

GENERALIZACIÓN DEL EFECTO COMPTON

GENERALIZED COMPTON EFFECT

R.T. Mainardi*

Facultad de Matemática, Astronomía y Física (FaMAF) –Universidad Nacional de Córdoba-
Ciudad Universitaria – 5000 Córdoba - Argentina
e-mail: mainardi@famaf.unc.edu.ar

La existencia del efecto Compton fue demostrada experimentalmente en 1920 en colisiones entre fotones de rayos x, con energías del orden de los keV, y electrones de conducción con energías de unos pocos eV, y durante muchos años se consideró solo el caso en el que la energía del fotón era mayor que la del electrón.

A partir de las ecuaciones de conservación de energía y momento (caso relativístico) se plantea el caso general de transferencia de energía entre fotones y electrones (o entre fotones y cualquier partícula cargada eléctricamente) como el efecto Compton generalizado, el que incluye en una única descripción a los efectos Compton directo e inverso.

Los ejemplos de su ocurrencia en distintos escenarios (laboratorios, universo, etc.) se presentan para distintas regiones de energías de fotones y electrones e ilustran la importancia de este efecto. Por ejemplo en la generación de fotones gama de altísima energía (del orden de los GeV) como los existentes en la radiación cósmica; para experimentos de reacciones fotonucleares o para la generación de haces de rayos x con características muy similares a la luz láser: alta intensidad y colimación y altos grados de monocromaticidad y polarización

Palabras Claves: electrones, fotones, efecto Compton.

The Compton effect was demonstrated experimentally in 1920 in the collision of x-ray photons, with energies around several kilo electron volts (keV), and conduction electrons with energies of a few electron volts (eV) and for several years it was considered only the case in which the energy of the photon was greater than that of the electron.

Starting with the equations of energy and momentum conservation (relativistically) the general case of transference of energy between photons and electrons (or for that matter between photons and any charged particle) can be considered as the generalized Compton effect since the derived equation has the direct (or classical) and indirect Compton effects in a unified description.

Examples of Compton effect occurrence in several circumstances (in the universe, in the laboratory, etc) are presented for regions of photons and electrons energies to show the importance of this effect. Examples are the generation of high energy gamma photons (around GeV's) as the observed in cosmic radiation; the experiments of photonuclear reactions or the conversion of laser photons in x-ray photons with similar properties such as high intensity and collimation and high degrees of monochromaticity and polarization.

Key Words: electrons, photons, Compton effect.

I. INTRODUCCIÓN

La radiación sincrotrón es producida en aceleradores circulares de electrones, en los que estos giran con energías ultra-relativísticas emitiendo radiación de frenado o "bremsstrahlung". Estos laboratorios de luz sincrotrón han adquirido gran importancia y sus instalaciones requirieron de enormes inversiones y muchos años para completarlas, encontrándose las mismas en países como Japón, EEUU, Alemania, Francia, Brasil, etc. La radiación así producida se utiliza en investigaciones en áreas como la química (cinética de reacciones rápidas), en biología (estructura de ADN), en ciencias de materiales (estructura cristalina de diversos materiales), en medicina (tratamientos de diagnóstico y terapia), etc. Desde hace unos años en varios países se han comenzado a construir instalaciones con presupuestos más moderados ya que utilizan aceleradores de electrones de baja energía, en comparación con los de luz sincrotrón. Estos electrones

en colisiones con haces de láseres intensos, generalmente pulsados, permite producir haces de rayos x con propiedades similares a la radiación sincrotrón por medio del denominado efecto Compton inverso⁽¹⁾.

Los rayos-x y gamma interactúan con electrones de bajas energías (como los electrones de conducción en metales) dispersándose inelásticamente y transfiriendo parte de su energía a dichos electrones. Compton en los EEUU y P. Debye en Alemania predijeron, casi simultáneamente y en forma independiente, la ocurrencia de este proceso alrededor de 1920. Sin embargo, debido a la importante verificación experimental que realizó el primero de los nombrados, dicho efecto lleva su nombre y por ello recibió el premio Nobel.

Durante muchos años solo se consideró la existencia de transferencia de energía de un fotón a un electrón y con la aparición de los detectores de radiaciones dispersivos en energías, con los que se detectaban rayos gamma

* CONICET

provenientes de decaimientos nucleares, se extendió el rango de observación del efecto Compton a energías de algunos mega-electron-volts (MeV), con lo que se explicaba la forma del espectro detectado con dichos detectores. Fue recién en 1948 en que se especuló con la posibilidad de la transferencia inversa de energía, esto es del electrón al fotón, para poder explicar la existencia de fotones de energías muy altas en la radiación cósmica primaria⁽²⁾ y recién en 1965 se adoptó la denominación de “Compton inverso”⁽³⁾. Todavía debieron pasar casi veinte años más para que se utilizara este concepto en la producción de rayos gamma en aceleradores de electrones de alta energía⁽⁴⁾. Con estos rayos gamma se realizaron experimentos de física nuclear aportando valiosísima información sobre la estructura del núcleo y la existencia del efecto Compton nuclear en la colisión de dichos fotones gamma con protones del núcleo. También permitió observar este efecto con partículas alfa y comprobar que dichas partículas existen como entidades estables en núcleos pesados⁽⁵⁾.

Es preciso resaltar que en dichos experimentos con aceleradores de electrones se utilizaron fotones de baja energía (provenientes de láseres de alta potencia) por lo que se comenzó a denominar como “efecto Compton inverso” las colisiones en las que se producían los fotones gamma, con los que a su vez se bombardeaban los núcleos. Pero debemos resaltar una vez más, que en dichos bombardeos de los núcleos, el efecto predominante era el efecto Compton “directo”. Finalmente mencionemos que el haz de rayos gamma producido hereda las propiedades de intensidad, monocromaticidad, polarización y colimación del haz láser, lo que permitió realizar estudios detallados de la estructura nuclear con estos fotones.

En los últimos años se ha extendido el estudio y la construcción de los así llamados “table top synchrotron radiation sources”, ya que con un pequeño acelerador de electrones y un láser de alta potencia se obtienen haces de rayos x de características similares y en muchos casos superadoras de los haces de radiación sincrotrón obtenidos en aceleradores de electrones de alta energía. Debemos resaltar, también, que un “sincrotrón de mesa”, tiene un costo de instalación y operación muchas veces inferior al de un laboratorio de luz sincrotrón. La generación de haz de rayos x de energías entre 10 y 100keV, para ser usados en una amplia gama de aplicaciones en las que una alta intensidad y altos grados de monocromaticidad y colimación, son propiedades importantes que permiten asegurar calidad de imagen, reducción de dosis y mejora en los tratamientos médicos con radiaciones, así como en estudios básicos de materia condensada, entre otros..

Para terminar, podemos decir que como alternativa al tubo de rayos x convencional, existen hoy en día tres mecanismos principales para la generación de haces intensos de rayos x de características especiales:

- Radiación sincrotrón
- Láseres de electrones libres (wigglers y undulators)
- Efecto Compton inverso.

II. GENERALIZACIÓN DEL EFECTO COMPTON.

Derivación de la ecuación en el caso general

Es un relativamente simple ejercicio de mecánica el plantear las ecuaciones de cinemática relativística de conservación de energía y momento para el caso del choque de un electrón con un fotón. El resultado de resolver esas ecuaciones es el siguiente⁽⁶⁾:

$$\frac{h\nu'}{h\nu} = \frac{1 + \beta \cos \alpha}{1 - \beta \cos \theta + \frac{h\nu \cdot [1 + \cos(\alpha - \theta)]}{m_e c^2}} \quad (1)$$

en donde $h\nu$ en la energía del fotón incidente, $h\nu'$ es la energía del fotón dispersado, β es la velocidad relativa del electrón con respecto a la velocidad de la luz, p_i y p_f son los momentos inicial y final del electrón, y θ es el ángulo de dispersión del electrón (ver figura 1).

Para el caso de electrones no relativistas ($\beta \rightarrow 0$), la ecuación (1) se convierte en la más conocida para el efecto Compton:

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

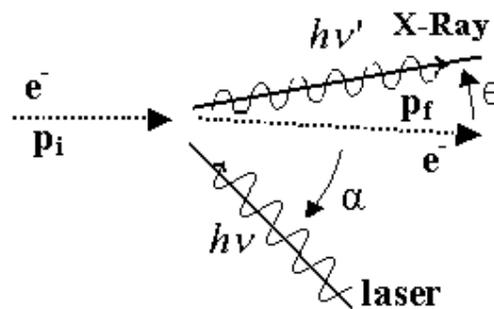


Figura 1. Compton generalizado.

Podemos apreciar la utilidad de la ecuación (1) con un par de ejemplos que están íntimamente relacionados a las múltiples aplicaciones del efecto Compton inverso.

Ejemplo 1. El haz de fotones incidente y el de electrones son colineales. El electrón viene de la derecha y el fotón viene de la izquierda. Después de la colisión el fotón va hacia la izquierda. Por lo tanto $\alpha = 0$ y $\theta = 0$ en la ecuación 1. Si los electrones incidentes tienen energías cinéticas muy grandes, tal que $m_e c^2 \gg h\nu$, la energía del fotón dispersado será:

$$h\nu' \approx (1 + \beta).h\nu / (1 - \beta) = 4.\gamma^2.h\nu$$

en donde $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$.

Si $\gamma=41$ ($E_e=20\text{MeV}$) y $h\nu=1,9\text{eV}$ (láser de luz roja), $h\nu'\approx 13\text{keV}$. Ya existen en el mercado internacional láseres de luz violeta en los que $h\nu>5\text{eV}$ con lo que se podrían obtener rayos x superiores a los 30keV .

Ejemplo 2. El electrón incidente colisiona al fotón de costado, esto es: $\alpha = 90$ y $\theta = 0$. Nuevamente si la energía del electrón es muy grande será:

$$h\nu' \approx 2 \cdot \gamma^2 \cdot h\nu$$

con lo que vemos que las energías de los fotones obtenidos se reducen a la mitad con respecto al caso anterior. Este arreglo, aunque menos eficiente en la producción de fotones de alta energía, tiene la ventaja sobre el ejemplo anterior en que el haz de rayos x emergente no se lleva por delante el láser de luz en su camino de salida.

Sección eficaz diferencial de Klein-Nishina

En lo que sigue, haremos una breve mención a la colimación del haz producido, ya que considerar la polarización del mismo, excede los límites de esta nota. La ecuación de Klein-Nishina es la que nos permite calcular la sección eficaz de dispersión Compton y tiene validez tanto para electrones lentos como para relativísticos. Con esta ecuación podemos calcular la apertura del haz de rayos x sobre la base de la sección eficaz del proceso, el que ha sido tratado en profundidad por Evans⁽⁷⁾.

Si $E_e \gg m_0 c^2$ la sección eficaz está dada por la expresión de Klein-Nishina:

$$\frac{d\sigma_{KN}}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_0^2 \frac{(v')^2}{v^2} \left(\frac{v'}{v} + \frac{v}{v'} - \sin^2 \theta \right)$$

en donde r_0 es el radio clásico del electrón.

En la figura 2, hemos graficado resultados de nuestros cálculos de la distribución angular de la intensidad del haz de fotones de rayos x. La apertura del haz está dada aproximadamente por la expresión: $\theta \approx \gamma^2$, como ha sido calculada por algunos autores⁽⁶⁾

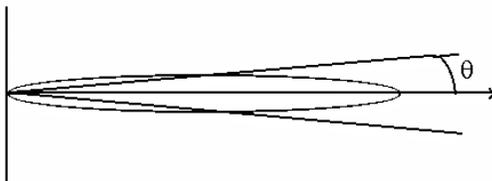


Figura 2. Distribución angular de la intensidad del haz de rayos emitidos en la dirección "hacia delante", correspondiente a la dirección de incidencia del haz de electrones.

Con lo considerado hasta el momento podemos concluir que el efecto Compton es ni más ni menos que la colisión de un fotón con un electrón independientemente de la energía que ellos posean. En la figura 3 hemos pretendido ejemplificar como, en un rango de energía de 24 órdenes de magnitud, podemos considerar las colisiones de electrones en laboratorios de análisis de materiales (fluorescencia de rayos x), en aceleradores de electrones de baja y alta energía y en experimentos de fotofísica nuclear para estudiar la estructura de diversos tipos de núcleos.

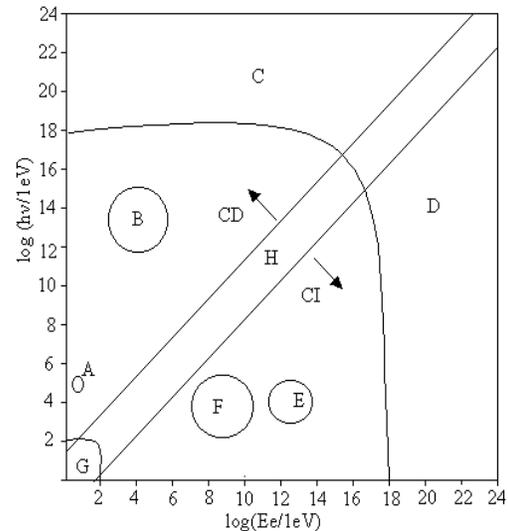


Figura 3. Efecto Compton Generalizado

En la figura 3 se muestra esquemáticamente las regiones en las que el efecto Compton tiene sus efectos más notables. Sería necesario una figura en cuatro dimensiones para tener en cuenta las variables en juego: las energías iniciales y finales del electrón y del fotón, pero solo representaremos las energías iniciales del fotón y el electrón y en las regiones delimitadas en la figura haremos mención a los efectos sobre los fotones o electrones emergentes.

La región denominada "A" contiene los rangos de energías de los fotones y electrones con los que A.H. Compton descubrió el efecto que lleva su nombre. La región "B" es en la que se realizaron y realizan los experimentos de "Compton nuclear", incluyendo la dispersión Compton con los quarks. En las zonas "C" y "D" ocurren los procesos a escala del universo, en las que se producen tanto fotones como electrones de las máximas energías. Las zonas "E" y "F" se realizan los denominados experimentos Compton inverso de alta y baja energía respectivamente. En la zona "G" los efectos de las colisiones Compton son inobservables y a lo largo de la diagonal "H", fotones y electrones tienen aproximadamente la misma energía y la transferencia de energía de unos a otros es pequeña. La flecha superior señala la región en donde ocurre el denominado efecto Compton directo (CD). La flecha inferior, la zona en la que es predominante el efecto Compton inverso (CI).

