

DEBATE HISTÓRICO SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ

GENERACIÓN DE LUZ

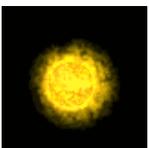
Consideramos una bombilla tradicional, una cerilla y una estrella. Son tres ejemplos de fuentes de luz propia y al analizar su comportamiento se observa que tienen en común el hecho de que en todas ellas ocurre un proceso (físico, químico, nuclear) que cursa con un balance favorable de energía.



La bombilla tiene un filamento muy fino de wolframio (también llamado tungsteno) encerrado en una ampolla de vidrio en la que se ha hecho el vacío o se ha rellenado con un gas inerte, para evitar que el filamento se volatilice por las altas temperaturas que debe alcanzar. Cuando se conecta a la corriente eléctrica, el filamento se calienta por efecto Joule y enrojece hasta ponerse al llamado "rojo blanco", emitiendo luz. Este proceso físico se llama incandescencia.



La cerilla se enciende cuando se frota su cabeza en una superficie de lija. La cabeza de la cerilla contiene un agente oxidante y la superficie de fricción está compuesta generalmente por fósforo rojo, compuestos de azufre y óxido de hierro. Raspando la cerilla sobre la cinta que contiene el fósforo rojo, una pequeña cantidad del mismo se transforma en fósforo blanco que se inflama instantáneamente. El calor generado enciende a su vez los compuestos de la cabeza de la cerilla.



En cuanto a la estrella, en su interior se producen reacciones nucleares de fusión. La reacción de fusión más típica obtiene un núcleo de helio a partir de dos núcleos de hidrógeno. Para que se pueda producir los núcleos de hidrógeno se han de acercar a una distancia extraordinariamente corta venciendo la repulsión eléctrica. Para ello se requiere una temperatura elevadísima como la del interior de nuestro Sol.

A la vista de estos ejemplos de emisión de luz, planteamos el concepto de que *la luz es energía que se propaga desde un foco o fuente luminosa en todas las direcciones*. Establecido este concepto de partida, interesa precisar mejor la naturaleza de la radiación luminosa, más concretamente, interesa saber cual de los dos mecanismos de propagación de la energía que concibe la física (mediante partículas y mediante ondas) ocurre en la luz.

El intento de aclarar este extremo ha sido uno de los grandes retos históricos de la ciencia y el debate acerca de la naturaleza de la luz se extiende desde la antigüedad hasta nuestros días.

ALGUNOS ANTECEDENTES DEL DEBATE EN LA ANTIGÜEDAD

Encontramos las primeras propuestas elaboradas sobre la naturaleza de la luz en la antigua Grecia, como parte de trabajos que se plantearon el tema de la visión. En el siglo VI a. de C. Pitágoras (582 a. de C. - 507 a de C.) planteó que la luz emanaba del ojo en forma de rayos luminosos formados por partículas que se propagan en línea recta y chocan con el cuerpo observado, siendo el acto visual el resultado de ese choque. Un siglo después Platón (427 a. de C - 347 a. de C.) también consideró que nuestros ojos emitían pequeñas partículas de luz que al llegar a

los objetos los hacen visibles. Los atomistas (Demócrito, Leucipo, Epicuro..) también adoptaron una **concepción corpuscular** de la luz, pero en el marco de una teoría de la visión algo más elaborada. Particularmente Demócrito (460 a. de C. - 360 a. de C.) supuso que los cuerpos emitían átomos de distintas formas y tamaños y que estos átomos portaban aspectos de la imagen de los cuerpos. Según esta concepción esos átomos fijan la imagen en los ojos del mismo modo que otros átomos impresionan el olfato.

Poco después Aristóteles (384 a. de C. - 322 a. de C.) hizo una propuesta sobre la visión que, por primera vez, establecía una relación de distinto tipo entre el objeto y la imagen. Podemos considerar dicha propuesta como un cierto precedente de los **modelos ondulatorios**, puesto que, según Aristóteles, podíamos observar los objetos, no porque hubiera movimiento o emisión en ninguno de los dos sentidos, sino mediante una modificación del medio interpuesto entre el ojo y la cosa vista. Aristóteles añadió que si alrededor del ojo se hiciese el vacío completo (es decir, ausencia de todo medio) la visión sería imposible.

NEWTON FRENTE A HUYGENS

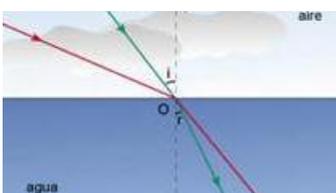
En el siglo XVII, durante el periodo de establecimiento de la física clásica, se inició el verdadero debate sobre la naturaleza de la luz.

Por una parte Newton (1643-1727) escribió un tratado completo de Óptica en el que planteó que la luz estaba compuesta por *una granizada de corpúsculos luminosos, que se propagan en línea recta y atraviesan medios transparentes*. Con este **modelo corpuscular** explicó bastantes comportamientos de la radiación luminosa, destacando el hecho de que prestó una atención especial al **estudio del color**.



Hasta que Newton investigó este tema, se venía considerando que los colores eran el resultado de modificar la luz blanca (más precisamente, del hecho de mezclar lo oscuro con la luz blanca en mayor o menor medida), pero Newton comprobó que el fenómeno era exactamente al revés. En 1666 realizó el experimento de descomposición de la luz en colores al atravesar un prisma y concluyó que la luz blanca está compuesta por todos los colores del arco iris, lo que significaba en su modelo que los corpúsculos de la luz eran de distinto tipo según el color de cada uno. Comprobó también que si, una vez separados los colores, se les hace pasar por un segundo prisma, no se vuelven a descomponer, sino que son homogéneos. Con este modelo corpuscular también explicó el fenómeno de los anillos de colores engendrados por láminas delgadas

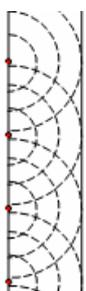
Newton también usó su modelo corpuscular para explicar otros fenómenos del comportamiento de la luz, como la **reflexión** (que interpretó como un rebote de las partículas luminosas) y la **refracción**.



En la refracción aire-vidrio y aire-agua, la luz se desvía acercándose a la dirección normal, por lo que, para explicarla, Newton se vio forzado a proponer que las partículas luminosas aumentan su velocidad cuando pasan de un ambiente poco

denso (como el aire) a otro más denso (como el vidrio o el agua). Lo justificó planteando una atracción más fuerte de las partículas luminosas por el medio denso. Se ha de tener en cuenta que en el instante en que una partícula procedente del aire incide en sobre agua o vidrio, se debería ejercer sobre ella una fuerza opuesta a la componente de su velocidad perpendicular a la superficie y esto debería producir una desviación de la luz contraria a la observada en la luz.

En la misma época en la que Newton hizo estas propuestas, Huygens (1629-1695) formuló una **teoría ondulatoria** de la luz en la que la consideró una onda mecánica semejante al sonido y, por tanto, longitudinal. Para Huygens, la luz (como el sonido) necesitaba un medio para propagarse. Teniendo en cuenta que se propaga por todo el espacio, tuvo que acudir al éter, entendido como un medio que inunda dicho espacio y se deforma al paso de la onda luminosa.



Una de las aportaciones más importantes de Huygens fue un método geométrico destinado a explicar la propagación de las ondas (principio de Huygens). Se basa en el concepto de que cada punto del medio alcanzado por la onda se comporta como un nuevo foco emisor de las vibraciones o foco secundario. Cuando la energía del movimiento ondulatorio alcanza los puntos de un frente de ondas, cada uno de esos puntos se pone a vibrar generando las ondas secundarias. La infinidad de estas ondas secundarias no se percibe y sí se observa en cambio su envolvente. Transcurrido un tiempo igual al periodo (tiempo que tarda cada punto vibrante en hacer una oscilación completa), los movimientos ondulatorios generados en los focos secundarios se han transmitido en el sentido de propagación de la onda hasta una distancia igual a una longitud de onda (separación entre dos puntos que vibran acompasadamente). En ese instante, la línea tangente a los frentes de onda secundarios representa el siguiente frente de ondas y así sucesivamente.



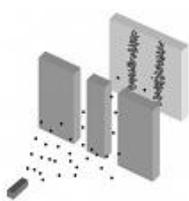
El principio de Huygens predice comportamientos de la luz que la teoría corpuscular de Newton no pudo explicar. Uno de ellos es la **doble refracción** aire-vidrio-aire, en la que la luz se desvía acercándose a la dirección normal al pasar del aire al vidrio y recupera la dirección inicial al volver al aire. Otros ejemplos de comportamientos que se pueden interpretar de forma satisfactoria usando el principio de Huygens son la **difracción** y las **interferencias luminosas**, cuya interpretación desarrollamos en el documento dedicado al estudio de las ondas mecánicas.

En aquella época no se podían obtener mediciones precisas de la velocidad de la luz en diversos medios. Tampoco se prepararon montajes experimentales con rendijas de un tamaño adecuado para estudiar su difracción, ni para generar y observar interferencias luminosas. Todo esto, unido al éxito rotundo que alcanzó la mecánica de Newton, contribuyó a dejar durante bastante tiempo en un segundo término la teoría ondulatoria de Huygens sobre la luz.

RECUPERACIÓN Y DESARROLLO DEL MODELO ONDULATORIO

Durante el siglo XIX la física recuperó y desarrolló fructíferamente el modelo ondulatorio. Uno de los primeros científicos que hizo aportaciones importantes fue Young (1773-1829), que explicó casi todos los fenómenos conocidos sobre la luz suponiendo que era una onda longitudinal. Young descubrió la difracción luminosa y realizó

en 1801 un experimento crucial (el **experimento de las dos rendijas**) en el que mostró la difracción y las **interferencias luminosas**

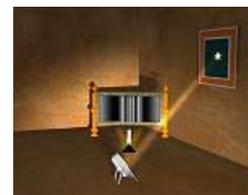


Tal como indica el dibujo adjunto, si la luz fuera un chorro de partículas, después atravesar una pared en la que se han hecho dos rendijas o dos orificios, debería seguir su camino por las zonas abiertas detrás de cada rendija. En consecuencia, si se coloca al otro lado una pantalla se tendrían que observar en ella dos zonas iluminadas reproduciendo la forma de las rendijas.

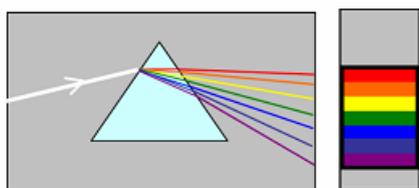


En cambio, si la luz fuera una onda y las rendijas tuvieran un tamaño igual o inferior a la longitud de onda, se debería producir difracción en cada rendija. Al otro lado de la cartulina se superpondrían dos ondas secundarias, una procedente de cada orificio. La superposición de dichas ondas debería producir interferencias, cuyo resultado visible sería la aparición en la pantalla de franjas iluminadas y zonas oscuras, situándose la zona de máxima iluminación exactamente enfrente del punto medio entre las dos rendijas.

En el experimento Young utilizó un estrecho haz de luz procedente de un pequeño agujero y lo dirigió hacia una tarjeta de una anchura de unos 0.2 mm . La tarjeta se mantenía paralela al haz que penetraba horizontalmente después de orientarlo con un espejo. El haz de luz tenía una anchura ligeramente superior al ancho de la tarjeta divisoria y, cuando ésta se posicionaba correctamente, era dividido en dos, cada uno pasando por un lado distinto de la pared divisoria. El resultado de la superposición de estos dos haces se podía ver proyectado sobre una pared en una habitación oscurecida. Young realizó el experimento en una reunión de la Royal Society mostrando el patrón de interferencias que concuerda con la teoría ondulatoria de la luz.



Young también explicó la **dispersión** de luz blanca en colores mediante el modelo ondulatorio. Suponiendo que cada color de la luz tiene una frecuencia y una longitud de onda característica en cada medio.



En el vacío (y muy aproximadamente en el aire) todas las radiaciones luminosas se propagan a la misma velocidad. Pero en los demás medios no ocurre lo mismo, puesto que, como planteó Young, cada color tiene una longitud de onda, λ , distinta (mayor longitud de onda supone mayor velocidad). Por ejemplo en el vidrio, la luz roja ($\lambda = 750\text{ nm}$) tiene mayor velocidad que la luz violeta ($\lambda = 390\text{ nm}$), por lo que, al aplicar el principio de Huygens a la refracción aire-vidrio, se deduce que el rayo de luz violeta se desvía más que el de luz roja.

Aplicando estos conceptos Young explicó los anillos de Newton (los interpretó como resultado de la interferencia de ondas luminosas) y formuló una teoría sobre el arco iris.

La siguiente aportación destacada sobre la difracción y las interferencias luminosas la hizo Fresnel (1788-1817). Escribió una memoria sobre la **difracción** y la presentó en 1818 a la Academia Francesa de Ciencias de París en el marco de un concurso científico. Entonces la teoría ondulatoria seguía siendo rechazada por amplios sectores de la

comunidad científica y en el jurado se encontraba Poisson (1781-1840), partidario de la teoría corpuscular. Poisson usó las ecuaciones de la teoría de Fresnel para demostrar que implicaban que se debía formar un punto brillante en el centro del patrón de difracción de un disco circular opaco (en la región de sombra) cuando dicho disco se ilumina con luz monocromática (de un sólo color). Su intención era que este resultado no intuitivo ayudase a derribar la teoría.



Pero resultó exactamente lo contrario. Dominique Arago verificó experimentalmente la predicción, llamándose desde entonces el punto iluminado punto de Arago o punto de Poisson. Como el punto brillante se produce dentro de la sombra geométrica del objeto, ningún modelo corpuscular puede explicarlo. En cambio, el modelo ondulatorio de la luz, predice que ahí se ha de producir interferencia constructiva de las luces difractadas por cada uno de los puntos del borde del disco. Por su trabajo se otorgó a Fresnel el premio de la Academia Francesa de Ciencias de París. Posteriormente, en 1823, fue nombrado miembro de la Academia y en 1825 pasó a ser miembro de la Royal Society de Londres.

Juntando el dedo pulgar con otro dedo de la misma mano hasta que las yemas de ambos casi se toquen y mirando a través de esa rendija hacia un foco de luz muy potente, se puede entrever la difracción por la rendija. Para observar interferencias se necesita una rejilla de difracción (se puede construir rayando con una punta de diamante

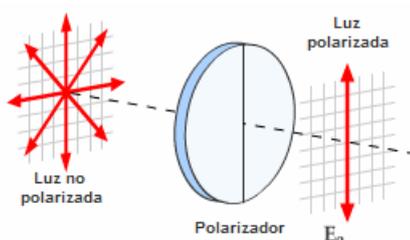


en un vidrio o un plástico adecuado puntos o líneas paralelas muy finas y próximas). En el laboratorio disponemos de redes de difracción y de un puntero de luz láser. Con este material los

estudiantes observan nítidas figuras de interferencias en una pantalla colocada al otro lado de la rejilla.

Después de explicar la dispersión en colores, la difracción y las interferencias, el modelo ondulatorio interpretó también la **polarización** de la luz. Los hallazgos encontrados en las investigaciones sobre este fenómeno obligaron además a precisar que las ondas luminosas tienen que ser de **naturaleza transversal** y no longitudinal como se venía considerando.

En una onda no polarizada la vibración oscila en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación. Partiendo de ese estado, la onda se polariza si por algún motivo (por ejemplo, después de atravesar un cristal) pasa a oscilar sólo en un determinado plano, al que se denomina plano de polarización. En su época



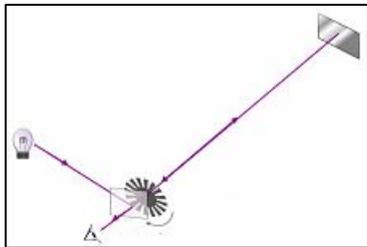
Huygens y Newton observaron la polarización de la luz en cristales de calcita, pero no supieron como interpretarla. Al observarla Newton dijo: "*Cada rayo de luz tiene dos lados opuestos*". Huygens también se fijó en lo que le ocurre a la luz al atravesar la calcita, pero le pasó desapercibido que el hecho delata que tiene que ser una onda transversal y no longitudinal como él creía.

Fue también Fresnel uno de los primeros que estudió en detalle fenómenos que manifiesta la luz polarizada. Comprobó, en particular, que dos rayos polarizados ubicados en un mismo plano se interfieren, pero en cambio no lo hacen, si están polarizados entre sí, cuando se encuentran perpendicularmente. Esto le invitó a pensar que en un

rayo polarizado debe ocurrir algo en la dirección perpendicular a la de propagación. Consideró que ese algo tiene que ser la propia vibración luminosa. En su modelo ondulatorio consideró a la luz una onda transversal.

Por otra parte, a principios del siglo XIX Malus (1775-1812) había realizado varios experimentos para verificar aspectos de la teoría ondulatoria de Huygens y la reescribió en forma analítica. En el transcurso de sus trabajos también estudió detalladamente la polarización y en 1808 descubrió que también se produce en la reflexión, poniendo en evidencia que no era un fenómeno inherente a medios cristalinos. Su descubrimiento de la polarización de la luz por la reflexión fue publicado en 1809 y en seguida desarrolló también una teoría de la doble refracción de la luz en cristales, que publicó en 1810.

Otra aportación importante sustentada en la teoría ondulatoria de la luz fueron los estudios experimentales dedicados a medir su velocidad en distintos medios. En 1849 Fizeau (1819-1856) desarrolló un método para obtener dicha velocidad con elevada precisión. El montaje inicial fue perfeccionado un año más tarde por Foucault (1819-1868).



En el montaje original de Fizeau se enviaba un rayo de luz sobre un espejo fijo parcialmente reflectante que lo desviaba hacia otro espejo secundario fijo situado a una distancia considerable. Pegado al primer espejo había un disco estroboscópico rotatorio ranurado. En el tiempo que tarda la luz en viajar hasta el segundo espejo y volver, el disco se mueve algo, de forma que la luz al regresar se refleja con un ángulo ligeramente diferente. Midiendo este ángulo Fizeau determinaba la velocidad con la que la luz efectúa su recorrido. En el montaje perfeccionado por Foucault se sustituyó el disco y el espejo reflectante por un espejo giratorio y se colocó el segundo espejo a una distancia aproximada de 35 km. Los experimentos de Fizeau-Foucault obtuvieron valores bastante precisos de la velocidad de la luz y mostraron inequívocamente que dicha velocidad es menor en el agua que en el aire, al contrario, de lo predicho por la teoría corpuscular.

Otra aportación importante de Fizeau fue su descubrimiento, independientemente de Doppler (1803-1853), del llamado efecto Doppler, que consiste en la variación de la frecuencia recibida de una onda respecto de la emitida, cuando hay un movimiento relativo entre el receptor y el emisor. En la página dedicada al estudio de las ondas mecánicas explicamos con detalle este fenómeno, para cuya interpretación se requiere considerar el modelo ondulatorio de la luz.

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

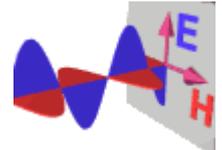
Acabamos de ver que a lo largo del siglo XIX se realizaron importantes avances en el desarrollo del modelo ondulatorio de la luz. Estos avances encontraron una brillante e inesperada rúbrica a finales del siglo, momento en el que, utilizando las ecuaciones de Maxwell (1831-1979), se logró la integración de los fenómenos ópticos, eléctricos y magnéticos en un mismo marco teórico. Resultó que las leyes que Maxwell había obtenido a modo de síntesis del comportamiento eléctrico y magnético de la materia pudieron ser combinadas, deduciéndose de dicha

combinación una ecuación de ondas. Esto proporcionó un mecanismo de propagación al campo electromagnético y se acuñó el concepto de ondas electromagnéticas.

Maxwell obtuvo la expresión que calcula la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas, c :

$$c = \frac{1}{\mu \cdot \epsilon}$$

En esta expresión p y h son constantes que representan propiedades eléctricas y magnéticas del medio donde avanza la onda electromagnética. Cuando Maxwell sustituyó en esta ley los valores de las constantes obtuvo que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas debía ser igual a $3 \cdot 10^8$ m/s, el mismo valor que se había medido de la velocidad de la luz en el aire (muy próximo al valor que tiene en el vacío) por otros procedimientos. Maxwell interpretó este resultado como una indicación clara de que la luz debía ser una onda electromagnética. Dijo: *"La luz consiste en ondas transversales del mismo medio, lo cual constituye la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos"*.



Años después, en 1887, las ondas electromagnéticas fueron producidas y detectadas por Hertz (1857-1894), siguiendo paso a paso las indicaciones de Maxwell. Esto consolidó definitivamente a los ojos de la comunidad científica la naturaleza electromagnética de la luz.

Frecuencia (ciclos/s)	Tipo de luz	Longitud de onda (m)
10^{22}	Rayos gamma	10^{-14}
10^{21}		10^{-13}
10^{20}		10^{-12}
10^{19}	Rayos X	10^{-11}
10^{18}		10^{-10}
10^{17}		10^{-9}
10^{16}	Luz ultravioleta	10^{-8}
10^{15}	Luz visible	
10^{14}	Luz infrarroja	10^{-6}
10^{13}		10^{-5}
10^{12}		10^{-4}
10^{11}		10^{-3}
10^{10}	Microondas	10^{-2}
10^9		10^{-1}
10^8		1
10^7	Radiofrecuencia	10
10^6		10^2
10^5		10^3
10^4		10^4
10^3	Ondas de radio largas	10^5
10^2		10^6

Una propiedad de la luz que se deriva del hecho de ser una onda electromagnética es la ampliación del **espectro luminoso** mucho más allá de los límites a los que se extiende la luz visible por nuestros ojos. En su experimento Hertz mostró que para generar una onda electromagnética (es decir, para emitir luz) se puede usar un circuito eléctrico oscilante que produzca un movimiento vibratorio de los electrones. La frecuencia de la onda electromagnética que se emite es la misma frecuencia de oscilación del circuito. Modificando esa frecuencia de oscilación del circuito se pueden enviar y recibir ondas electromagnéticas en un rango de frecuencias y longitudes de onda que se extiende mucho más allá de las que perciben nuestros ojos.

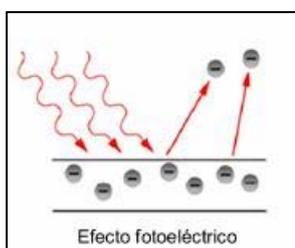
En la tabla adjunta se dan los intervalos de longitud de onda y de frecuencia correspondientes a diversos tipos de onda electromagnética. Como se observa, el espectro de luces que pueden ver nuestros ojos solo cubre una pequeñísima parte (longitud de onda entre $4 \cdot 10^7$ m, violeta, y $7 \cdot 10^7$ m, rojo) del espectro total de las ondas electromagnéticas.

El conocimiento de este hecho propició avances espectaculares en el campo de la investigación científica y tecnológica. El resultado del experimento de Hertz había dejado abierto el campo de la transmisión de señales a distancia y en el vacío (telegrafía sin hilos, radio, TV, radar) y la apertura de las ventanas infrarroja, de rayos X y ultravioleta permitió un acceso nuevo al conocimiento de muchos fenómenos que hasta entonces eran "invisibles" y

a la producción de aplicaciones de gran calado en diversos campos (industria, comunicaciones, medicina, astronomía,..).

FOTONES

La teoría electromagnética de Maxwell logró integrar las teorías anteriores sobre la electricidad, el magnetismo y la óptica, e, inicialmente, pareció que podía terminar el debate histórico acerca de la naturaleza de la luz. Pero no hubo que esperar mucho para que se reabriera el mismo, porque ocurrió curiosamente que en el curso del experimento en el que Hertz produjo y recibió por primera vez ondas electromagnéticas, se observó un fenómeno, llamado efecto fotoeléctrico, para cuya explicación necesitó Einstein (1879-1955), poco después, volver a plantear un modelo corpuscular de la luz.



El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un metal cuando se ilumina con luz de una frecuencia suficientemente elevada. Hertz lo observó de una forma algo indirecta al realizar su experimento en 1887 y dejó constancia de él, pero no le dio demasiada importancia. Un año más tarde Hallwachs (1859-1922) y sus colaboradores lo comprobaron iluminando con luz ultravioleta una lámina metálica conectada a un electroscopio cargado negativamente. Poco tiempo después fue interpretado por Lenard (1862-1947), que fue quien dio nombre al fenómeno y lo estudió con mayor detalle. Por sus investigaciones sobre los "rayos catódicos" (haces de electrones emitidos por el efecto fotoeléctrico desde un cátodo metálico) Lenard obtuvo el premio Nobel de física en 1908.

El efecto fotoeléctrico es solo uno de varios fenómenos sobre procesos de interacción entre la luz y la materia que no tienen explicación si se aplica a la luz un modelo ondulatorio. En el año 1900, tratando de explicar uno de estos hechos (la llamada radiación del cuerpo negro), Planck (1858-1947) formuló la hipótesis de que la energía que puede absorber o emitir la materia en forma de radiación electromagnética es siempre múltiplo de una cantidad a la que llamó "quantum" o "cuanto de energía" (operativamente, la ley de Planck dice que la energía de un "quantum" es $E = h \cdot \nu$ siendo ν la frecuencia de la radiación luminosa y h una constante universal llamada constante de Planck ($h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$).

En 1905 (el mismo año en el que publicó el artículo principal de relatividad especial), Einstein dio un paso más en la hipótesis de Planck y planteó que los "cuantos" de energía no se han de considerar sólo cuando un cuerpo absorbe o emite radiación electromagnética, sino que constituyen la propia radiación (es decir, la luz) cuando ésta se propaga. Con esta hipótesis explicó satisfactoriamente el efecto fotoeléctrico. Fue por el esclarecimiento del efecto fotoeléctrico (no por la teoría de la relatividad) por lo que Einstein obtuvo el premio Nobel de física en 1921.

Según la hipótesis de Einstein-Planck, la energía que transporta la luz no está uniformemente distribuida en el espacio (como correspondería a una onda), sino concentrada en cuantos de energía sub-microscópicos a los que más tarde se llamó **fotones**. Atendiendo a la fórmula de Planck, la energía de un fotón es $E = h \cdot \nu$ y la energía de una cierta cantidad de luz, con independencia de que esa luz esté viajando, siendo absorbida o emitida, es:

$$E = N \cdot h \cdot \nu \text{ (siendo } N \text{ el número de fotones)}$$

Es decir, cada fotón tiene una energía proporcional a la frecuencia de vibración del campo electromagnético y la energía total de la radiación electromagnética es la resultante de sumar las energías individuales de los fotones que la componen. En 1916 Millikan (1868-1953), más conocido por el experimento, llamado de la "gota de aceite", en el que midió la carga del electrón, realizó experimentos destinados a determinar la constante de Planck. Es dichos experimentos midió la frecuencia de la luz y la energía de los electrones liberados en el efecto fotoeléctrico. Los resultados mostraron que la energía cinética de los fotoelectrones coincidía exactamente con la dada por la fórmula de Einstein-Planck. Millikan fue galardonado con el premio Nobel de física en 1923 *por sus trabajos para determinar el valor de carga del electrón y el efecto fotoeléctrico*.

Para estimar el orden de magnitud del fotón, vamos a considerar la luz procedente del Sol. Se le puede atribuir una longitud de onda media, λ , de 550nm ($550 \cdot 10^{-9} \text{ m}$) y, por tanto, una frecuencia media de $1.83 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$ ($\nu = c/\lambda$ siendo c la velocidad de la luz, $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). Esto significa que la energía de un fotón de luz solar medio es $E = 1.17 \cdot 10^{-48} \text{ J}$. La luz solar que llega a la Tierra tiene una intensidad aproximada de 1800W/m^2 . Por lo tanto, la radiación solar trae aproximadamente nada menos que $1.54 \cdot 10^{51}$ fotones por metro cuadrado y por segundo.

Después de la formulación de la hipótesis de Planck-Einstein, el listado de fenómenos relativos a los procesos de interacción entre la luz y la materia que no se pueden explicar utilizando el modelo ondulatorio de luz y, en cambio, son fácilmente interpretables usando dicha hipótesis aumentó de forma apreciable. Entre ellos, mencionamos el ya comentado efecto fotoeléctrico, la radiación del cuerpo negro, el efecto Compton, la producción de rayos X, los espectros discontinuos de absorción y emisión de los átomos, los procesos de aniquilación de partículas produciendo fotones, etc. En un documento accesible desde nuestra web exponemos algunos de estos hechos y su interpretación en base al nuevo modelo corpuscular de la luz.

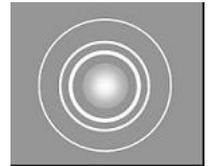
DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA

Con la hipótesis de Einstein-Planck, el debate acerca de la naturaleza de la luz recobró todo el interés y lo hizo en medio de una física de nuevo en crisis. La crisis era propiciada en parte por estos hallazgos, dado que en el marco de la física clásica el modelo ondulatorio (según el cual consiste en la propagación del campo electromagnético) y el modelo corpuscular de la luz (según el cual está constituida por fotones) son incompatibles. Y, sin embargo existía la conciencia clara de que algo o mucho de ambos se debía de mantener, puesto que, como hemos visto, el modelo ondulatorio de Maxwell interpreta satisfactoriamente una gran cantidad de fenómenos del comportamiento luminoso (reflexión, refracción, descomposición en colores, difracción, interferencias, efecto *Doppler*, polarización,..) y el modelo corpuscular resulta necesario para interpretar un número creciente de nuevos hechos como el efecto fotoeléctrico, el efecto *Compton*, la radiación del cuerpo negro,..

En 1924 se produjo un avance fundamental que posibilitó una integración de los dos modelos en un modelo coherente e impulsó el desarrollo de la nueva física cuántica. El físico francés de De Broglie (1892-1987), tras una larga meditación sobre la estructura de las grandes teorías físicas y obsesionado por el problema de los cuantos,

tuvo la intuición de que el doble aspecto corpuscular y ondulatorio de la luz descubierto por Einstein debería reflejar una ley general de la naturaleza, extensible a todas las partículas materiales. En su tesis doctoral planteó una hipótesis mediante la que atribuyó a toda partícula con impulso, \mathbf{p} (para una partícula de masa, m , y velocidad, \mathbf{v} , $\mathbf{p}=m\mathbf{v}$), una onda asociada, cuya longitud de onda es $\lambda = h/p$ (h es la constante de Planck). Por esta aportación De Broglie obtuvo el Premio Nobel de Física en 1929. La entonces incipiente física cuántica generalizó poco después esta hipótesis para considerar que toda entidad física (las partículas y también los fotones) tiene una naturaleza dual, lo que significa que su comportamiento global presenta dos aspectos complementarios: ondulatorio y corpuscular. Dependiendo del experimento predomina uno de estos dos aspectos.

Así por ejemplo, un electrón tiene masa y cantidad de movimiento (propiedades corpusculares), pero también una longitud de onda (propiedad ondulatoria). En una colisión con otro electrón, predomina el comportamiento corpuscular de ambos, pero también ocurre que un haz de electrones se difracta cuando pasa por un pequeño orificio circular de tamaño comparable a su longitud de onda. De hecho, si el haz de electrones se hace incidir en una pantalla situada detrás del orificio, dibuja una figura típica de interferencias (como a la mostrada a la derecha) igual que lo hace la luz.



También dos haces de electrones pueden producir interferencias y así se comprueba en un experimento consistente en hacerlos pasar a través de una rendija doble o múltiple. La rendija, en este caso, puede ser una red iónica en la que la distancia entre cada dos núcleos positivos es del orden de magnitud de la longitud de onda que tienen los electrones a las velocidades típicas que portan en estos experimentos. Las interferencias se producen aunque los electrones se lancen de uno en uno hacia las rendijas, lo cual indica que el resultado observado en la pantalla no es fruto de un proceso estadístico producido por la incidencia de un número elevado de electrones, sino que realmente cada electrón interfiere consigo mismo.

El concepto de **dualidad onda-partícula** es una ley general de la mecánica cuántica que se aplica sin excepción a todas las entidades, incluidos los fotones. Para la física actual, los fotones son las entidades individuales (de masa nula) que constituyen la luz. Predomina su naturaleza corpuscular, por ejemplo, cuando colisiona un fotón con otro fotón o, como ocurre en el efecto fotoeléctrico, cuando los fotones interactúan con partículas (electrones, protones...). En cambio, un haz luminoso (un haz de fotones) manifiesta un comportamiento ondulatorio (onda electromagnética) cuando, por ejemplo, se difracta, se polariza o produce interferencias luminosas.

En consecuencia, el estado actual del debate se puede resumir expresando que para la física moderna **la luz tiene naturaleza dual, corpuscular y ondulatoria**. Las entidades que conforman la luz (fotones) no son, en este aspecto, diferentes de las partículas materiales.

A los experimentos, materiales y referencias citadas en este documento se accede desde la página dedicada al estudio de Ondas mecánicas (<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Luz/luz.htm>) dentro de la web del Departamento de Física y Química del IES "Leonardo Da Vinci" de Alicante (<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/fisica.htm>)