

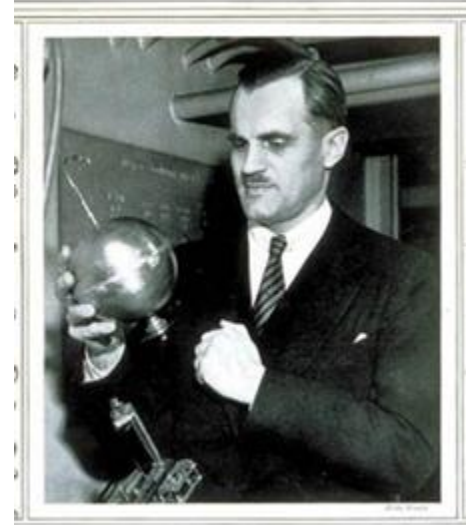


# Guía de Física: Efecto Compton.

## Recopilación Montoya.

Compton nació en Wooster (Ohio) y estudió en el Wooster College y en la Universidad de Princeton. En 1923 fue profesor de física en la Universidad de Chicago. Durante su estancia en esta universidad, Compton dirigió el laboratorio en el que se produjo la primera reacción nuclear en cadena, lo que provocó que tuviera un papel relevante en el Proyecto Manhattan, la investigación que desarrolló la primera bomba atómica.

Desde 1945 hasta 1953 Compton fue rector de la Universidad de Washington y después de 1954 fue catedrático de Filosofía Natural.



## Investigaciones científicas

Sus estudios de los rayos X le llevaron a descubrir en 1922 el denominado *efecto Compton*. El *efecto Compton* es el cambio de longitud de onda de la radiación electromagnética de alta energía al ser difundida por los electrones. El descubrimiento de este efecto confirmó que la radiación electromagnética tiene propiedades tanto de onda como de partículas, un principio central de la teoría cuántica.

Por su descubrimiento del *efecto Compton* y por su investigación de los rayos cósmicos y de la reflexión, la polarización y los espectros de los rayos X compartió el Premio Nobel de Física de 1927 con el físico británico Charles Wilson.

## Reconocimientos

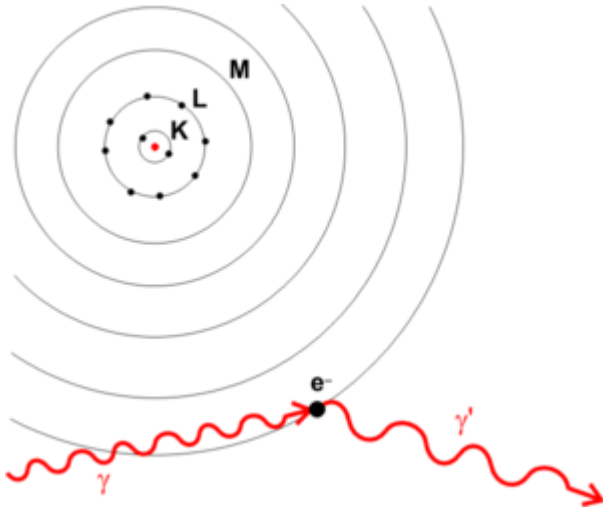
En su honor, así como en el de su hermano Karl Taylor Compton, se bautizó al cráter Compton de la Luna así como el asteroide (52337) Compton, descubierto el 2 de septiembre de 1992 por Freimut Börngen y Lutz D. Schmadel.

## Obras

- *Los rayos X y los electrones (X-Rays and Electrons)*, 1926
- *The Freedom of Man (La libertad del hombre)*, 1935
- *Los rayos X en la teoría y en la práctica experimental (X-Rays in Theory and Experiment)*, 1935), escrito en colaboración con S. K. Allison
- *Human Meaning of Science (El significado humano de la ciencia)*, 1940

# Efecto Compton

El **efecto Compton** consiste en el aumento de la longitud de onda de un fotón de rayos X cuando choca con un electrón libre y pierde parte de su energía. La frecuencia o la longitud de onda de la radiación dispersada depende únicamente de la dirección de dispersión.



## Descubrimiento y relevancia histórica

El Efecto Compton fue estudiado por el físico Arthur Compton en 1923, quién pudo explicarlo utilizando la noción cuántica de la radiación electromagnética como cuantos de energía. El efecto Compton constituyó la demostración final de la naturaleza cuántica de la luz tras los estudios de Planck sobre el cuerpo negro y la explicación de Albert Einstein del efecto fotoeléctrico. Como consecuencia de estos estudios Compton ganó el Premio Nobel de Física en 1927.

Este efecto es de especial relevancia científica, ya que no puede ser explicado a través de la naturaleza ondulatoria de la luz. La luz debe comportarse como partículas para poder explicar estas observaciones, por lo que adquiere una dualidad onda corpúsculo característica de la mecánica cuántica.

## Formulación matemática

La variación de longitud de onda de los fotones dispersados,  $\Delta\lambda$ , puede calcularse a través de la relación de Compton:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta),$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $m_e$  es la masa del electrón,  $c$  es la velocidad de la luz y  $\theta$  es el ángulo entre los fotones incidentes y dispersados.

Esta expresión proviene del análisis de la interacción como si fuera una colisión elástica y su deducción requiere únicamente la utilización de los principios de conservación de energía y momento. La cantidad  $h / m_e c = 0.0243 \text{ \AA}$ , se denomina longitud de onda de Compton. Para los fotones dispersados a  $90^\circ$ , la longitud de onda de los rayos X dispersados es justamente  $0.0243 \text{ \AA}$  mayor que la línea de emisión primaria.

## Efecto Compton inverso

También puede ocurrir un Efecto Compton inverso; es decir, que los fotones disminuyan su longitud de onda al chocar con electrones. Pero para que esto suceda es necesario que los electrones viajen a velocidades cercanas a la velocidad de la luz y que los fotones tengan altas energías.

La principal diferencia entre los dos fenómenos es que durante el Efecto Compton "convencional", los fotones entregan energía a los electrones, y durante el inverso sucede lo contrario.

Este efecto puede ser una de las explicaciones de la emisión de rayos X en supernovas, quasars y otros objetos astrofísicos de alta energía.

### Simulación experimental de efecto Compton.

"[http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_Compton](http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Compton)"

Categorías: Fenómenos electromagnéticos | Mecánica cuántica | Electrodinámica cuántica

Cuando se analiza la radiación electromagnética que ha pasado por una región en la que hay electrones libres, se observa que además de la radiación incidente, hay otra de frecuencia menor. La frecuencia o la longitud de onda de la radiación dispersada depende de la dirección de la dispersión.

Sea  $\lambda$  la longitud de onda de la radiación incidente, y  $\lambda'$  la longitud de onda de la radiación dispersada. Compton encontró que la diferencia entre ambas longitudes de onda estaba determinada únicamente por el ángulo  $\theta$  de dispersión, del siguiente modo

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

donde  $\lambda_c$  es una constante que vale  $2.4262 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

Se explica el efecto Compton en términos de la interacción de la radiación electromagnética con electrones libres, que suponemos inicialmente en reposo en el sistema de referencia del observador.

## Fundamentos físicos

En el efecto fotoeléctrico solamente hemos considerado que el fotón tiene una energía  $E=hf$ . Ahora bien, un fotón también tiene un momento lineal  $p=E/c$ .

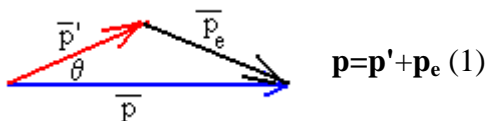
Esta relación no es nueva, sino que surge al plantear las ecuaciones que describen las ondas electromagnéticas. La radiación electromagnética tiene momento y energía. Cuando analicemos cualquier proceso en el que la radiación electromagnética interactúa con las partículas cargadas debemos de aplicar las leyes de conservación de la energía y del momento lineal.

En el caso del efecto fotoeléctrico, no se aplicó la ley de conservación del momento lineal por que el electrón estaba ligado a un átomo, a una molécula o a un sólido, la energía y el momento absorbidos están compartidos por el electrón y el átomo, la molécula o el sólido con los que está ligado.

Vamos a obtener la fórmula del efecto Compton a partir del estudio de un choque elástico entre un fotón y un electrón inicialmente en reposo.

### 1. Principio de conservación del momento lineal

- Sea  $\mathbf{p}$  el momento lineal del fotón incidente,  $p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$
- Sea  $\mathbf{p}'$  el momento lineal del fotón difundido,  $p' = \frac{E'}{c} = \frac{hf'}{c} = \frac{h}{\lambda'}$
- Sea  $\mathbf{p}_e$  es el momento lineal del electrón después del choque, se verificará que



### 2. Principio de conservación de la energía

- La energía del fotón incidente es  $E=hf$ .
- La energía del fotón dispersado es  $E'=hf'$ .
- La energía cinética del electrón después del choque no la podemos escribir como  $m_e v^2/2$  ya que el electrón de retroceso alcanza velocidades cercanas a la de la luz, tenemos que reemplazarla por la fórmula relativista equivalente

$$E_k = c \sqrt{m_e^2 c^2 + p_e^2} - m_e c^2$$

donde  $m_e$  es la masa en reposo del electrón  $9.1 \cdot 10^{-31}$  kg

El principio de conservación de la energía se escribe

$$E = E' + c \sqrt{m_e^2 c^2 + p_e^2} - m_e c^2 \quad (2)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones (1) y (2) llegamos a la siguiente expresión

$$\frac{1}{E} - \frac{1}{E'} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)$$

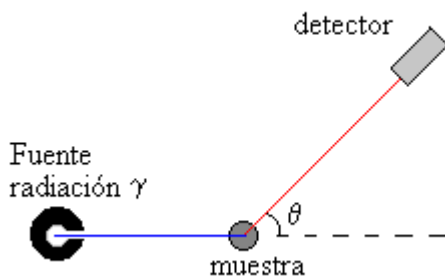
Teniendo en cuenta la relación entre frecuencia y longitud de onda se convierte en la expresión equivalente

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

Hemos obtenido el valor de la constante de proporcionalidad  $\lambda_c$  a partir de las constantes fundamentales  $h$ ,  $m_e$  y  $c$ .

Llegamos entonces a la conclusión de que podemos explicar la dispersión de la radiación electromagnética por los electrones libres como una colisión elástica entre un fotón y un electrón en reposo en el sistema de referencia del observador. A partir de las ecuaciones de conservación del momento lineal y de la energía, llegamos a la ecuación que nos relaciona la longitud de onda de la radiación incidente  $\lambda$  con la longitud de onda de la radiación dispersada  $\lambda'$  y con el ángulo de dispersión  $\theta$ .

## Actividades



En la experiencia real, el detector es un cristal de INa, la fuente de rayos gamma está producida por el isótopo Cs-137, que tiene un pico muy agudo centrado en 661.6 keV, o en la longitud de onda  $1.878 \cdot 10^{-12}$  m, (0.01878 Å). Los electrones libres los proporciona un trozo de metal que puede ser una varilla de hierro.

Midiendo la diferencia de longitudes de onda entre la radiación dispersada y la radiación incidente se pide calcular la constante  $\lambda_c$ . A partir del valor de esta constante, y conocida los valores de las constantes fundamentales, velocidad de la luz  $c=3 \cdot 10^8$  m/s y la masa del electrón  $m_e=9.1 \cdot 10^{-31}$  kg,

se pide calcular el valor de la constante  $h$  de Planck, comprobando que está cerca del valor  $6.63 \cdot 10^{-34}$  Js.

Se pulsa el botón titulado **Nuevo**

- Se cambia el ángulo  $\theta$  del detector **actuando con el ratón**,

Se mide la longitud de onda de la radiación dispersada.

### Ejemplo:

La longitud de onda de la radiación dispersada para el ángulo  $60^\circ$  es  $\lambda' = 0.03091$  A. Calcular la constante  $\lambda_C$  y a continuación, la constante  $h$  de Planck.

$$0.03091 - 0.01878 = \lambda_C (1 - \cos 60)$$
$$\lambda_C = 0.02426 \text{ A} = 2.426 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

$$2.426 \cdot 10^{-12} = \frac{h}{9.1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8} \quad h = 6.623 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

En la parte inferior izquierda del applet, se representa la intensidad de la radiación gamma que registra el detector en función de la longitud de onda. En el programa interactivo, la fuente de rayos gamma emite ondas electromagnéticas cuyas longitudes de onda están centradas en  $0.01878$  A. La forma del pico se ha representado mediante la gaussiana

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right)$$

centrada en dicha longitud de onda  $a$ , y cuyo valor sigma  $\sigma$  se ha ajustado para dar la apariencia de un pico agudo (en color azul). La radiación registrada por el detector se ha representado por medio de otra gaussiana (en color rojo) centrada en la longitud de onda dispersada cuyo valor de sigma  $\sigma$  va creciendo con el ángulo de dispersión.

En la parte superior derecha del applet, se muestran los valores numéricos de las longitudes de onda en angstrom ( $10^{-10}$  m) de la radiación incidente y dispersada.

En la parte derecha del applet, podemos ver de forma animada el choque elástico entre un fotón y un electrón en reposo. Podemos apreciar gráficamente cómo cambia la longitud de onda de la radiación dispersada a medida que aumenta el ángulo de dispersión.

Podemos ver también que el electrón retrocede adquiriendo un momento lineal  $p_e$  y formando un ángulo que se puede calcular a partir de las ecuaciones de conservación del momento lineal (1) y de la energía (2). Para calcular la velocidad  $v$  del electrón, necesitamos la expresión

relativista del momento lineal

$$p_e = \frac{m_e v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Actuar con el puntero del ratón sobre el detector para cambiar el ángulo de observación

## Referencias

La descripción de la experiencia real se encuentra en *University Laboratory Experiments. Physics. Volume 3. PHYWE*. Pág. 5.2.12.

### Problemas de aplicación.

#### Efecto Fotoeléctrico y Efecto Compton

##### 1. El fotón

- ¿Cuánto vale la energía de un fotón de luz roja? ( $\lambda = 650 \text{ nm}$ )?
- ¿Cuánto vale su momento?
- ¿Cuánto vale la longitud de onda de un fotón de 2.4 eV?
- La intensidad mínima de luz que puede percibir el ojo humano es  $10^{-10} \text{ W/m}^2$ .  
Cuántos fotones por segundo entran en el ojo a esa intensidad?

##### 2. Efecto Fotoeléctrico

2.1.- Un haz de un láser, con una intensidad de  $120 \text{ W/m}^2$  incide sobre una superficie de Sodio. Suponiendo que un electrón en esa superficie está confinado en un área de radio igual al radio del átomo de Sodio, ¿Cuánto tardará en emitirse el primer fotoelectrón?

Datos: Función de trabajo de Na  $W = 2.3 \text{ eV}$ ,  $\lambda_{\text{Na}} = 1 \text{ \AA}$ .  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

2.2.- La función de trabajo del Tungsteno es  $\phi = 4.52 \text{ eV}$ .

- ¿Cuál es la longitud de onda de corte? ¿En qué rango del espectro electromagnético está?
- ¿Cuál es la máxima energía cinética de los fotoelectrones si  $\lambda = 198 \text{ nm}$ ?
- ¿Cuál es el potencial de frenado en ese caso?

2.3.- El potencial de frenado para fotoelectrones emitidos desde una superficie iluminada con luz de longitud de onda  $\lambda = 4910 \text{ \AA}$  es  $0.71 \text{ V}$ . Cuando se cambia la longitud de onda incidente, se encuentra que el potencial de frenado es  $1.43 \text{ V}$ . Calcular la nueva longitud de onda y la función de trabajo del metal.

Respuesta:  $\lambda = 3.82 \times 10^{-7} \text{ m}$ ;  $W = 1.82 \text{ eV}$ .

2.4.- ¿Qué tan efectivo es un cuerpo negro a una temperatura de  $500 \text{ K}$ , para producir fotoelectrones en un metal cuya función de trabajo  $W = 0.214 \text{ eV}$ ?

### Efecto Compton

1.- Un fotón de 60 keV incide sobre un electrón libre. Encontrar la máxima energía que puede tener el fotón dispersado, y su longitud de onda.

2.- Radiación de  $1 \text{ \AA}$  hace dispersión Compton con una placa de Carbón. La radiación dispersada se observa en una dirección perpendicular a la incidente.

2.1.- ¿Cuánto vale la longitud de onda dispersada?

2.2.- ¿Cuánto vale la energía cinética del electrón

2.3.- ¿A qué ángulo se dispersa el electrón?

3.- Rayos X de 0.24 nm son dispersados (Compton) y se observa el rayo dispersado a  $60^\circ$  relativos al rayo incidente. Encontrar:

3.1.- la longitud de onda de los rayos X dispersados

3.2.- la energía de los fotones dispersados

3.3.- la energía cinética de los electrones dispersados

4.- el ángulo de dispersión de los electrones.

Los rayos X con longitud de onda  $\lambda$  y energía  $E$  son dispersados elásticamente por electrones libres (de masa  $m_e$ ) que están inicialmente en reposo. Se

observan fotones dispersados con una longitud de onda  $\lambda'$  (y energía  $E_0$ ).

La energía cinética máxima que pueden tener los electrones  $K_{\max}$  es:

a)  $\frac{2E}{m_e c^2 + 2E}$       b)  $\frac{m_e c^2 + 2E}{2E^2}$       c)  $\frac{hc}{\lambda - \lambda'}$       d)  $\frac{hc}{\lambda - \lambda'}$       d) Ninguna de las anteriores.

5.- Calcular el ángulo con que se dispersa un fotón de 20 MeV por un electrón libre, si pierde un 10% de su energía inicial (Respuesta:  $44.29^\circ$ )