La luz

1 de marzo de 2004

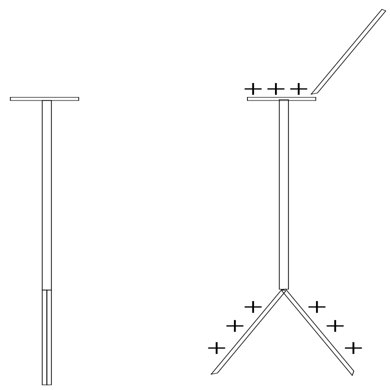
1. Interacción electromagnética

En la Naturaleza hay cuatro interacciones fundamentales: fuerte o nuclear, débil, electromagnética y gravitatoria. En este capítulo repasamos algunos conceptos básicos de la interacción electromagnética.

1.1. Carga eléctrica

La carga es una propiedad básica de la materia. La carga se presenta en dos modalidades, denominadas positiva y negativa. Algunas partículas tienen carga positiva, como el protón o el pion π^+, otras tienen carga negativa, como el electrón o el muon μ^-. También hay partículas que no tienen carga como el neutrón, el neutrino o el fotón. Es un hecho experimental conocido que las cargas del mismo signo se repelen mientras que cargas de distinto signo se atraen.

La existencia de carga eléctrica se puede poner de manifiesto con un electroscópio como el de la figura siguiente. Al acercar una varilla a la placa superior, ésta se carga y, a través de un conductor, también se cargan las dos varillas inferiores que inicialmente estaban en contacto. Al cargarse dichas varillas con el mismo tipo de carga, experimentan una repulsión que hace que las varillas se separen.



Por su comportamiento ante el paso de cargas a su través la materia se clasifica en conductores y aislantes. Los primeros permiten fácilmente el tránsito de cargas por ellos, mientras que los segundo no. Son conductores los metales, el agua salada, etc. En un aislante, en cambio, las cargas se mueven con dificultad como es el caso de la madera.

La unidad SI de la carga eléctrica es el culombio C, que como magnitud derivada equivale a:

$$1\ C = 1\ A \times 1\ s$$

Esta unidad de carga es grande por lo que habitualmente se utilizan submúltiplos como el microculombio ($1\ \mu C = 10^{-6} C$) o el nanoculombio ($1\ nC = 10^{-9} C$).

La carga está cuantizada, es decir, sólo se pueden tener cargas múltiplo de una carga elemental. Esta carga elemental es la del electrón $e = 1{,}6 \times 10^{-19} C$.

1.2. Fuerza eléctrica: ley de Coulomb

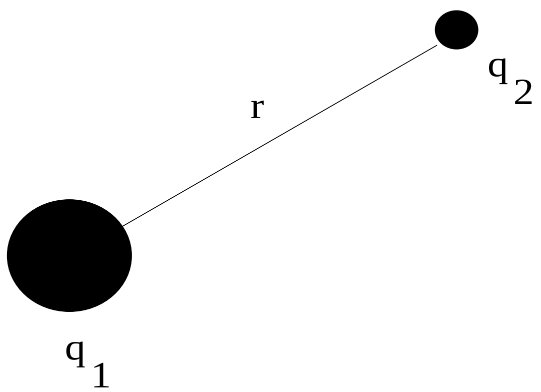
La ley de Colulomb expresa en forma matemática precisa la interacción entre dos cargas q_1 y q_2 cuando están separadas una distancia r. La expresión del modulo de la fuerza de Coulomb es

$$F = K\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

. Esta ecuación se puede utilizar para definir la unidad de carga. 1 C es la magnitud de dos cargas tales que separadas 1 m de distancia experimentan una repulsión de 1 N. La fuerza coulombiana es proporcional a las cargas que interaccionan e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Cuanto más lejos estén las cargas menor será la fuerza con la que interaccionen. La fuerza es una magnitud vectorial, la ecuación anterior sólo nos da el modulo de la fuerza. La dirección de la fuerza es la de la línea que une las cargas y el sentido el que corresponde a que las cargas se alejen si éstas son de igual signo y a que se acerquen si son de signos opuestos. K es una constante característica del electromagnetismo, que en el SI vale:

$$K = 8{,}98755 \cdot 10^9 \ Nm^2C^{-2}$$

para el caso de que las cargas estén en el vacio.



1.2.1. Campo eléctrico

¿Cómo se produce la acción a distancia de una carga sobre la otra? Es decir, ¿cómo se percata una carga de la presencia de otras y sufre como consecuencia la acción de una fuerza?

Clásicamente, se introduce la idea de *campo*. Se dice que la presencia de una carga en un punto produce un campo eléctrico en todos los puntos del espacio y es este campo el que interacciona con otra carga que situemos en algún lugar del espacio. Este efecto es recíproco, la carga q_1 crea un campo que siente q_2 y, de igual modo, la carga q_2 crea un campo que siente q_1. El campo que crea q_1 en un punto no depende de q_2 y a la inversa. Podemos definir el campo que crea q_1 en el punto donde colocamos q_2 por el efecto que produce sobre ésta carga (fuerza):

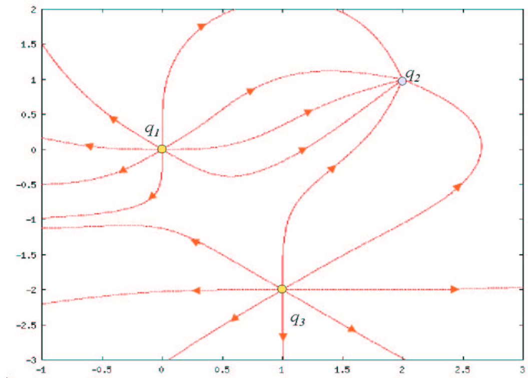
$$E = \frac{F}{q_2} \ .$$

Como E es independiente de q_2, conocido E en un punto sabemos que otra carga q_3 situada en ese mismo punto sentirá una fuerza $F = q_3 \ E$.

En el SI el campo eléctrico se mide en N/C.

El campo eléctrico es una magnitud vectorial. Esto significa que se define no sólo por su módulo, sino que hay que conocer también su dirección y sentido. Por convenio el campo eléctrico $\vec{E}$ en un punto apunta en la dirección y sentido en que se movería una carga positiva al ser situada en ese punto.

El conjunto de trayectorias que seguiría esa carga positiva definen las líneas de campo. En la siguiente figura se muestran las líneas de campo dadas por el sistema de cargas q_1, q_2 y q_3 donde la 1 y la 3 son cargas positivas y la 2 es negativa.



Una carga positiva puesta en en el campo dado por las tres cargas seguiría una trayectoria que la alejara de las cargas positivas y la acercara a la negativa.

1.3. Energía potencial eléctrica

Una carga eléctrica situada en una zona del espacio en la que hay un campo eléctrico sentirá la correspondiente fuerza eléctrica y, por tanto, sufrirá una aceleración, lo que hará que cambie la velocidad de la partícula. Para calcular este cambio debemos saber el campo eléctrico en cada punto del recorrido de la partícula y conocer la aceleración instantánea de la misma en cada punto. Esto es complicado y si uno lo único que necesita saber es el cambio de velocidad de la partícula entre un punto inicial A y un punto final B puede hacer uso del principio de conservación de la energía mecánica. Según este principio *la energía mecánica total se conserva*, y así, el cambio en la energía cinética de la partícula es igual al cambio de energía potencial con signo contrario.

$$\Delta T = -\Delta U \ .$$

Para hacer uso de esta relación necesitamos conocer cuál es la energía potencial de una partícula cargada en el seno de un campo eléctrico. Si el campo eléctrico es constante E, es sencillo. Como en el caso gravitatorio, el origen para la energía potencial es arbitrario. Si tomamos $U = 0$ en la posición inicial de la partícula, la energía potencial de la partícula con carga

q que se ha desplazado una distancia y en el seno de un campo eléctrico constante E es $U = -qEy$.

Veamos otro caso. El valor de la energía potencial de una partícula cargada q en el seno del campo eléctrico creado por otra partícula cargada con carga Q es:

$$U(r) = K\frac{qQ}{r}$$

Aunque para otras distribuciones de carga, la energía potencial eléctrica puede tener una expresión matemática complicada, lo único que necesitamos saber son dos valores de la energía potencial eléctrica: en el punto inicial y final. El cambio de energía potencial nos informa del cambio en la energía cinética.

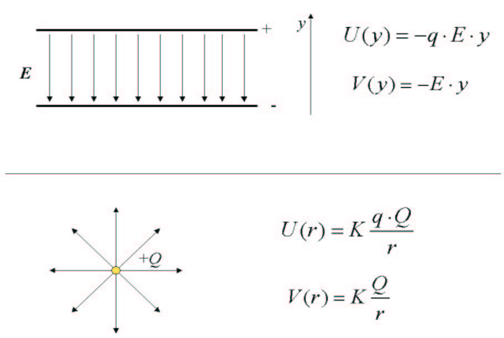
1.3.1. Potencial eléctrico

La energía potencial eléctrica depende de dos aspectos diferentes. Por una parte del punto del espacio en el que colocamos la carga, y, por otro, de la propia carga q. Se define el potencial eléctrico como la parte de la energía potencial eléctrica que sólo depende del punto en el que coloquemos la carga:

$$V(r) = \frac{U(r)}{q}$$

Se mide en voltios: $V = J/C$ y es la energía potencial de una carga unidad.

La distribución de potencial eléctrico puede ser muy complicada. Veamos los dos casos simples anteriores:



En el segundo de los casos se toma $V(\infty) = 0$.

Como ya dijimos, la unidad de carga fundamental es: $e = 1{,}6 \times 10^{-19}C$. Para el tratamiento de átomos, moléculas, etc. la unidad de energía del SI es muy grande y se suele definir una unidad alternativa. Se define la unidad de energía denominada electrón-voltio, eV, como la energía que adquiere una carga e cuando se la somete a una diferencia de potencial de 1 V:

$$1\ eV = e \times 1\ V = 1{,}6 \times 10^{-19}C \times V = 1{,}6 \times 10^{-19}J$$

También se suelen utilizar múltiplos de esta cantidad: $1keV = 10^3\ eV$, $1MeV = 10^6\ eV$, $1GeV = 10^9\ eV$, $1TeV = 10^{12}\ eV$.

1.4. Corriente eléctrica

Un chorro de partículas cargadas recibe el nombre de *corriente eléctrica*. Por razones históricas la dirección de la corriente se toma como la dirección en la que deberían moverse las cargas positivas para dar el transporte de electricidad observado (en realidad las que suelen moverse son las cargas negativas). La magnitud que caracteriza la corriente eléctrica es la intensidad de corriente que es la cantidad de carga que atraviesa una sección transversal de un conductor por unidad de tiempo: $I = \Delta q/\Delta t$.

La unidad de corriente eléctrica es el amperio (A):

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad \left(\frac{C}{s}\right) .$$

1.5. Campo magnético: fuerza de Lorentz

Ya hemos visto que una partícula q_1 cargada siente una fuerza eléctrica debido a la presencia de otra carga q_2 en una zona del espacio. La partícula q_1 siente esa fuerza esté en reposo o en movimiento. Pero, si tanto q_1 como q_2 están en movimiento, q_1 siente además otra fuerza llamada *fuerza magnética*.

Al igual que una carga en reposo crea un campo eléctrico en el espacio, una carga en movimiento crea, además del campo eléctrico, un campo magnético $\vec{B}$. Este campo interacciona con cualquier carga que se mueva en esa zona del espacio. La ley fundamental del magnetismo se debe a Lorentz y es

$$\vec{F} = q_1\ \vec{v} \times \vec{B}\ .$$

Cuando, en presencia de un campo magnético $\vec{B}$, tenemos una carga q_1 que se mueve con una velocidad $\vec{v}$, ésta experimenta una fuerza dada por la relación anterior. Para que haya fuerza de Lorentz hace falta:

- que la partícula se mueva

- que la partícula que se mueve tenga carga
- que en la zona por la que se mueve la partícula haya un campo magnético
- que $\vec{v}$ y $\vec{B}$ no sean paralelos ni antiparalelos.

El producto que aparece en la ecuación de Lorentz ($\times$) es un producto vectorial. La fuerza magnética es máxima si $\vec{v} \perp \vec{B}$ y va dirigida en dirección perpendicular al plano formado por $\vec{v}$ y $\vec{B}$ (regla del sacacorchos de $\vec{v}$ sobre $\vec{B}$ por el camino más corto).

El campo magnético aparece siempre alrededor de cualquier corriente eléctrica o carga en movimiento. Su unidad SI es el tesla (T):

$$1\ T = \frac{N \cdot s}{C \cdot m} \ .$$

Según la fórmula de Lorentz, una partícula cargada en movimiento en el seno de un campo magnético constante $\vec{B}$ siente una fuerza $\vec{F}$ que curva la trayectoria de la carga, pues es perpendicular a $\vec{v}$ y a $\vec{B}$. En el caso de que $\vec{v} \perp \vec{B}$ la trayectoria de la carga es una circunferencia*:

$$F_{mag} = qvB = F_{cent} = ma_c = m\frac{v^2}{R} \Rightarrow mv = p = qRB \ .$$

1.5.1. Fuentes de campo magnético

Los campos magnéticos producen fuerzas sobre cargas en movimiento y las cargas en movimiento dan lugar a campos magnéticos. Una corriente eléctrica circulando por un hilo rectilíneo produce un campo magnético alrededor del hilo conductor. Para ver la dirección y sentido del campo magnético hay que recurrir a la expresión de Biot-Savart que no veremos en este curso. Sólo hemos de saber que siempre que haya un hilo conductor por el que circula corriente hay un campo magnético a su alrededor.

2. Ondas

Una onda es una perturbación que viaja sin transporte neto de materia. Son ondas las que se producen: en una cuerda al agitar uno de sus extremos, en la superficie del agua al tirar una piedra, en el aire al producir sonidos... En estos casos la onda se produce por la oscilación de las partículas que

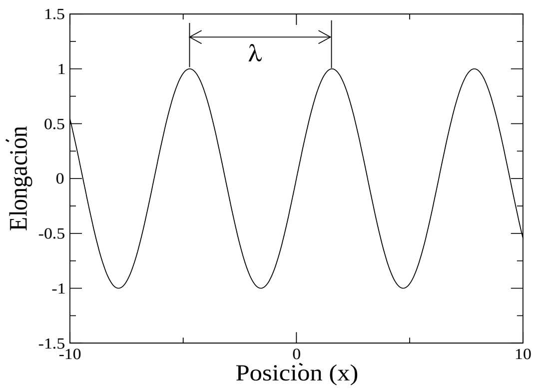
*Siempre que v sea constante.

forman el medio por el que se propaga la onda en torno a su posición de equilibrio.

Primero vamos a repasar algunos conceptos fundamentales relativos a las ondas.

2.1. Magnitudes características

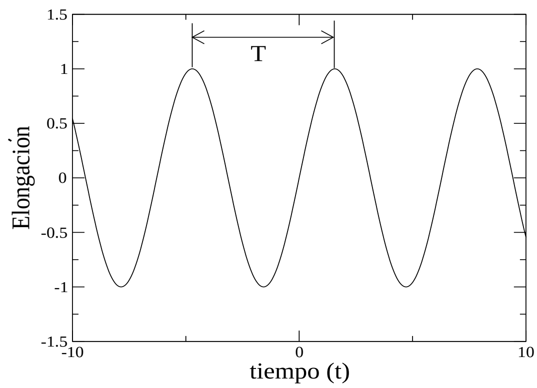
La forma matemática usual para representar una onda es la de la función seno. A estas ondas se les denomina sinusoidales y son en las que vamos a centrar nuestro estudio. En la figura siguiente, el eje de ordenadas representa la magnitud de la perturbación o desplazamiento de las partículas de su posición de equilibrio y el eje de abcisas representa la posición.



La onda representada es periódica espacialmente, pues la onda completa es la repetición sucesiva de una secuencia básica. La longitud de esta secuencia base se denomina *longitud de onda* (λ). La figura anteriormente dibujada sería una fotografía de la onda en un instante dado. En el caso de la cuerda sería la posición de cada punto de la cuerda en un momento dado. Sin embargo, las ondas no están quietas sino que evolucionan en el tiempo.

Si nos fijamos en un punto x_0 (de la cuerda por ejemplo) y vemos como va variando el valor de su desplazamiento con respecto a la posición de equilibrio en el tiempo, se obtiene otra función sinusoidal también, como se muestra en la figura siguiente

De nuevo, se observa que los desplazamientos se repiten cada un cierto intervalo de tiempo. Se denomina *periodo* T de la onda al tiempo que debe transcurrir desde que un punto dado, x_0, está en una posición hasta que vuelve a ella en el mismo estado de movimiento. La inversa de esta cantidad se denomina frecuencia $\nu = \frac{1}{T}$. La frecuencia es el número de oscilaciones completas que realiza un punto dado del medio (por ejemplo un



punto de la cuerda) por unidad de tiempo. Las unidades de la frecuencia son: vueltas$/s$=Hz.

La frecuencia de la onda y su longitud de onda están relacionadas con la velocidad de propagación de la onda, v, por

$$v = \lambda\nu \ .$$

En una onda se habla de *elongación* en un punto x_0 en un instante t, como el desplazamiento con respecto a la posición de equilibrio que en ese instante se produce en x_0 debido a la perturbación que se propaga por el medio. A la máxima elongación que puede tener cualquier punto de la onda se le denomina *amplitud* de la onda.

La forma matemática usual para representar una onda sinusoidal es

$$\underbrace{y(x,t)}_{\text{elongación}} = \overbrace{A}^{amplitud} \ \text{sen}\left(2\pi\frac{x}{\lambda} - 2\pi\frac{t}{T} + \phi\right)$$

Al argumento del seno se le llama fase de la onda.

Aunque las ondas no transportan materia, si transportan momento y energía de un punto a otro del espacio. La energía que lleva cualquier onda es proporcional al cuadrado de su amplitud.

2.2. Ondas longitudinales y ondas transversales

Según sean los desplazamientos de las partículas del medio que oscila en relación a la dirección de propagación de la onda, las ondas se clasifican en *longitudinales* y *transversales.*

- Si los desplazamientos del medio son paralelos a la dirección de propagación de la onda $\Rightarrow$ longitudinales (por ejemplo, la onda de sonido)

- Si los desplazamientos del medio son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda $\Rightarrow$ transversales (por ejemplo, la onda en una cuerda)

2.3. Interferencia de ondas

Las ondas tienen una propiedad particular que las diferencia de las partículas y es que se pueden componer linealmente. Es decir, si en un mismo instante de tiempo y en la misma región del espacio hay 2 ondas, éstas coexisten y dan lugar a otra onda que no es más que la suma de las dos ondas iniciales. Es lo que se denomina principio de superposición lineal de las ondas. Esta superposición de ondas se conoce como *interferencia*. Vamos a ver un ejemplo sencillo de interferencia. Consideremos la interferencia entre dos ondas de igual longitud de onda e igual amplitud, es decir, ondas que parten de la misma fuente. Las dos ondas en un instante t fijo son:

$$y_1 = A \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \ ,$$
$$y_2 = A \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \phi\right) \ ,$$

ϕ es el desfase que hay entre las dos ondas.

Estas dos ondas en el instante t interferirán de modo que como resultado se obtendrá la onda:

$$y_T = y_1 + y_2 = A\left[\operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) + \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \phi\right)\right] \ .$$

Recordando que:

$$\operatorname{sen} A + \operatorname{sen} B = 2 \operatorname{sen}\frac{A+B}{2}\cos\frac{A-B}{2} \ ,$$

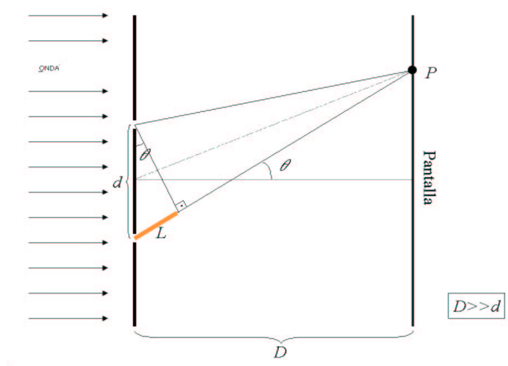
se tiene que:

$$y_T = 2A\cos\frac{\phi}{2}\operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{\phi}{2}\right) \ .$$

Se tiene como onda resultante una onda con desfase de $\phi/2$ y amplitud $2A\cos(\phi/2)$. La amplitud depende del desfase entre las dos ondas en ese instante. Si $\phi = 0$ se dice que las dos ondas que se componen están en fase y la amplitud de la onda resultante será $2A$. En este caso la onda resultante tiene más amplitud que las dos que se componen, se dice que se ha producido una interferencia *constructiva*. Si, por el contrario, $\phi = \pi$ se dice que las ondas que se componen están en contrafase y la amplitud de la onda resultante será 0. Aquí la suma de dos perturbaciones ha dado lugar a *ninguna perturbación*, se dice que se ha producido una interferencia *destructiva*. Por supuesto, entre estos dos casos extremos hay todos los casos intermedios.

2.4. Interferencia en una doble rendija

Veamos ahora un ejemplo de cómo funciona el principio de superposición de ondas en un caso simple. Consideremos una onda, de longitud de onda bien definida, que incide sobre una placa opaca en la que se han realizado dos orificios por los que puede pasar la onda.



En la figura se representan las trayectorias seguidas por la onda al ir desde la rendija de arriba y la de abajo al punto P sobre la pantalla. Las rendijas están separadas entre sí una distancia d, y la pantalla en la que se recoge la onda está a una distancia D de placa en la que hemos hecho las dos rendijas. En las condiciones de interés $d \ll D$. Para ese caso, los ángulos marcados con θ en la figura se pueden considerar iguales

Está claro que la onda que parte de la rendija de abajo recorre una distancia L mayor que la onda que parte de la rendija de arriba. Como las ondas que parten de ambas rendijas están inicialmente en fase, sólo llegarán en fase a P si la diferencia de caminos recorridos son un múltiplo entero de la longitud de onda de la onda incidente. En ese caso, tendremos interferencia constructiva sobre la pantalla en el punto P. Si, por el contrario, la diferencia de camino entre ambas trayectorias es $1/2\ \lambda$ o $3/2\ \lambda$ ... (en general $(2n+1)/2$ λ) entonces la onda que resulta en P será destructiva. Habrá zonas en la pantalla en las que tendremos una onda de amplitud mayor que la de la onda incidente y otras zonas en las que tendremos amplitud cero, alternándose.

Resumiendo, tendremos interferencia constructiva si

$$L = n\lambda \ .$$

Pero podemos calcular L por trigonometría elemental, $L = d \operatorname{sen} \theta$. Por tanto, la condición para tener una interferencia completamente constructiva en la pantalla será

$$n\lambda = d \operatorname{sen} \theta$$

con $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$. Los ángulos θ que cumplan esto definen los puntos P en los que habrá interferencia constructiva.

Veamos algunos detalles de esta imagen de interferencia obtenida en la pantalla. Si $n = 0$ entonces $d \operatorname{sen} \theta = 0$ de donde $\theta = 0$. Es decir, sea cual sea la onda que llegue a la doble rendija, obtendremos interferencia constructiva justo en el punto de la pantalla que corresponde al punto medio entre las rendijas.

Si $n = 1$ entonces $\lambda = d \operatorname{sen} \theta$. Se obtendrá una onda constructiva para un ángulo θ_1 que define un punto sobre la pantalla. Si $n = 1/2$ tenemos la condición de interferencia destructiva, $\lambda = 2d \operatorname{sen} \theta$. Se obtendrá interferencia destructiva sobre la pantalla a un ángulo $\theta_{1/2}$ que esta entre 0 y θ_1. Así que tendremos interferencia constructiva y destructiva alternándose sobre la pantalla. Esta imagen de interferencia es característica de las ondas, las partículas no interfieren.

3. La luz como una onda

La naturaleza de la luz había sido un enigma hasta el siglo XVII. En esa época se gestaron dos interpretaciones de la luz opuestas. Por un lado, Robert Hooke mantenía que la luz tenía naturaleza ondulatoria. Mientras que Isaac Newton, por otro, defendía la naturaleza corpuscular de la luz. Según ellos, la luz blanca sería la combinación de ondas de distintas longitud de onda o la unión de corpúsculos de distintos colores, respectivamente. Ambas teorías tenían sus adeptos y enemigos y conseguían explicar los fenomenos más usuales conocidos: la reflexión y la refracción.

A principios del siglo XIX pareció que la interpretación ondulatoria ganaba la partida. En 1801, Thomas Young demostró que la luz sufre interferencias como las ondas. También en esa época se midió la velocidad de la luz en el vacío y en otros medios materiales, concluyéndose que la luz viaja más lenta en los medios materiales que en el vacío como predecía la teoría ondulatoria y contrariamente a lo que predecía la teoría corpuscular.

La experiencia de Young para demostrar la naturaleza ondulatoria de la luz, se basa en la difracción por una doble rendija. La *difracción* es cualquier fenómeno que se produce en la propagación de una onda que no se puede explicar como transmisión rectilínea, reflexión o refracción. Si repetimos el experimento de doble rendija explicado en la sección anterior, pero ahora con luz, observamos sobre la pantalla franjas iluminadas y franjas oscuras alternadas como predice lo explicado para la interferencia de ondas.

Además, si en vez de enviar sobre la doble rendija luz monocromática (una única longitud de onda (color)) enviamos luz blanca, que es composición de varios colores, se observa:

- en el punto de la pantalla que está justo enfrente del punto medio de las rendijas hay una zona iluminada de color blanco. Esto es fácil de explicar, Si $n = 0$ entonces $d \operatorname{sen} \theta = 0$ de donde $\theta = 0$ independientemente de λ. O lo que es igual, todas las longitudes de onda presentan interferencia constructiva en ese punto por lo que vemos ahí una zona iluminada de color blanco.

- al alejarnos de ese punto hacia arriba o hacia abajo vemos zonas iluminadas de color rojo, naranja, amarillo, verde, azul, violeta separadas por zonas no iluminadas. Eso también se entiende fácilmente con la fórmula que nos da la interferenca constructiva. Si $n = 1$ entonces $\lambda = d \operatorname{sen} \theta$. Se obtendrá una onda constructiva para un ángulo que depende de λ. Las ondas con λ más pequeño interferirán constructivamente sobre la pantalla más cerca del centro que las de λ mayor. Así, concluimos que $\lambda_{rojo} > \lambda_{naranja} > ... > \lambda_{violeta}$.

La doble rendija actúa como un separador de longitudes de onda igual que el prisma usado por Newton para mostrar la descomposición espectral (en diferentes longitudes de onda) de la luz blanca.

Si en vez de 2 rendijas se tienen N y se supone que la distancia entre rejillas d es mucho mayor que la anchura propia de la abertura, aparecen máximos principales de interferencia en $d \operatorname{sen} \theta = n\lambda$ que se van haciendo más intensos y más estrechos al aumentar N aunque los máximos secundarios ($n = 2, 3, \dots$) se van haciendo menos intensos y más anchos al aumentar N. Este dispositivo con N rendijas se conoce como *red de difracción*. Para analizar luz se usan redes de difracción con N muy grande (en el laboratorio usamos redes de 600 líneas/mm). A $1/N$ se le llama *poder de resolución de la red*. Las redes de difracción se usan para analizar la luz proveniente de espectros atómicos.

Fijada la naturaleza ondulatoria de la luz faltaba saber que era lo que oscilaba. La respuesta llegó a mediados del siglo XIX del campo del electromagnetismo. Maxwell descubrió que la luz no era más que una onda electromagnética. Lo que oscila es el campo eléctrico (y el magnético) y para propagarse no necesitan de ningún medio material. Las ondas electromagnéticas se propagan por el vacío con una velocidad constante $v = c = 2{,}997 \cdot 10^8 m/s$. Por eso, conociendo la relación que vimos al hablar en la sección anterior de propiedades generales de las ondas $c = \lambda\nu$, da igual definir una onda electromagnética por su longitud de onda λ que por su frecuencia ν.

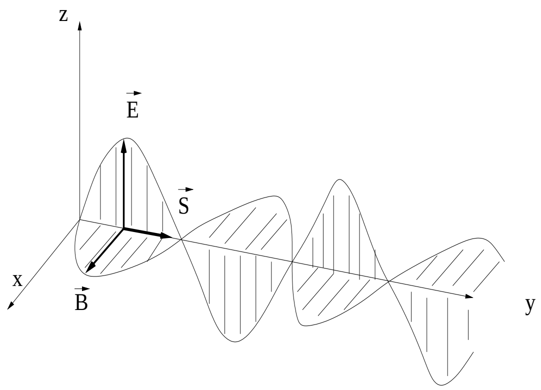
Un campo electromagnético se caracteriza por su intensidad de campo eléctrico $\vec{E}$ y por la intensidad de campo magnético $\vec{B}$. Si las cargas se aceleran, o si la corriente varía con el tiempo se produce una onda electromagnética en la que varian $\vec{E}$ y $\vec{B}$, no sólo con la posición, sino también con el tiempo. La expresión matemática de una onda electromagnética puede tener muchas formas pero una de las más usuales es la de una onda plana. Ejemplo de onda plana viajando en la dirección del eje z:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \operatorname{sen}(kz - \omega t + \phi) \ ,$$
$$\vec{B} = \vec{B}_0 \operatorname{sen}(kz - \omega t + \phi) \ ,$$

donde k es el *número de onda* y verifica que $k\lambda = 2\pi$, ω es la frecuencia angular que verifica que $\omega = 2\pi\nu$, y donde la velocidad de propagación es c.

La polarización de la onda viene dada por $\vec{E}_0$ y el plano de polarización viene dado por el que forman $\vec{E}_0$ y la dirección de propagación (z en este caso). Conocidos el plano de polarización y la dirección de propagación, $\vec{B}_0$ queda determinado ya que $\vec{E} \times \vec{B}$ debe ir en la dirección de propagación. Además, se cumple que:

$$B_0 = \frac{E_0}{c} \ .$$



Una onda electromagnética transmite energía de un lugar a otro y el flujo de energía viene dado por el vector de Poynting:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

que tiene dimensiones de energía partido por tiempo y por área. Si el área A es perpendicular a la dirección de propagación de la onda electromagnética, la potencia recibida será:

$$P = S \cdot A = \frac{1}{\mu_0} E_0 B_0 A \operatorname{sen}^2(kz - \omega t + \phi) = \frac{1}{\mu_0} E_0^2 A \operatorname{sen}^2(kz - \omega t + \phi) \ .$$

Se verifica que:

- La intensidad es proporcional a E_0^2 (amplitud de la onda al cuadrado).
- La intensidad fluctúa en el tiempo con una frecuencia 2ω. Esa fluctuación no se suele observar ya que para la luz visible $\nu \approx 10^{15} Hz$ (10^{15} oscilaciones/s) y el ojo humano no puede detectar esos cambios tan cortos. Se observa un promedio:

$$\overline{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{1}{2\mu_0 c} E_0^2 A \ .$$

Así las cosas, a finales del siglo XIX parecía bien establecida la naturaleza ondulatoria de la luz. Además, la luz visible no era más que una fracción pequeña de la radiación electromagnética, aquella en la que las longitudes de onda implicadas se encuentran entre 3000 y 7000 Å(1 Å= 1 Angstrom= 10^{-10} m).

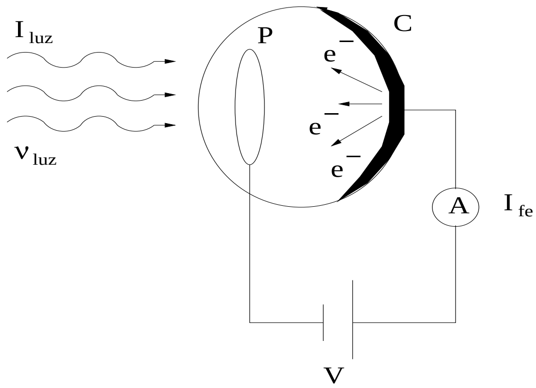
color	rojo	naranja	amarillo	verde	azul	violeta
λ (Å)	6600	6200	5800	5200	4400	3800

En el marco general del electromagnetismo, la luz visible es de la misma naturaleza (onda electromagnética) que las ondas de radio y televisión, las microondas, la radiación infrarroja, la radiación ultravioleta, los rayos X o los rayos γ. Lo único que las diferencia a unas de otras es el rango de longitudes de onda que abarcan y, por consiguiente la energía que transportan.

4. La luz como un chorro de partículas: fotones

Acabamos de estudiar la luz como una onda y todo parece funcionar bien. Sin embargo, a principios del siglo XX se vió que bajo determinadas circunstancias la radiación electromagnética, en general, y la luz en particular, se comporta como un chorro de partículas. El ejemplo más paradigmático es el efecto fotoeléctrico.

A finales del siglo XIX se había observado que una placa de zinc cargada negativamente se descargaba cuando era iluminada con luz ultravioleta. Eso no ocurría si estaba cargada positivamente. La luz arranca cargas negativas del metal. A este efecto por el cual el zinc y otros metales emiten electrones cuando se les ilumina con luz se denomina efecto fotoeléctrico. El dispositivo que se usa para mostrar este efecto y sus características se denomina célula fotoeléctrica. En la figura se muestra una imagen esquemática de una célula fotoeléctrica



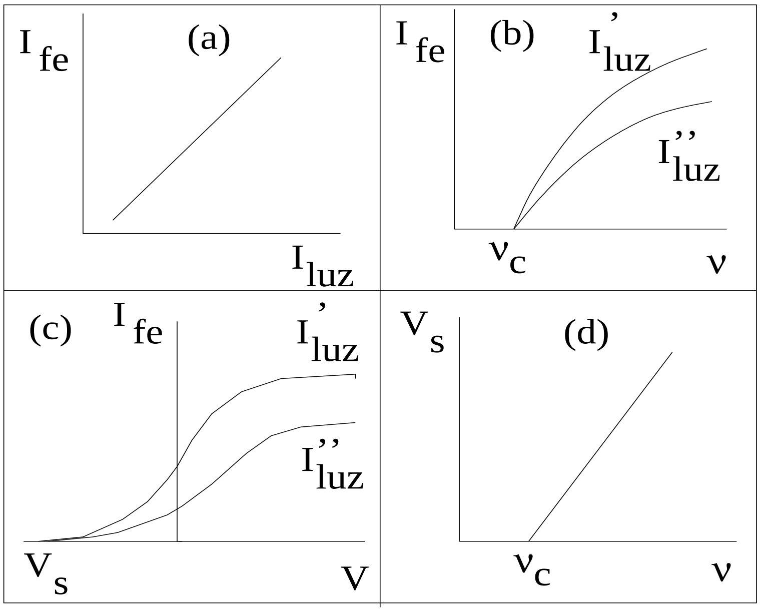
La luz de determinada frecuencia ν_{luz} e intensidad I_{luz} incide desde la izquierda sobre una especie de bombilla de cristal, una vez dentro atraviesa el anillito P e incide sobre una capa metálica C depositada en la capa interior de la bombilla. En C se arrancan electrones por efecto fotoeléctrico y algunos de esos electrones llegan en su movimiento a P, cerrando el circuito y dando una señal (I_{fe}) en el amperímetro A. Las características del circuito las podemos variar modificando los valores de la diferencia de potencial V. Por lo tanto, en los experimentos de efecto fotoeléctrico podemos variar ν_{luz}, I_{luz} y V y el resultado del experimento es la corriente fotoeléctrica que se mide I_{fe}.

Con montajes parecidos al mostrado en la figura anterior se hicieron numerosos experimentos cuyos resultados principales mostramos a continuación.

Las observaciones experimentales básicas son:

- La I_{fe} es proporcional a la I_{luz}, si mantenemos ν_{luz} y V fijos, como se muestra en el panel a) de la figura anterior.

- La I_{fe} se hace cero por debajo de una frecuencia de la luz dada para cada material (frecuencia de corte ν_c) y esa frecuencia de corte es independiente de la intensidad de la luz que incida sobre la célula fotoeléctrica. Esto se muestra en el panel b) de la grafica anterior.



- Cuando se mide I_{fe} variando el potencial V se observa que hay corriente incluso con $V = 0$. Eso significa que los electrones que se emiten desde C por efecto fotoeléctrico no son arrancados en reposo sino que llevan una cierta energía cinética que les permite llegar a P incluso con $V = 0$. Además, se observa corriente fotoeléctrica incluso poniendo $V < 0$ hasta que V toma un valor V_s, denominado potencial de frenado, por debajo del cual ya no hay emisión fotoeléctrica. Este potencial V_s es una medida de la energía cinética máxima de los electrones arrancados por efecto fotoeléctrico: $T_{\max} = eV_s$. Además, se observa que V_s es independiente de la intensidad de la luz incidente, aunque depende de su frecuencia. El panel c) de la gráfica anterior muestra esquemáticamente lo observado.

- Si se mide V_s para distintas frecuencias de luz incidente se observa que la relación de eV_s frente a la frecuencia ν_{luz} es lineal y se anula en la frecuencia de corte ν_c. Eso se muestra en el panel d) de la figura anterior.

- Se observa que la emisión de electrones, si existe (es decir, si estamos por encima de la frecuencia de corte), es inmediata a la iluminación del material fotosensible, independientemente de la intensidad de la luz. No hay un tiempo de espera.

Veamos ahora si estas observaciones se pueden entender en el marco de la interpretación ondulatoria de la luz.

Todo el razonamiento se basa en que en la teoría ondulatoria de la luz, ésta es una onda electromagnética. La onda EM llega al metal en C y somete a los electrones que están más cerca de la superficie a un campo eléctrico $\vec{E}$ que tira de los electrones con una fuerza que es $F = eE$ y, si F es suficientemente grande los arranca del metal. Según hemos visto arriba, aumentar la intensidad de la luz significa aumentar la amplitud de la onda electromagnética (recordar que la intensidad de la onda EM era proporcional a la amplitud del campo eléctrico al cuadrado) y aumentar la amplitud de la onda EM significa tirar de los electrones con más fuerza. Con esto presente se puede entender, al menos cualitativamente, la primera observación anterior. Aumentar la intensidad de la luz implica, según lo que acabamos de decir, aumentar la fuerza con la que la onda EM tira de los electrones del metal y, por tanto, debe arrancar más electrones. Sin embargo, el mismo razonamiento hace inexplicables los puntos 2, 3, 4 y 5 anteriores. Por ejemplo, la existencia para cada material fotosensible de una frecuencia de corte por debajo de la cual no hay emisión de electrones no se puede explicar en este esquema ya que por baja que sea la frecuencia de la luz siempre puedo aumentar la fuerza con que la onda EM correspondiente tira de los electrones aumentando la amplitud de la onda. Por tanto, se esperaría que aumentando mucho la amplitud del campo eléctrico hubiera fotoemisión para cualquier frecuancia de la luz incidente. De igual modo, no se explica que V_s sea independiente de la intensidad de la luz. Si recordamos que V_s estaba asociado a la energía cinética de los electrones emitidos por C, si aumentamos la intensidad de la luz estamos aumentando la fuerza con la que la onda EM tira de los electrones para arrancarlos del metal. Pero a mayor fuerza aplicada sobre los electrones, éstos deben acelerarse más ($F = ma$) y, por tanto, llegar a P con más velocidad (energía cinética). En conclusión, uno esperaría que V_s variara al variar la intensidad de la luz, en contra de lo observado. El panel d) es una combinación de b) y c) así que tampoco se puede explicar con la interpretación ondulatoria de la luz. Por último, la emisión instantánea de fotoelectrones tampoco se entiende en este contexto ya que la emisión de fotoelectrones por el metal está condicionada a que la luz proporcione al metal la energía necesaria para romper la ligadura que une al electrón al metal. Si se ilumina el metal con una onda muy poco intensa (se puede elegir esta intensidad tan baja como se quiera) se le proporciona poca energía por unidad de tiempo por lo que sería necesario esperar un cierto intervalo de tiempo hasta que la energía recibida por el metal fuera la suficiente para liberar a un electrón. En conclusión, la interpretación ondulatoria de la luz, que funciona muy bien para entender su propagación (reflexión, refracción, difracción), no parece funcionar al analizar la interacción entre radiación y materia.

Ya en 1900 Planck, analizando la curva de radiancia emitida por un cuerpo negro, había propuesto que los intercambios de energía entre radiación y materia se producían en cantidades que eran múltiplos enteros del producto de la frecuencia de la radiación por una constante h, denominada desde entonces constante de Planck. El valor numérico de esta constante es $h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ J.s. En 1905, Einstein analizando el problema del efecto fotoeléctrico y conociendo las ideas de Planck propuso que, no sólo los intercambios de energía de la radiación con la materia se producían en cantidades discretas, sino que la propia radiación había que interpretarla como un conjunto del cuantos de energía a los que denominó *fotones*. Cada fotón lleva una energía $E_\gamma = h\nu$ y Einstein propuso que en el efecto fotoeléctrico un fotón de radiación es completamente absorbido y su energía cedida a un electrón del material fotosensible. Ese electrón emplea la energía aportada por el fotón absorbido en romper la ligadura que le ata al metal y el resto se la lleva en forma de energía cinética T:

$$T = h\nu - W \ .$$

En esta imagen *corpuscular* de la radiación, aumentar la intensidad de la luz significa aumentar el número de fotones que por unidad de área y tiempo llegan al material fotosensible.

Veamos si con esta imagen corpuscular de la luz se pueden entender las observaciones que hemos mencionado del efecto fotoeléctrico.

- Si se aumenta la I_{luz} significa que llegan más fotones por unidad de área y tiempo al material fotosensible, luego se arrancarán más electrones. Con esto se entiende el panel a) de la figura anterior.

- Los electrones que estén menos ligados al metal serán los que se emitan con más energía cinética. Si llamamos W_0, función trabajo del metal, a la energía con la que estan ligados al metal los electrones menos ligados, la energía cinética de uno de estos electrones al absorber un fotón de radiación será:

  $$T_{\max} = h\nu - W_0 \ ,$$

  por lo que si estamos usando una radiación cuya frecuencia sea tal que $h\nu < W_0$ no habrá emisión fotoeléctrica. Dicho de otro modo, radiación de frecuencia menor que una dada ν_c no producirá efecto fotoeléctrico. Esta ν_c depende sólo de las características del material fotoeléctrico, ya que sólo depende del valor de W_0. Aumentar la intensidad de la luz significa aumentar el número de fotones que llegan a C pero todos son de la misma frecuencia. Esto explica el panel b) de la gráfica anterior.

- Según vimos en una sección anterior, la energía cinética que adquiere un electrón al someterlo a una diferencia de potencial V es 1 eV. Del mismo modo, para frenar completamente a un electrón que lleve una energía cinética de x eV hace falta someterlo a un potencial negativo de x V. Por ello, si los electrones más rápidos que se emiten en el efecto fotoeléctrico tienen energía $T_{\max} = h\nu - W_0$ para detenerlos hará falta someterlos a un potencial negativo V_s tal que

$$eV_s = T_{\max} = h\nu - W_0 \ .$$

Si aumentamos la intensidad de la luz, aumentamos el número de fotones pero todos serán de igual frecuencia y, por tanto, se arrancarán más electrones pero todos de igual energía cinética máxima. Por consiguiente, el potencial de frenado V_s será independiente de la intensidad de la luz y sólo dependerá del material fotoeléctrico a través de W_0. Esto explica el panel c) de la grafica anterior.

- El panel c) de la gráfica anterior es obvio con la explicación anterior. Si $eV_s = h\nu - W_0$, al representar eV_s frente a ν obtendremos una recta y la pendiente de ésta será precisamente la constante de Planck, h.

- Según esta interpretación corpuscular de la luz (radiación) cuando un fotón llega al metal, si tiene una frecuencia por encima de la umbral, es absorbido y se emite el fotoelectrón correspondiente y esta emisión es inmediata. Si, por el contrario, el fotón tiene frecuencia por debajo de la frecuencia umbral no hay fotoemisión. El bajar la intensidad de la luz significa que hay menos fotones en juego pero los que haya darán lugar a efecto fotoeléctrico inmediato si tienen energía por encima de ν_c.

En conclusión, la teoría corpúscular de la luz de Einstein parece explicar perfectamente todas las observaciones del efecto fotoeléctrico. Dentro de la teoría cuántica y en este contexto de interpretación corpuscular se pueden explicar todas las características observadas hasta ahora de la luz.

5. Naturaleza dual de la radiación

Los conceptos de partícula y onda (o campo) en física son contrapuestos. En nuestra experiencia cotidiana son conceptos que usamos para interpretar entes completamente distintos. El prototipo de partícula es una bola de billar: son discretas (se pueden tener 10, 100, ... pero no 1.33), numerables, en un instante determinado ocupa una posición dada en el espacio, el que una partícula esté en un instante dado en una posición concreta excluye de esa posición en ese mismo instante a cualquier otra partícula, cuando se mueve sigue una trayectoria concreta. Por el contrario, el prototipo de onda es la que se produce en la superficie de un estanque al arrojar una piedra: la onda que se produce es una función continua de la posición y el tiempo, está definida en toda la superficie del agua (no en un punto concreto), si se arroja otra piedra en otro punto las dos ondas coexisten sobre la superficie del agua dando lugar a una onda resultante (una onda no excluye a otras en la misma zona del espacio y en el mismo instante de tiempo), al pasar el tiempo no podemos hablar de trayectoria seguida por la onda sino más bien de evolución (cambio) con el tiempo.

onda (campo)	partícula
continua $\phi(\vec{r}, t)$	discreta (numerable, distinguible,..)
definida en todo el espacio	localizada en un punto en cada instante
coexistencia (superposición)	impenetrabilidad
evolución en t	trayectoria

Parece extraño que conceptos tan diferentes puedan ser aplicables a la luz. Todos los fenómenos relacionados con la transmisión de radiación parecen interpretarse razonablemente dentro del esquema ondulatorio, pero siempre que hay que considerar la interacción de radiación con la materia hay que recurrir a la interpretación corpuscular. Es como si la radiación estuviera formada por fotones pero su distribución espacial estuviera gobernada por las leyes que rigen el movimiento ondulatorio. De hecho si se hace el experimento de doble rendija con luz y como pantalla se usa una película fotográfica, se observa la imagen de interferencia propia de las ondas (zonas iluminadas, correspondientes a interferencia constructiva, y zonas oscuras, correspondientes a interferencia destructiva, alternadas) si la intensidad de la luz es grande (muchos fotones). Sin embargo, si se baja la intensidad de la luz y se repite el experimento se observa que la imagen en la película se va formando punto a punto (cada fotón arranca un electrón y vela la película en ese punto) pero al cabo de mucho tiempo vemos que los puntos se acumulan en unas zonas de la pantalla (zonas iluminadas de interferencia constructiva) mientras que en otras zonas prácticamente no hay puntos (zonas oscuras de interferencia destructiva). Los cuantos de luz llegan a la película como partículas pero se distribuyen espacialmente como una onda. Un tratamiento cuántico de la radiación en el que ésta está formada por fotones explica de un modo satisfactorio la luz y su comportamiento, tanto de transmisión como de interacción con la materia. Sin embargo, este tratamiento es complicado y para muchas observaciones cotidianas la interpretación de la luz como una onda es aceptable.