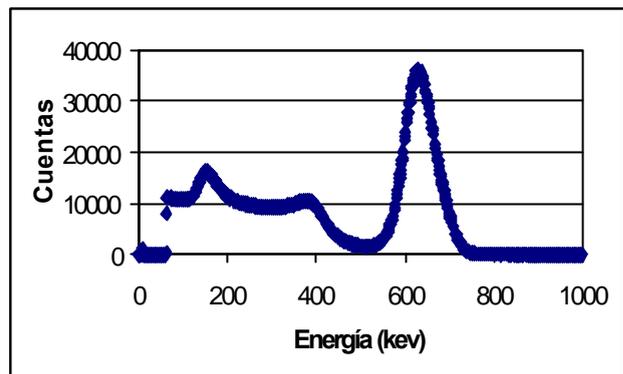


Gráfico 1. Espectro del Cs137.

Como se ve el corte no es abrupto, esto se debe a que el centellador utilizado es del tipo mediano, la energía de corte corresponde aproximadamente al punto medio entre el máximo del continuo Compton y el plateau que le subsigue. (ver ref. 2)

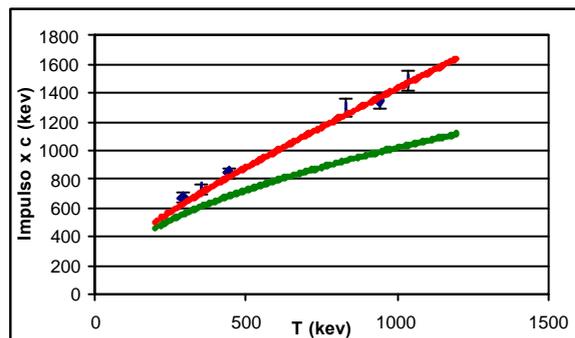


Gráfico 2. Impulso del electrón en función de su energía cinética. Los puntos corresponden a los datos experimentales, y las líneas llenas a las predicciones relativista (rojo) y no relativista (verde).

Siguiendo la expresión 1 y asociando  $T_c$  a la energía del corte Compton y  $E_\gamma$  a la del fotopico se obtiene un gráfico de p.c como función de  $T_c$  (ver gráfico 2). Las líneas roja y verde indican los ajustes según las fórmulas 2 y 3 respectivamente. Se aprecia como la fórmula relativista ajusta los datos obtenidos, no así la no relativista.

De 1 y 2 se deduce que la relación de la masa del electrón con  $T_c$  y  $E_\gamma$  es:

$$m \cdot c^2 = \frac{2 \cdot E_g \cdot (E_g - T_c)}{T_c} [4]$$

En el gráfico 3 se grafica  $mc^2$  en función de  $T_c$ . El promedio de estos resultados es  $(570 \pm 60)$  Kev. Lo que concuerda con el resultado conocido.

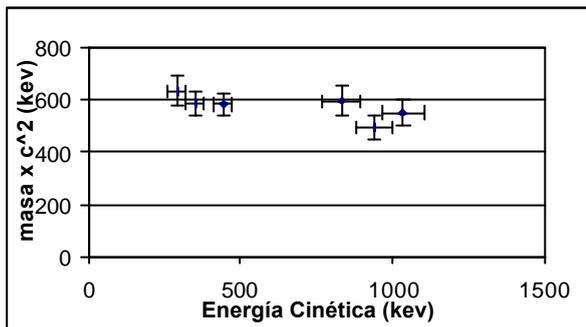


Gráfico 3. Masa del electrón en función de su energía cinética (cálculo relativista)

**4. CONCLUSIONES.** Se verificaron las predicciones de la relatividad especial y se averiguó la masa del electrón a partir de estas con un error menor al 10 %. Como se dijo anteriormente, a causa de la interacción de los fotones secundarios con el centellador el corte Compton no es tan claro. Se usó por esto un criterio basado en la estadística de Montecarlo (ver ref. 2) para determinarlo. Creemos que su medición sería más exacta si se utilizara un centellador más corto de manera de evitar las interacciones secundarias.

## REFERENCIAS

1. G. Knoll, en Radiation Detection and Measurement, 2<sup>nd</sup> edition Wiley & Sons NY 1989. Pag. 315.
2. "Compton Scattering, the electron mass and relativity: A Laboratory experiment", P.L. Jolivet y N. Rouze, Am. J. Phy. 62(1994) Pag 266

## BIBLIOGRAFÍA

- ◆ R.P. Feynman "Lectures on physics" Vol.3. Addison Wesley, 1969
- ◆ G. Knoll, en Radiation Detection and Measurement, 2<sup>nd</sup> edition Wiley & Sons NY 1989
- ◆ Am. J. Phy.
- ◆ "Compton Scattering, the electron mass and relativity: A Laboratory experiment", P.L. Jolivet y N. Rouze, Am. J. Phy. 62(1994) Pag 266

Guía de T.P. "Colisiones entre fotones y electrones" por S. Gil y E. Rodríguez, Física re-Creativa, [www.geocities.com/sgil\\_1953](http://www.geocities.com/sgil_1953)