

# Efecto Compton

Manuel Amorín - Ezequiel Biagetti - Mateo Muñoz

Física Moderna

Facultad de Ciencias, UdelaR

# Índice

<b>1. Contexto y relevancia histórica</b>	<b>3</b>
<b>2. ¿Qué es el Efecto Compton?</b>	<b>3</b>
<b>3. Inconsistencias con el electromagnetismo clásico.</b>	<b>3</b>
<b>4. Experimento</b>	<b>4</b>
<b>5. Explicación y análisis de resultados</b>	<b>6</b>
5.1. Estudio cualitativo. . . . .	6
5.2. Estudio cuantitativo. . . . .	6
5.3. Análisis de resultados. . . . .	8
5.4. Aplicaciones. . . . .	8
5.5. Conclusiones y consecuencias. . . . .	8

## 1. Contexto y relevancia histórica

El Efecto Compton es una de las interacciones más importantes entre fotones y materia, junto con el efecto fotoeléctrico y la creación de pares. Es un fenómeno descrito y estudiado por el físico inglés Arthur Compton en 1923, a quien le fue posible explicarlo utilizando argumentos cuánticos (radiación electromagnética se propaga mediante cuantos de energía, llamados fotones) y relativistas. El descubrimiento y la observación del efecto son sumamente importantes, ya que terminan de demostrar la naturaleza corpuscular y cuántica de la luz tras los estudios del cuerpo negro de Planck, y la explicación del Efecto Fotoeléctrico de Albert Einstein. Compton ganaría en 1927 el Premio Nobel de la Física por este descubrimiento.

## 2. ¿Qué es el Efecto Compton?

El Efecto Compton es uno de los fenómenos en los cuales se evidencia la naturaleza corpuscular de la luz. Éste consiste en el aumento de la longitud de onda (disminución de frecuencia) de un fotón cuando choca con un electrón libre (electrones más exteriores y por lo tanto ligados más débilmente de un átomo) y pierde parte de su energía. La variación de longitud de onda  $\Delta\lambda$  resultante de la radiación dispersada depende sólo del ángulo de dispersión, y se denomina Corrimiento de Compton. La presencia de una longitud de onda diferente a la de la radiación incidente en la radiación dispersada no puede explicarse si se considera a los rayos X como una onda electromagnética clásica.

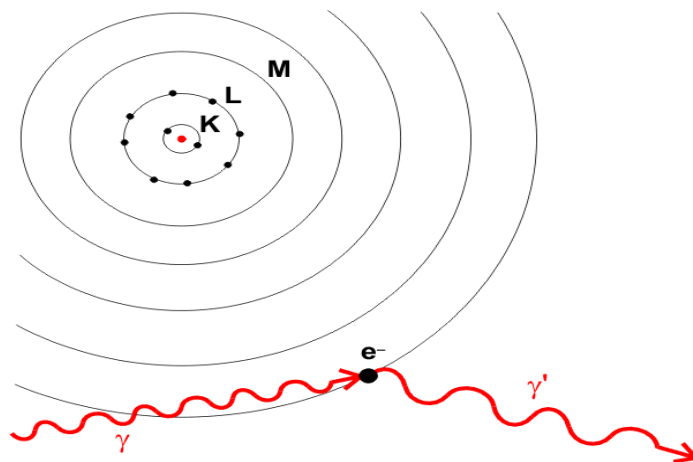


Figura 1: Diagrama del Efecto Compton. El fotón incidente choca con un electrón y es dispersado con menor longitud de onda.

## 3. Inconsistencias con el electromagnetismo clásico.

Según el electromagnetismo clásico, el campo eléctrico de la onda incidente oscila con frecuencia  $\nu$ . Este campo actúa sobre los electrones libres del átomo blanco y los fuerza a oscilar con esa frecuencia. Entonces, los electrones oscilantes irradiarían en todas direcciones ondas de frecuencia  $\nu$ . Compton interpretó esta inconsistencia suponiendo que existen partículas que componen a la radiación, llamadas fotones, que tienen una energía igual a  $h\nu$  y chocan contra los electrones libres del blanco.

## 4. Experimento

El experimento consta de un haz de rayos X con longitud de onda  $\lambda$  que incide sobre un blanco de carbono. Se utilizaron rayos X específicamente, puesto que la energía de estos rayos es mayor a la energía de enlace de los electrones libres. Al incidir los rayos sobre el objetivo, Compton observó que los rayos se dispersaban en distintas direcciones, con un ángulo  $\phi$  respecto al rayo incidente. Con un detector, Compton midió la energía de los rayos dispersados, y observó que su longitud de onda  $\lambda'$  era menor que la de los rayos incidentes, es decir, había un cambio  $\Delta\lambda$  en la longitud de onda de los rayos X.

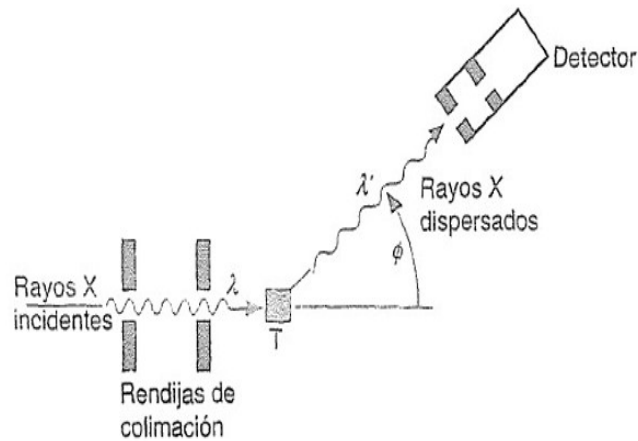


Figura 2: Diagrama del experimento.

Más aún, para diferentes valores del ángulo de dispersión  $\phi$ , se medían diferentes valores de  $\lambda'$ , y por lo tanto, de  $\Delta\lambda$ . Al observar los resultados de longitudes de onda de los rayos dispersados, se observaron dos picos, uno en la longitud  $\lambda'$ , y otro en la longitud  $\lambda$ . Estos fenómenos serán explicados más adelante.

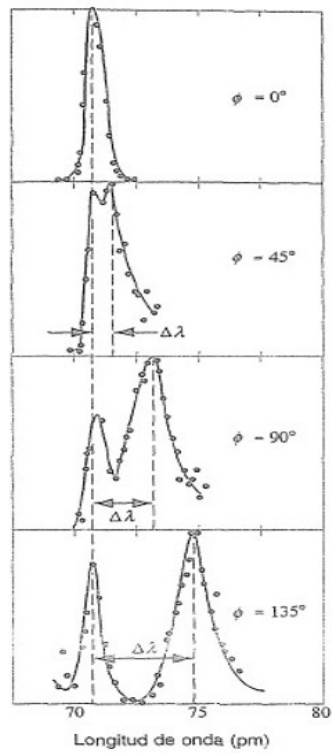


Figura 3: Resultados del experimento en función del ángulo de dispersión.

## 5. Explicación y análisis de resultados

### 5.1. Estudio cualitativo.

Compton derivó las expresiones para el cálculo de  $\Delta\lambda$  modelando la interacción del rayo y el electrón libre como una colisión entre dos partículas.

Cuando el fotón colisiona con el electrón libre, éste le cede parte de su energía  $E$ . Por lo tanto el fotón dispersado tiene menos energía que el fotón incidente. Si llamamos  $E'$  a la energía del fotón dispersado, tenemos que :

$$E' < E \quad (1)$$

Además, sabemos que:

$$E' = h\nu' \quad , \quad E = h\nu \quad (2)$$

Siendo  $\nu$  la frecuencia del fotón incidente,  $\nu'$  la frecuencia del fotón dispersado, y  $h$  la constante de Planck. Entonces sabemos que se cumple:

$$\nu' < \nu \quad (3)$$

Y por lo tanto:

$$\frac{1}{\lambda'} < \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

Que es lo mismo que:

$$\lambda' > \lambda \quad (5)$$

### 5.2. Estudio cuantitativo.

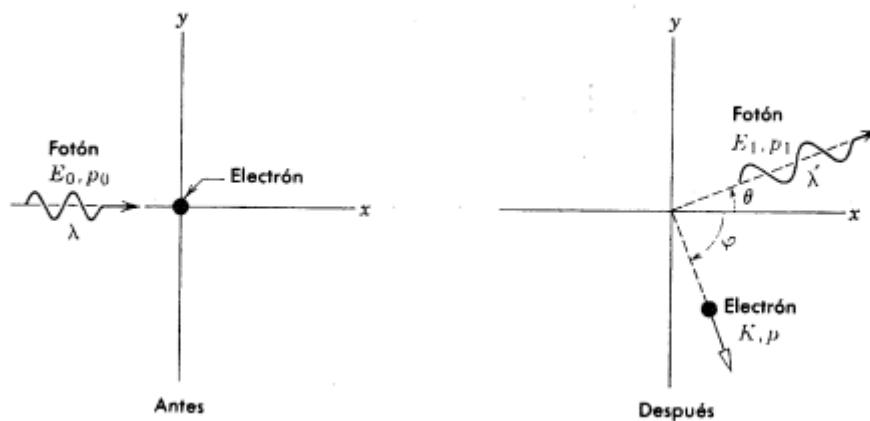


Figura 4: Interpretación de Compton. Un fotón de longitud de onda  $\lambda$  incide sobre un electrón libre en reposo y es dispersado con una longitud de onda  $\lambda'$  y un ángulo  $\theta$ , mientras que el electrón emerge con un ángulo  $\phi$ . *Resnick & Eisberg. Física Cuántica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas (1994 novena edición).*

Planteando la conservación del momento lineal para las coordenadas x,y respectivamente:

$$\begin{aligned} p_\lambda &= p_{\lambda'} \cos \theta + p_e \cos \phi \\ 0 &= p_{\lambda'} \sin \theta - p_0 \sin \phi \\ p_{\lambda'} \sin \theta &= p_0 \sin \phi \end{aligned}$$

Escribiendo la primera igualdad en función de  $p_e \cos \theta$ , elevando al cuadrado las dos ecuaciones y sumando, se obtiene que

$$(p_\lambda - p_{\lambda'} \cos \theta)^2 + p_{\lambda'}^2 \sin^2 \theta = p_e^2$$

Desarrollando los cuadrados

$$p_\lambda^2 + p_{\lambda'}^2 - 2p_\lambda p_{\lambda'} \cos \theta = p^2 \quad (6)$$

Paralelamente, al ser un choque elástico, la conservación de la energía requiere que

$$E_\lambda + E_{e_0} = E_{\lambda'} + E_e$$

Podemos escribir  $E_e$  como  $E_{e_0} + K$ . De esta forma

$$K = E_\lambda - E_{\lambda'} = c(p_\lambda - p_{\lambda'}) \quad (7)$$

Por otro lado, la energía relativista puede ser relacionada con su momento lineal y su masa en reposo  $m_0$  bajo la siguiente expresión:

$$E_e^2 = c^2 p^2 + (m_0 c^2)^2 \quad (8)$$

Si en la ecuación 8 escribimos  $K + m_0 c^2$  en lugar de  $E$  se obtiene que

$$\frac{K^2}{c^2} + 2K m_0 = p^2$$

Introduciendo la expresión de  $K$  escrita en la ecuación 7 y evaluando en 6, obtenemos lo siguiente:

$$m_0 c (p_\lambda - p_{\lambda'}) = p_\lambda p_{\lambda'} (1 - \cos \theta)$$

Que se puede escribir también como

$$\frac{1}{p_{\lambda'}} - \frac{1}{p_\lambda} = \frac{1}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

Multiplicando por la constante de Planck ( $h$ ) en ambos lados de la ecuación, es que se obtiene la ecuación de Compton.

$$\Delta \lambda = \lambda_C (1 - \cos \theta)$$

Siendo  $\lambda_C$  la denominada *Longitud de onda de Compton*.

$$\lambda_C \equiv \frac{h}{m_0 c} = 0.0243 \text{ \AA}$$

### 5.3. Análisis de resultados.

-La cantidad:

$$\frac{h}{mc}$$

tiene unidades de longitud, y se denomina longitud de onda de Compton.

Es importante observar que el lado derecho de la igualdad de la ecuación de Compton no depende de la longitud de onda del fotón incidente. Esto es importante, ya que implica que la cantidad  $\Delta\lambda$  es la misma para diferentes tipos de radiación electromagnética, como la luz visible (con una longitud de onda de aproximadamente 500nm) o los rayos X (con una longitud de onda de aproximadamente 70pm). No obstante, es importante recalcar que el cambio fraccional de longitud de onda:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

es mucho mayor con los rayos X que con la luz visible, aproximadamente 70000 veces mayor, haciendo a este efecto especialmente fácil de observar al utilizar este tipo de radiación.

-El pico de intensidad de cambio mínimo de la longitud de onda se da por la interacción de los rayos X con electrones más fuertemente ligados al núcleo. Cuando esto ocurre, la masa de la ecuación deja de ser la masa del electrón y pasa a ser la masa del núcleo, que es unas 22000 veces mayor. Por lo tanto el corrimiento de Compton resulta insignificante en ese caso.

### 5.4. Aplicaciones.

- En radioterapia se irradia células tumorales para generar ciertos daños en su ADN, ionizando este último. El efecto Compton es el mecanismo más común de ionización del tejido vivo.

- En astrofísica se puede estudiar el efecto inverso, es decir cuando los electrones libres dispersan los fotones, adquiriendo estos últimos una mayor energía, y por tanto, corriendo el pico de intensidad hacia el azul. En particular, se puede determinar la distancia a cúmulos de galaxias y medir la constante de Hubble (BUSCAR Efecto Siunyáiev-Zeldóvich).

### 5.5. Conclusiones y consecuencias.

-Existencia del fotón: Este experimento y sus resultados demuestran invariablemente la existencia del fotón, ya que sus resultados son totalmente inconsistentes con el electromagnetismo clásico, teniendo la fuerte implicancia de que la luz se comporta como una partícula.

-Dualidad onda corpúsculo: Al tener este experimento como prueba, se hace imposible de explicar la luz como un fenómeno únicamente ondulatorio. Se convence a la comunidad científica de la existencia de objetos llamados fotones, cuya energía es proporcional a su frecuencia, y que la luz se tiene propiedades tanto corpusculares como ondulatorias.