

DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS

Tema 1: La Luz

Lluís Prat Viñas

Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Telecomunicació de
Barcelona (ETSETB)

Universitat Politècnica de Catalunya

1.- La luz

- 1.1.- Naturaleza de la luz: de Huygens a Einstein
- 1.2.- El espectro electromagnético
- 1.3.- Naturaleza ondulatoria de la luz
- 1.4.- Fenómenos ondulatorios de la luz
- 1.5.- Naturaleza corpuscular de la luz
- 1.6.- Fenómenos corpusculares
- 1.7.- Dualidad onda corpúsculo en la luz. El fotón

1.1.- NATURALEZA DE LA LUZ: DE HUYGENS A EINSTEIN

La naturaleza de la luz ha sido un tema de reflexión de todas las civilizaciones humanas: Griega, India, Árabe, Entre las teorías científicas más modernas ha habido un debate permanente entre la **naturaleza ondulatoria o corpuscular de la luz**. Entre ellas destacan:

Christian Huygens propuso en 1678 que la luz era un fenómeno **ondulatorio** que se propagaba en un medio material denominado **éter**.

Isaac Newton publicó en 1704 su teoría **corpuscular** afirmando que la luz estaba formada por pequeñas partículas que se desplazaban en línea recta. Explicaba erróneamente la propiedad de la refracción de la luz suponiendo que en un medio denso la luz viajaba a mayor velocidad que en el vacío. La comunidad científica la aceptó por su prestigio científico.

James Maxwell recogiendo la propuesta de Faraday demostró en 1864 que la luz era una **onda electromagnética** de alta frecuencia, que se autopropagaba sin necesidad de éter. Antes, Thomas Young demostró en 1801 que los diagramas de interferencia exigían que la luz fuera una onda. La medición de la velocidad de la luz también descartó la teoría corpuscular.

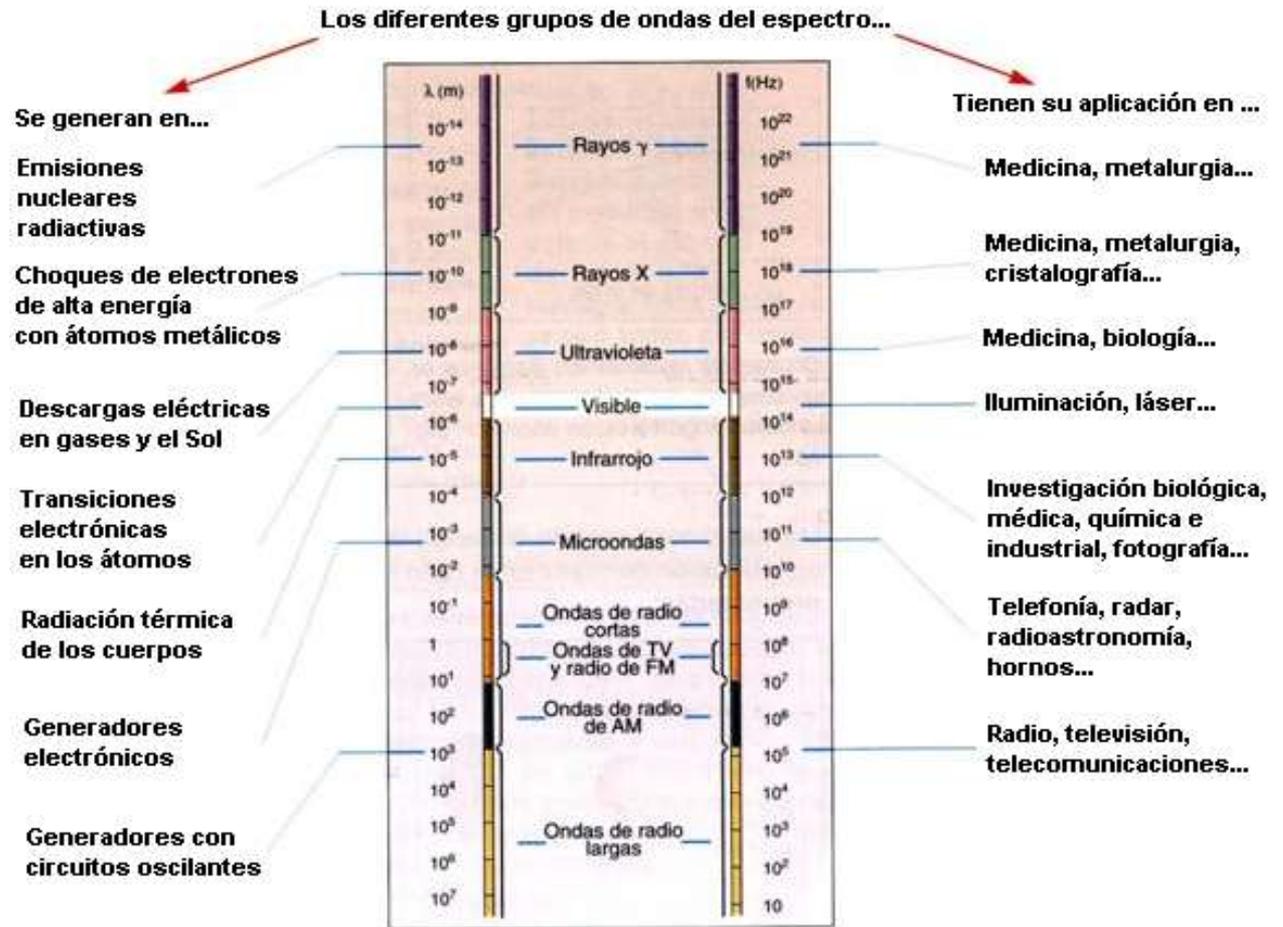
Albert Einstein al explicar en 1905 el efecto fotoeléctrico demuestra la **dualidad onda-partícula** de la luz: se propaga como una onda e interacciona con la materia como una partícula.

1.2.- EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Clasificación de las ondas electromagnéticas según su frecuencia o longitud de onda.

Relación entre la frecuencia y la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$



1.2.1.- LA LUZ VISIBLE

La luz visible (ondas electromagnéticas detectadas por el ojo humano) se extienden (en nanómetros) desde 290 hasta 770:

Violeta: 290 - 455

Azul: 455- 492

Verde: 492 – 577

Amarillo: 577 – 597

Naranja: 597 – 622

Rojo: 622 – 770

La sensibilidad del ojo humano es máxima para el verde y decae rápidamente como indica la figura.

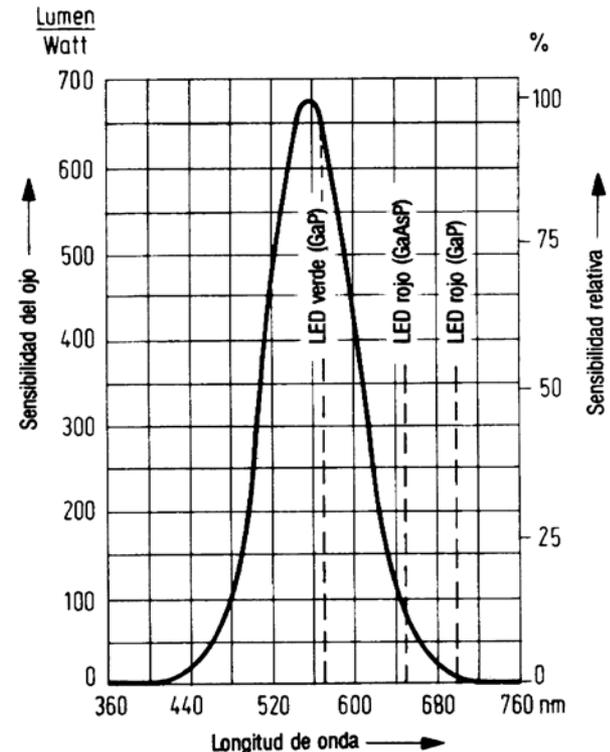
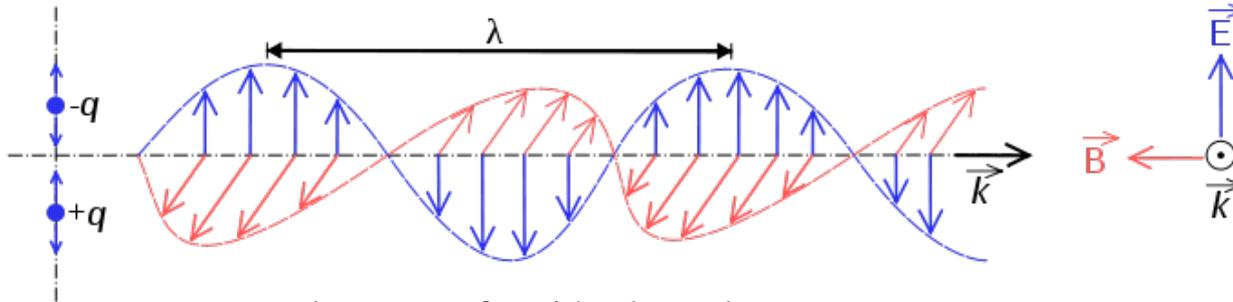


Figura 36
Curva de sensibilidad del ojo humano (V_{λ})

1.3.- NATURALEZA ONDULATORIA DE LA LUZ

La luz es una onda electromagnética consistente en un campo eléctrico y un campo magnético variables en el tiempo, perpendiculares entre si y a la dirección de propagación.



Ambos campos responden a una función de onda:

$$y = A \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$$

A = amplitud

k = vector o número de onda

$\lambda = 2\pi/k =$ longitud de onda

$\omega =$ frecuencia angular

$f = \omega/2\pi =$ frecuencia cíclica

$T = 1/f = 2\pi/\omega =$ período

v = velocidad de propagación = $\lambda \cdot f$

1.4.- FENÓMENOS ONDULATORIOS DE LA LUZ

a) Velocidad de propagación de la luz

La teoría electromagnética muestra que la velocidad de propagación es: $v = 1 / \sqrt{\epsilon\mu}$
 siendo ϵ = permitividad eléctrica y μ = permeabilidad magnética del medio de propagación.

En el vacío:

$$v = c = [\sqrt{\epsilon_0\mu_0}]^{-1} = 299.792 \text{ km} / \text{s} \cong 300.000 \text{ km} / \text{s}$$

La velocidad de propagación en un medio material es:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}$$

Siendo n = índice de refracción del medio ($n = (\epsilon_r\mu_r)^{1/2} > 1$) y ϵ_r , μ_r constantes relativas de permitividad y permeabilidad del medio.

Material	$\lambda = 0.4 \mu\text{m}$	$\lambda = 0.7 \mu\text{m}$	Material	$\lambda = 0.4 \mu\text{m}$	$\lambda = 0.7 \mu\text{m}$
<u>GaAs</u>	4.373	3.755	SiO₂	1.470	1.455
Si	5.570	3.787	Si₃N₄	2.072	2.013

b).- Refracción y reflexión de un haz de luz

Cuando un haz de luz incide sobre la superficie que separa dos medios con índices de refracción distintos, formando un ángulo θ_i respecto a la perpendicular del plano de separación de los medios (ángulo de incidencia), una parte del haz se transmite al otro medio (rayo refractado) mientras que la otra parte se reenvía al mismo medio (rayo reflejado).

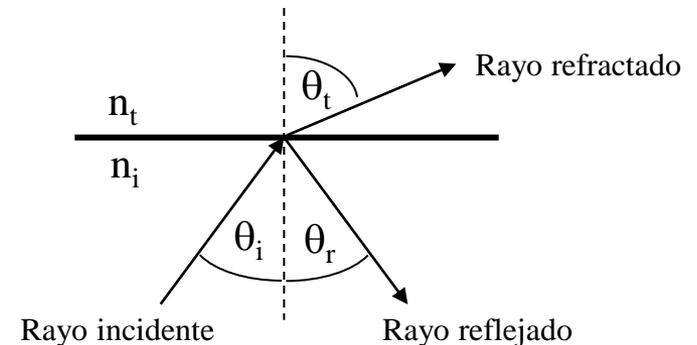
Las relaciones entre las direcciones de estos rayos obedecen a las siguientes leyes:

Ley de reflexión: $\theta_i = \theta_r$: el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

Ley de refracción o ley de Snell: entre el ángulo de incidencia y el de refracción se cumple:

$$n_i \cdot \text{sen} \theta_i = n_t \cdot \text{sen} \theta_t \Rightarrow \frac{\text{sen} \theta_i}{\text{sen} \theta_t} = \frac{n_t}{n_i}$$

Notar que si $(n_i/n_t)\text{sen}\theta_i > 1$ no puede existir el rayo refractado y solo hay el rayo reflejado. Se dice que hay reflexión total y es importante en el funcionamiento de las fibras ópticas.



c) Interferencias y superposición de ondas

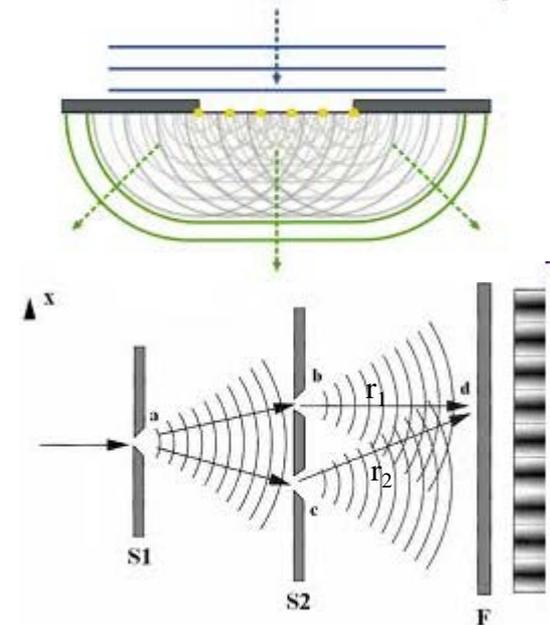
Cuando en un punto determinado coinciden varias ondas, la onda resultante es la que resulta de la suma de las amplitudes de las ondas individuales: superposición de ondas.

Principio de Huygens: cada punto de un frente de ondas es un emisor de ondas esféricas. La envolvente de estas ondas elementales es el nuevo frente de ondas.

Cuando en un punto coinciden dos ondas de la misma frecuencia y de igual amplitud, la onda resultante depende del desfase entre ellas. Si están en fase: interferencia constructiva con el resultado de una onda de amplitud doble. Si están desfasadas 180° : interferencia destructiva y la onda tiene amplitud cero (desaparece la onda).

Rejas de Young: En la pantalla situada en F aparecen franjas iluminadas y franjas oscuras debido a las interferencias constructivas y destructivas. Es un fenómeno específico de las ondas.

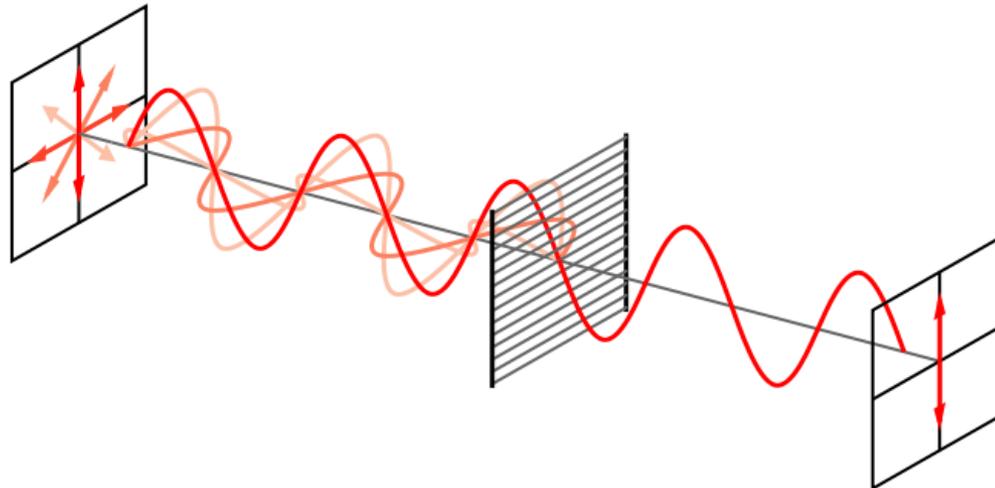
$$E(d) = E_0 \cos(kr_1 - wt) + E_0 \cos(kr_2 - wt) = [2E_0 \cos(k(r_1 - r_2)/2)] \cdot \cos[k(r_1 + r_2)/2 - wt]$$



d) Polarización de la luz

Habitualmente la luz no está polarizada, lo que significa que el campo eléctrico (y el magnético) de la onda electromagnética está formada por ondas que tienen todas las direcciones posibles en el plano perpendicular a la propagación.

Cuando una onda electromagnética atraviesa un medio polarizador la onda saliente solo tiene la dirección fijada por el polarizador.

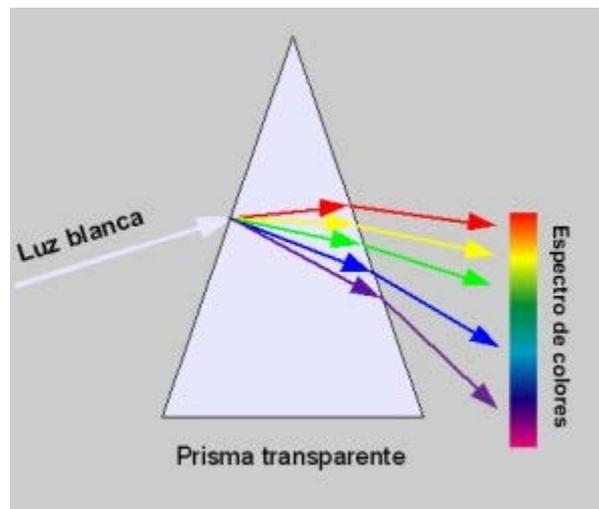


e) **Dispersión de la luz**

La velocidad de propagación en un medio es distinta para cada longitud de onda.

Cuando una luz blanca incide en el plano de separación de dos medios, el ángulo de refracción de cada longitud de onda será diferente al serlo la velocidad de propagación.

En consecuencia, a la salida se puede ver la luz descompuesta en sus componentes elementales.



1.5.- NATURALEZA CORPUSCULAR DE LA LUZ

La luz, en determinados experimentos, se comporta como si estuviera constituida por un chorro de partículas sin carga y sin masa denominados fotones.

La teoría corpuscular de Newton fue abandonada a raíz de los trabajos de Maxwell que permitió demostrar que se trataba de una vibración electromagnética que se propagaba en el vacío sin necesidad del hipotético “éter” propuesto por Huygens.

A finales del siglo XIX algunos experimentos (radiación del cuerpo negro, efecto fotoeléctrico y efecto Compton, presión lumínica) no se podían explicar a partir de la teoría electromagnética y hubo que admitir que la luz también tenía una naturaleza corpuscular.



Isaac Newton



James Clerk Maxwell

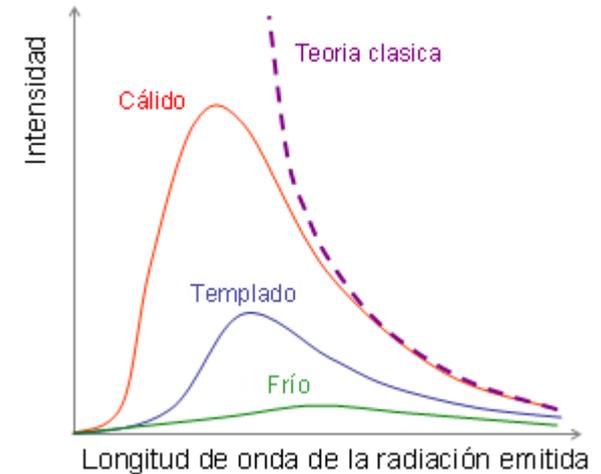
1.6.- FENÓMENOS CORPUSCULARES

a) Radiación del cuerpo negro

El cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe toda la radiación que incide sobre él y que emite la energía captada en forma de radiación electromagnética.

Habia una discrepancia entre los resultados experimentales que aproximaban el cuerpo negro y la teoría electromagnética clásica. Para resolver la contradicción Max Planck postuló el cuanto de energía: en la naturaleza la energía solo se puede intercambiar en paquetes indivisibles llamados cuantos.

Una luz de frecuencia f intercambia energía con la materia en múltiplos enteros del cuanto de energía $E = hf$, con h una constante universal denominada constante de Planck.



$$\text{Ley de Planck: } I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

$$\text{Ley de Wien: } \lambda_{\max} = \frac{0,0028976 \text{ m} \cdot \text{K}}{T}$$

b) Efecto fotoeléctrico

Cuando una luz de frecuencia f ilumina un metal algunos electrones salen despedidos del metal con un energía cinética máxima $E_{c\max}$.

La teoría electromagnética no podía explicar que esta energía fuera independiente de la intensidad de la luz, ni las curvas experimentales obtenidas para distintos metales.

Einstein explicó este fenómeno suponiendo que la luz estaba formada por fotones de energía hf y que la energía cinética máxima era:

$$E_{c\max} = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = hf - W$$

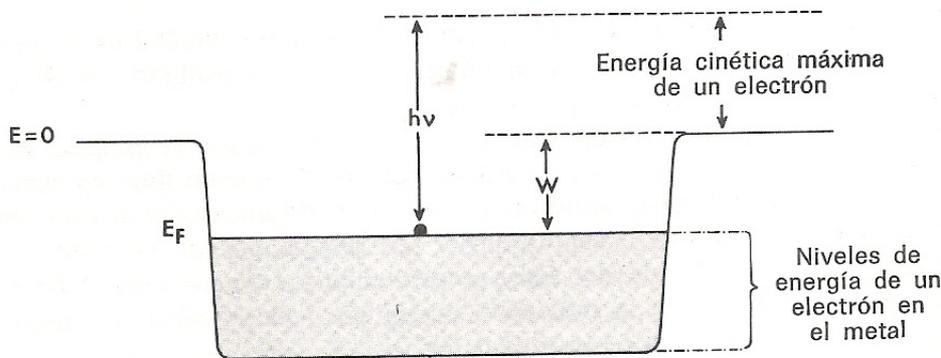
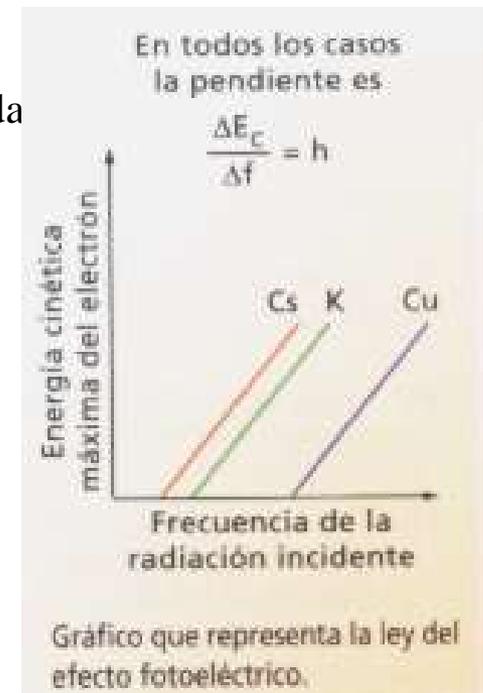
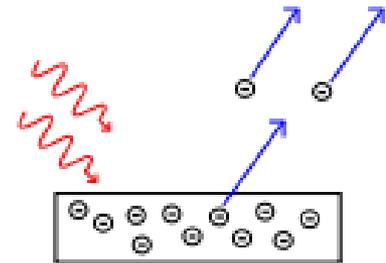


FIGURA 5



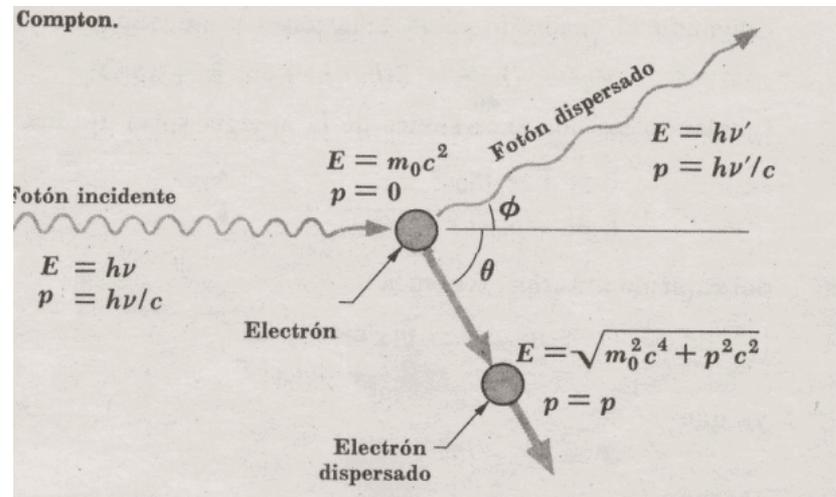
c) Efecto Compton

La colisión de un fotón con un electrón sigue las leyes clásicas de colisión de partículas: se conserva la energía y la cantidad de movimiento:

$$\vec{p}_{fi} + \vec{p}_{ei} = \vec{p}_{ff} + \vec{p}_{ef}$$

$$E_{fi} + E_{ei} = E_{ff} + E_{ef}$$

Compton verificó experimentalmente que el fotón dispersado cambia su longitud de onda (o frecuencia) de acuerdo con las relaciones de conservación de E y p.



1.7.- DUALIDAD ONDA CORPÚSCULO EN LA LUZ

Cuando se propaga, la luz se comporta como una onda electromagnética con parámetros longitud de onda y frecuencia:

$$y = A \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$$

$$\lambda = \text{longitud de onda} = 2\pi/k$$

$$f = \text{frecuencia} = 2\pi/\omega$$

$$v = \text{velocidad de propagación} = \lambda \cdot f$$

Cuando interactúa con la materia la luz se comporta como un flujo de partículas denominadas fotones, con parámetros energía y momento. En la interacción se conserva la energía y el momento:

$$E = hf$$

$$p = h/\lambda = (h/2\pi)k = \hbar k = E/v \text{ (en el vacío } v = c)$$

Notar que cuando el fotón cambia de medio la frecuencia debe mantenerse constante, ya que así lo exige la conservación de la energía. Por el contrario, la longitud de onda debe cambiar ya que $\lambda = v/f$ y la velocidad varía al cambiar de índice de refracción.