

Portada. Fuente: <http://www.fondos10.net/>

## La luz: ¿onda o partícula?

Gerardo Martínez Avilés

### ¿Qué es la luz?

Esta pregunta aparentemente inocente ha hecho que científicos, filósofos y teólogos se hayan quebrado la cabeza durante más de dos milenios tratando de responderla. Los antiguos griegos, por ejemplo, no tenían bien clara la diferencia entre luz y visión. Pitágoras y Demócrito postularon que la visión consistía en imágenes que viajaban de los objetos a los ojos. Para otros, como Euclides y Herón, la luz consistía de “rayos visuales” que emergían de los ojos y viajaban a los objetos. Es difícil imaginar de qué rayos estaban hablando. De cualquier modo, fue hasta aproximadamente el año 1000 d.C. cuando el sabio árabe Alhazen hizo una distinción clara entre luz y visión postulando que la luz era un ente físico y que la visión se genera cuando el ojo recibe dicho ente.

## ¡Es una partícula!... y lo digo yo que soy Newton

La ciencia moderna nació después de la revolución de Copérnico en el siglo XV, pero la discusión científica sobre la naturaleza de la luz, al menos como la entendemos ahora, comenzó hasta el siglo XVII con el nacimiento de la óptica moderna. Los experimentos realizados mostraban que un rayo de luz cambiaba su dirección al pasar de un medio a otro, por ejemplo del agua al aire. Este fenómeno conocido como refracción intrigaba a científicos y a genios como René Descartes, Willebrord Snell, Johannes Kepler y Pierre de Fermat que trataron de explicarlo y describirlo cuantitativamente. Aunque todos ellos jugaron un papel importante en la descripción cuantitativa del fenómeno, Descartes fue el único que postuló un mecanismo más bien cualitativo. Para él la propagación de la luz era similar al movimiento de un proyectil en un *medio*, como una bala en el aire. Es por ello que Descartes postuló la existencia de un *plenum*, una especie de sustancia etérea que permeaba todo el universo y que al ser perturbada se producía en ella un movimiento *ondulatorio* que después se transmitía por el espacio desde la fuente de luz hasta los ojos. Una buena analogía serían las ondas que produce una piedra al caer en un estanque. La piedra es el objeto luminoso, el agua del estanque es el *plenum* y las ondas en la superficie del agua son la luz percibida.

Otro descubrimiento importante en el siglo XVII fue realizado por Francesco M. Grimaldi. Este experimentador describió algunas franjas proyectadas en una pantalla por un haz de luz que había pasado por el borde de algún obstáculo. Este hecho demostró que la luz no siempre viaja en línea recta sino que los obstáculos que encuentra en su camino la desvían. Grimaldi propuso de nuevo que la luz debía tratarse de una onda ya que algunos fenómenos ondulatorios en fluidos también tienen este comportamiento que se conoce como difracción. No obstante, los experimentos de Grimaldi eran motivo de continuo debate, y a muchos los resultados les parecían errores experimentales.

Los máximos representantes de la teoría ondulatoria de la luz fueron Robert Hooke y Christian Huygens. Este último publicó en 1690 su *Tratado de la luz*, donde propone que

la luz es la perturbación de un medio llamado *eter luminífero* (más o menos lo mismo que el *plenum* de Descartes). En dicho libro se sentaron las bases de importantes principios físicos y matemáticos para el entendimiento y la descripción de la naturaleza ondulatoria de los fenómenos lumínicos.

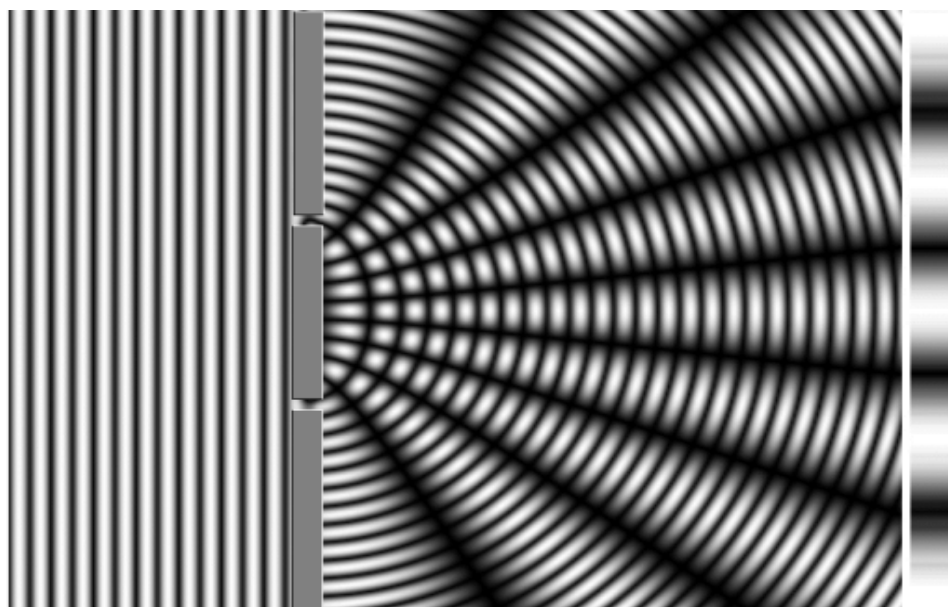
Pero sin duda alguna el científico más importante, productivo, genial, famoso e influyente del siglo XVII fue Isaac Newton. Él, a diferencia de la mayoría de sus contemporáneos, pensaba que la luz era una partícula. Newton fue de los primeros en darse cuenta de que al pasar la luz blanca por un prisma, ésta se descomponía en varios colores. Propuso que la luz de cada color debía estar compuesta de un tipo de partícula diferente. Newton sabía además que la luz se reflejaba en superficies planas de la misma forma en que, por ejemplo, una pelota rebota en una pared. A pesar de su orgullo, Newton hizo maromas para explicar la difracción por medio de su teoría corpuscular. Sin embargo se dio cuenta de que era necesaria también la perturbación ondulatoria de cierto medio. No obstante, su postura seguía siendo la misma: mientras para Huygens la luz era la perturbación misma del medio, para Newton la luz era el movimiento de partículas en un medio.

Newton hizo enormes avances en mecánica, astronomía, matemáticas, gravitación y óptica. A pesar de que la teoría ondulatoria de la luz tenía muchos puntos a favor, el peso de la autoridad de Newton hizo que su teoría corpuscular predominara durante casi cien años en el ambiente de la ciencia. Hubo que esperar hasta el siglo XIX para que la historia diera otro giro.

### **¡Es una onda!... y lo decimos nosotros los físicos experimentales**

Con el siglo XIX llegó el triunfo de la teoría ondulatoria de la luz. Los avances en experimentación hicieron posible recolectar una enorme cantidad de evidencias a favor de que la luz es una onda, a diferencia de lo que pensaba Newton. El experimento que no dejó duda sobre la naturaleza ondulatoria de la luz fue realizado por Thomas Young en

Inglaterra, y fue presentado a la Sociedad Real de Londres --la máxima institución científica en la Inglaterra de la época-- en 1803. Consistía en hacer pasar un frente de luz por dos rendijas y detectar franjas de sombras en una pantalla, es decir, lugares a donde la luz no llegaba. Esto sólo podía explicarse a partir de la interferencia. Ésta ocurre cuando dos o más ondas se superponen para formar una resultante de mayor o menor amplitud. Y la interferencia, sin lugar a dudas, sólo puede presentarse si la luz es una onda.



<https://www.ph.utexas.edu/~coker2/index.files/diff.htm>

Figura 1. Una onda plana al pasar por una rendija genera interferencia de las ondas luminosas y produce regiones luminosas y otras con sombras al llegar a la pantalla a la derecha de la figura. Este comportamiento demuestra la naturaleza ondulatoria de la luz.

Pero no sólo los experimentos de Young sobre interferencia cargaron la balanza del lado de las ondas. Las mejoras experimentales en la difracción de la luz comenzaron a dejar más y más claro que la luz es en efecto una onda. Por otro lado, los físicos franceses trabajaron duramente en óptica e hicieron descubrimientos muy importantes. Etienne-Louis Malus descubrió la *polarización* de la luz. Es decir que la onda de luz puede vibrar en un

solo plano. Pierre-Simon de Laplace y Jean-Baptiste Biot se enfocaron en construir teorías matemáticas en donde pudiera asentarse la teoría ondulatoria. Todos estos avances se cristalizaron en la obra de Agustin Fresnel, quien logró convencer a la Academia de Ciencias de Francia de que la luz era efectivamente una onda al construir un riguroso aparato matemático que describía los fenómenos observados e incluso predecía fenómenos que fueron confirmados experimentalmente poco tiempo después por otros científicos. Es notable que también durante ese mismo siglo se hicieron las primeras mediciones de la velocidad de propagación de las ondas luminosas.

La teoría ondulatoria de la luz explicaba además la existencia de los colores que Newton adjudicaba a diferentes tipos de partículas. Los colores se deben a que las ondas de luz oscilan con diferentes frecuencias, es decir, recorren un mismo ciclo en diferentes tiempos. La frecuencia de una oscilación se define como el número de ciclos que se completan sobre una unidad de tiempo.

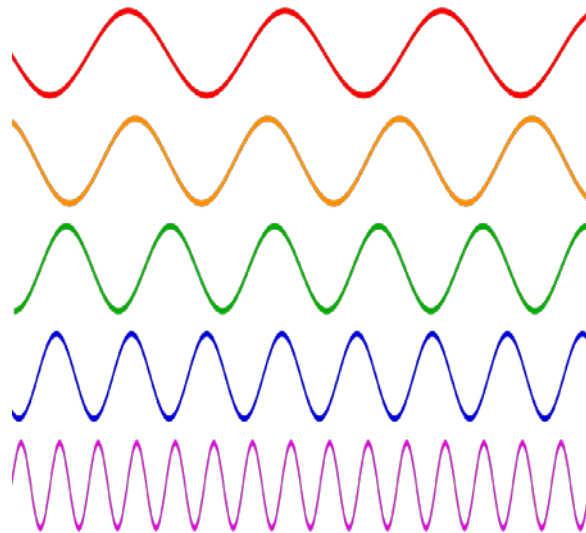


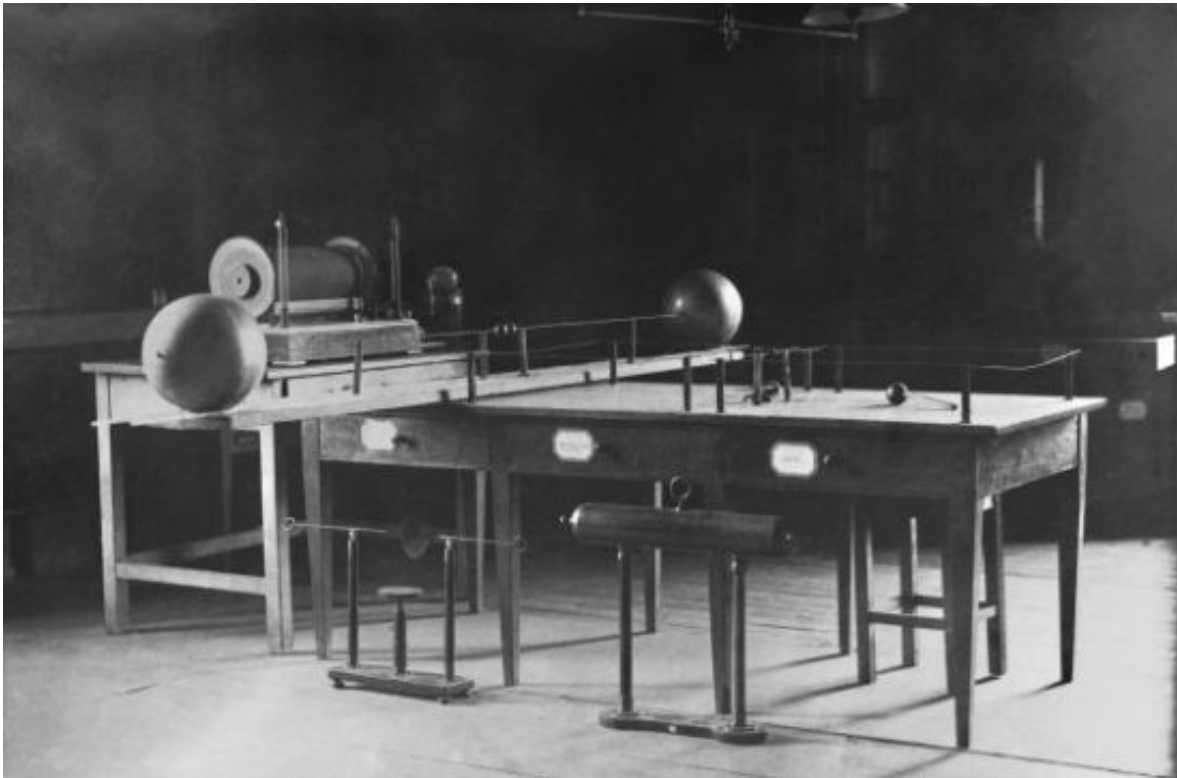
Figura 2. La luz roja corresponde a bajas frecuencias, mientras el verde, el azul y el violeta corresponden a frecuencias mayores.

Imagen: [http://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia#mediaviewer/Archivo:Sine\\_waves\\_different\\_frequencies.svg](http://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia#mediaviewer/Archivo:Sine_waves_different_frequencies.svg)

## ¿Qué onda con estas ondas?

Aunque les fue difícil deshacerse del peso de la tradición, los científicos del siglo XIX fueron aceptando poco a poco que la luz era una onda. Era además muy común el concepto de que las ondas de luz eran la perturbación de un medio como el aire en el caso de las ondas de sonido. ¿Pero de qué medio se trataba?

James Clerk Maxwell construyó la teoría del electromagnetismo a mediados del siglo XIX. En ella unificó los fenómenos eléctricos y magnéticos en una sola teoría que además contaba con una coherencia y una elegancia matemática impresionantes. En la teoría de Maxwell se deducía que los fenómenos electromagnéticos se propagaban en un medio en forma de ondas, otra vez el *éter*. A Maxwell se le ocurrió que la luz podría ser alguna forma de perturbación de los valores del campo eléctrico y magnético en el espacio, es decir, una onda electromagnética. Poco después el físico Heinrich Hertz, tras una serie de ingeniosos experimentos, demostró que las perturbaciones electromagnéticas en un conductor eran transmitidas inalámbricamente a un segundo conductor. Demostró que dicha transmisión se comportaba a la manera de una onda. Pero lo más impresionante fue que descubrió que dichas ondas se propagaban a la velocidad de la luz. Esto llevó a la siguiente conclusión: la luz visible es un tipo de onda electromagnética.



<http://www.astrogeodata.it/id315.htm>

Figura 3. Con este aparato Heinrich Hertz demostró que las perturbaciones electromagnéticas pueden viajar en forma de ondas. En el cable entre las dos esferas se genera una descarga eléctrica en forma de chispa, esto produce una onda que detecta una antena colocada a una cierta distancia, sin ningún cable que una a la antena con el aparato.

Pero quedaba aún por resolver el misterio del medio en que las ondas se propagan. Al famoso *éter* se le iban agregando propiedades cada vez más y más extrañas y ninguna podía ser verificada experimentalmente. Debía ser casi infinitamente elástico para poder transmitir las ondas a la velocidad requerida. Se pensaba además que era casi infinitamente sutil, ya que no era detectado en ningún experimento, pero al mismo tiempo debía estar presente en todos los rincones del universo, ya que nos llega luz de cualquier lugar del cosmos. A finales del siglo XIX a los científicos Albert Michaelson y Edward Morley se les ocurrió un ingenioso experimento para demostrar la existencia del *éter*. Pero lo que no sabían es que estaban sentando las bases de una nueva concepción de la física

del espacio y el tiempo. Los experimentos mostraron que la velocidad de la luz era constante para cualquier observador. No importa qué tan rápido se mueva, el observador siempre medirá la misma velocidad de la luz. Ésta puede propagarse en el vacío y no necesita de ningún *éter*. Dichas evidencias son las bases de la teoría de la relatividad especial de Albert Einstein; son nuestras mediciones del espacio y el tiempo las que deben cambiar para poder explicar el comportamiento de la luz en el vacío. La teoría de la relatividad niega la existencia del *éter*.

### **No andaba usted tan equivocado Sir Newton**

La historia del debate sobre la naturaleza de la luz tomó un giro inesperado a comienzos del siglo XX. La evidencia experimental arrojó una nueva luz sobre la manera en que la ciencia describe los fenómenos luminosos. El físico Max Planck trató de explicar la manera en que un cuerpo caliente, como una pieza incandescente de hierro o una estrella, emite luz. En los tiempos de Planck se contaba con un par de modelos y leyes empíricas, pero todas ellas tenían fallas que no podían ser ignoradas. Finalmente el 14 de diciembre de 1900, Planck dio una cátedra en Berlín donde propuso ideas radicalmente novedosas. Una de ellas fue que la energía involucrada en la radiación debe ser extremadamente pequeña pero finita. Más aún, no podía ser más pequeña que una cierta cantidad a la que llamó  $h$ , hoy conocida como la constante de Planck. La otra era que el intercambio de energía debía ser en forma de “paquetes” o “cuantos” de energía. De nuevo estas ideas sonaron extrañas incluso a él que las había tenido. Poco después el joven Albert Einstein utilizó las ideas de Planck para explicar otro fenómeno conocido como efecto fotoeléctrico. En él ciertos electrones son desprendidos de una placa golpeándolos por partículas de luz e intercambiando movimiento de la misma manera en que lo hacen, por ejemplo, dos bolas de billar. Experimentos posteriores realizados por Arthur Compton confirmaron la idea de que la luz se comportaba como una partícula.



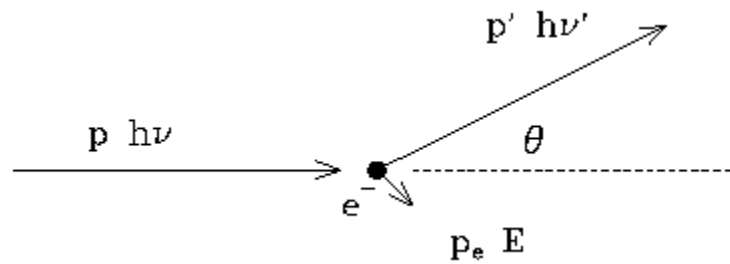


Figura 4. El efecto Compton. Un fotón, como se denominan las partículas de luz, viene desde la izquierda con momento  $p$  (una cantidad que nos indica la dirección del fotón) y energía  $h\nu$ , donde  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  es la frecuencia del fotón. El fotón choca con un electrón (al centro) y le transfiere parte de su momento inicial y de su energía. Al final el fotón cambia de momento y de energía (mostrados por  $p'$  y  $h\nu'$ ) y forma un ángulo  $\theta$  con su dirección inicial.

### Se declaran tablas

¿Es la luz una onda o una partícula? De alguna forma es las dos cosas. La luz muestra una característica llamada dualidad onda-partícula. En algunos experimentos muestra una de sus dos caras y en otros la otra. Puede sonar extraño, y esto es normal, pero la historia de la luz muestra una de las características fundamentales de la naturaleza: su extrañeza. Todavía es más extraño lo que descubrió un poco después el físico Luis de Broglie inspirado en la naturaleza dual de la luz: propuso que ¡las partículas también se comportan como ondas! Y por si fuera poco no mucho después se demostró experimentalmente que partículas materiales como los electrones muestran en ciertas condiciones comportamientos ondulatorios. Todo esto sonaba descabellado y fue difícil para los científicos tratar de explicar todas estas nuevas evidencias de manera coherente. Apareció entonces un nuevo reto y con todas estas ideas y nuevas evidencias en los albores del siglo XX se desarrolló lo que hoy conocemos como mecánica cuántica, ¿te suena familiar?

## Bibliografía

- Jagielsky, Borys, *Elements of the wave-particle duality of light*, University of Oslo, 2009.
- Martinez, Gerardo, *La física del color*, El Fanzine, 2013.
- Westfall, Richard. *Never at Rest A biography of Isaac Newton*, Cambridge University Press, 1980.