

DEBATE HISTÓRICO SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ

GENERACIÓN DE LUZ

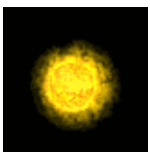
Consideramos una bombilla tradicional, una cerilla y una estrella. Son tres ejemplos de fuentes de luz propia y al analizar su comportamiento se observa que tienen en común el hecho de que en todas ellas ocurre un proceso (físico, químico, nuclear) que cursa con un balance favorable de energía.



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. Al raspar 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



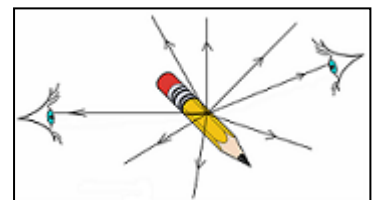
En cuanto a la estrella, en su interior se producen reacciones nucleares de fusión. La reacción de fusión más típica obtiene un núcleo de helio a partir de dos núcleos de hidrógeno. Para que se pueda producir los núcleos de hidrógeno se han de acercar a una distancia extraordinariamente corta venciendo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

A la vista de estos ejemplos planteamos el concepto de que **la luz es energía que se genera en un foco o fuente luminosa**, donde tiene lugar un proceso que puede ser físico, químico, nuclear, etc.



Por otra parte, al reflexionar sobre el hecho de que cualquiera de estos focos de luz (por ejemplo, la estrella) puede ser visto simultáneamente por muchas personas situadas en diferentes lugares, entendemos que **la luz se propaga en línea recta en todas las direcciones**.

Ahora bien, también ocurre que podemos ver el resto de objetos (aunque no emiten luz propia) cuando son iluminados, y que los vemos de un color que generalmente no coincide con el de la luz que los ilumina. Esto significa que dichos objetos, cuando son iluminados, emiten luz, que no es idéntica a la que les ilumina, y que también se propaga en todas las direcciones. Se denomina **fuentes secundarias de luz**.



INVISIBILIDAD DE LA LUZ



Aunque la luz que emite cualquier fuente se propaga desde ella en todas las direcciones, al mirar a su alrededor, no se ve dicha luz, sino que únicamente se ve a la fuente emisora. Así, por ejemplo, al mirar por la noche hacia el firmamento, no se ve todo el cielo iluminado, sino únicamente los puntos luminosos que representan a las estrellas.

La fotografía adjunta, la tomamos en una exposición sobre el trabajo de Jim Campbell, un artista e ingeniero electrónico pionero en el uso de la tecnología lumínica. Con motivo del Año Internacional de la Luz, en la primavera de 2015 se celebró esta exposición en el Espacio Fundación Telefónica en Madrid. En este montaje, el artista había formado hileras de bombillas dentro de una habitación en la que la única luz era la que emitían las propias bombillas. Las paredes, el techo y el suelo del recinto eran completamente opacos, de modo que dentro de la habitación no había ningún otro objeto que actuara como fuente secundaria. Los visitantes podíamos pasear entre las hileras de bombillas, colgadas del techo y situadas aproximadamente a la altura de nuestro pecho. Como se ve, en estas condiciones se ven únicamente esas fuentes primarias de luz (las bombillas encendidas), las cuales dibujan una especie de autopistas que profundizan hacia nuestro horizonte



Reflexionando a partir de éstos y otros ejemplos similares, se concluye que **la luz no se ve**, mientras que **sí se ven los focos emisores de luz**.



Esta invisibilidad de la luz y el hecho de que sí se ven, en cambio, los focos primarios y secundarios, se puede poner en evidencia en el laboratorio usando una fuente de luz láser dirigida hacia una pantalla blanca. El punto de la pantalla se ve (a la derecha de la fotografía) y el potente rayo de luz láser es invisible (aunque se oscurezca por completo el laboratorio) tanto en el aire como al atravesar el agua.

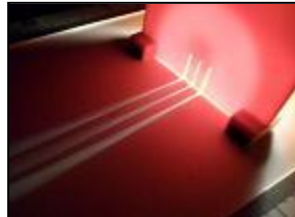


Ahora bien, este mismo rayo se puede hacer "visible" interponiendo en su camino cualquier material que disperse la luz láser en todas direcciones, es decir, uno cuyas partículas actúen como focos secundarios (entre todas dibujan el recorrido del rayo). En el aire esto se puede conseguir muy fácilmente esparciendo polvo o ceniza (podemos, por ejemplo, quemar un papel y agitarlo). Dentro del agua el rayo se hace visible después de disolver unas gotas de leche.

Un experimento similar consiste sostener una linterna dando la espalda a otra persona y apuntar con ella hacia una zona despejada de objetos. Podemos preguntar a esa persona si tenemos la linterna encendida o apagada. Aunque

sea de noche (si no apuntamos al suelo) la persona para averiguarlo, se verá obligada a pedirnos que enfoquemos con la linterna hacia algún objeto material. Alternativamente, podemos esparcir polvo delante de ella.

Teniendo en cuenta estos hechos, en el laboratorio, se usa habitualmente el banco óptico para mostrar las



trayectorias que siguen los rayos luminosos en diferentes situaciones. Los estudiantes interponen pantallas provistas de rendijas y encima del banco óptico se observan las trayectorias de la luz. Por ejemplo, con una rendija se dibuja encima del banco óptico el recorrido rectilíneo de un rayo (foto a la izquierda), con 3 rendijas se ven 3 rayos paralelos encima del banco óptico (foto a la derecha), etc.

A modo de resumen de este conjunto de conceptos, enunciamos que **la luz es energía que se emite desde un foco o fuente luminosa y se propaga en línea recta en todas las direcciones**. Aunque **la luz no se ve, sé se ven las fuentes que la emiten** (primarias o secundarias) y ello nos permite visualizar las trayectorias de los rayos luminosos.

Establecidos estos conceptos básicos, interesa precisar la naturaleza de la radiación luminosa, más concretamente, interesa saber cuál de los dos modelos 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.

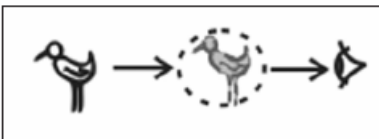
ANTECEDENTES DEL DEBATE EN LA ANTIGÜEDAD

Encontramos las primeras aportaciones elaboradas sobre la naturaleza de la luz en la antigua Grecia, como parte de propuestas que se plantearon al estudiar el **problema 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. Demócrito (460 a. de C. 360 a. de C.) supuso que los cuerpos emitían átomos de distintas formas y tamaños, y que estos átomos

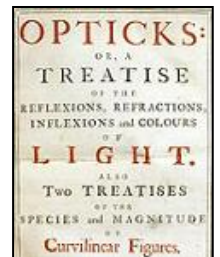
portaban aspectos de la imagen de los cuerpos. Según esta concepción esos átomos fijan la imagen en los ojos del mismo modo que otros átomos impresionan el olfato.

Poco después Aristóteles (384 a. de C. - 382 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, coincidiendo con el periodo de establecimiento de la física clásica, se inició de forma expresa el debate sobre la naturaleza de la luz.

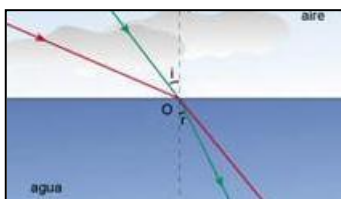
Por una parte **Newton** (1643-1727) escribió un tratado completo de Óptica (Título en español: *Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz*) en el que planteó que la luz estaba compuesta por *una granizada de corpúsculos luminosos, que se propagan en línea recta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



Hasta que Newton investigó este tema, se había considerado 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.

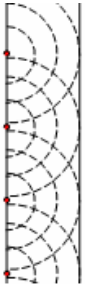
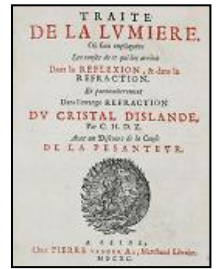


Newton también usó su modelo corpuscular para explicar otros fenómenos del comportamiento de la luz, como la **reflexión** (que interpretó como un rebote de las partículas luminosas) y la **refracción**.

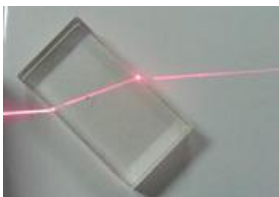


En la refracción aire-vidrio y aire-agua, la luz se desvía acercándose a la dirección normal, por lo que, para explicarla, Newton se vio forzado a proponer que las partículas luminosas aumentan su velocidad cuando pasan de un ambiente poco denso (como el aire) a otro más denso (como el vidrio o el agua). 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, tal como se observa en la fotografía adjunta, tomada por alumnos en nuestro Laboratorio. Acerca de este proceso, en la [versión digital de este tema](#) se aporta la deducción de la ley de la refracción o ley de Snell y también se vincula una animación de Educaplus, que representa procesos de doble refracción de la luz entre tres medios diferentes.

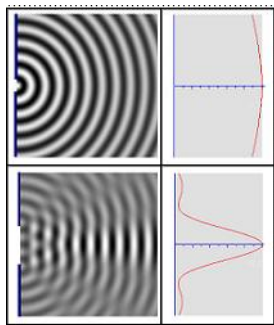
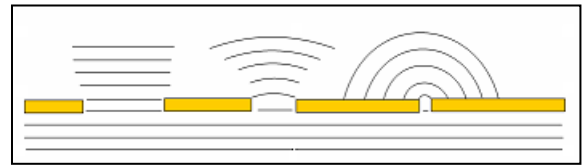
Otros ejemplos de comportamientos que se pueden interpretar de forma satisfactoria usando el principio de Huygens son la difracción y las interferencias luminosas. Pero, en aquella época no se podían obtener mediciones precisas de la velocidad de la luz en diversos medios, ni tampoco se conocía la difracción ni las interferencias luminosas. Todo ello, 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.

DIFRACCIÓN E INTERFERENCIAS LUMINOSAS. TRABAJOS DE YOUNG Y DE FRESNEL

Durante el siglo XIX la física recuperó y desarrolló fructíferamente el modelo ondulatorio de la luz. Uno de los primeros científicos que hizo aportaciones importantes fue Young (1773-1829), que explicó casi todos los fenómenos conocidos entonces 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 conjuntamente la difracción y las **interferencias luminosas**.

Antes de desarrollar estas aportaciones de Young vamos a recordar algunos aspectos básicos sobre la difracción y las interferencias de las ondas.

Al interponer en el camino de una onda plana una barrera con una abertura, las vibraciones procedentes de los puntos que están a ambos lados de la abertura no pueden avanzar. Como consecuencia de ello, detrás de la barrera los frentes de onda dejan de ser planos y adquieren una forma que puede ser más o menos curvada (difracción).

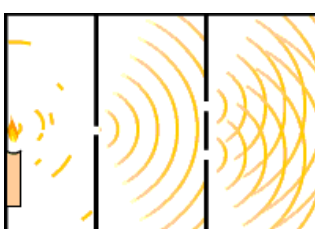
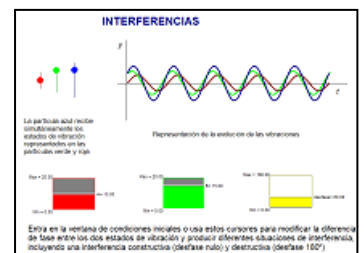


Los dibujos adjuntos se han realizado usando el programa gratuito [Ondas 2.2](#), del profesor Pedro Rodríguez Porca) y muestran la mayor o menor difracción que se puede producir dependiendo del tamaño de la rendija en comparación con la longitud de onda. Este grado mayor o menor de difracción se debe a que, de acuerdo con el **principio de Huygens**, detrás de la rendija lo que se obtiene es el envolvente de las ondas que proceden de los focos secundarios que caben por la abertura. En el ejemplo mostrado más arriba, la rendija tiene un tamaño igual a la longitud de onda, con lo que la difracción

es total y la intensidad recibida en la pantalla disminuye lentamente desde un máximo situado enfrente de la rendija. En el otro ejemplo (debajo), el tamaño de la rendija es mayor que la longitud de onda (aproximadamente igual al triple). En este caso, la difracción sólo es muy apreciable cerca de cada uno de los bordes y a medida que nos alejamos de la rendija se observan perfiles de frentes de onda casi planos del tamaño de su abertura. Las ondas difractadas en las proximidades de cada borde se amortiguan y por ello la intensidad decae bruscamente desde el máximo.

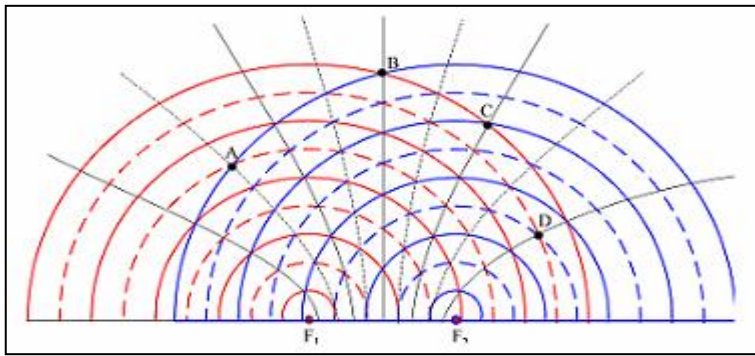
Por otro lado, cuando dos o más ondas se superponen en un determinado punto del medio por el que se propagan, se produce la interferencia. Si las dos ondas llegan a ese punto en fase, su superposición produce una vibración cuya intensidad es igual a la suma de cada una de ellas y se dice que la interferencia es constructiva. Por el contrario, si llegan en oposición de fase, su superposición implica una vibración cuya intensidad es igual a la diferencia entre ellas (podría ser nula) y se dice que la interferencia es destructiva.

Para practicar este concepto, en la [versión digital de este tema](#) aportamos una animación *Modellus* interactiva, que representa dos vibraciones armónicas (partículas de color rojo y verde) y su superposición (azul). Se pueden modificar las amplitudes de las dos vibraciones y el desfase entre ellas, comprobando cómo afecta esa modificación a la vibración que resulta de su superposición.



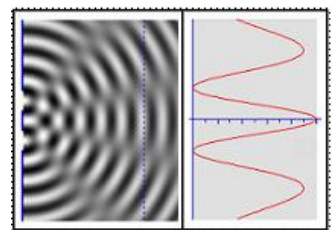
Con estos conceptos en la mano, interesa considerar una forma particular de producir interferencias, que consiste en hacer incidir una onda sobre una pared con dos aberturas de un tamaño igual o inferior a la longitud de onda. Tal como recrea el dibujo adjunto (en la red, es un dibujo animado procedente de Wikipedia), detrás de cada abertura se produce difracción y al otro lado de la pared se superponen las dos ondas secundarias que proceden de cada rendija, dando lugar a interferencias constructivas y destructivas.

A la izquierda se representa formalmente esta situación. Las líneas de color continuas del esquema señalan puntos en concordancia de fase con cada foco (situado en cada rendija) y las líneas discontinuas a puntos en oposición de fase con él. A los puntos como B, C o D las ondas rojas (procedentes de F1) llegan en fase con las ondas azules (procedentes de F2) mientras que a puntos como el A, las ondas rojas llegan en oposición de fase con las azules. Así se delimitan unas zonas donde se produce interferencia constructiva (se representan por líneas negras de trazo continuo) y otras en las que se produce interferencia destructiva (representadas por líneas negras de trazo discontinuo)

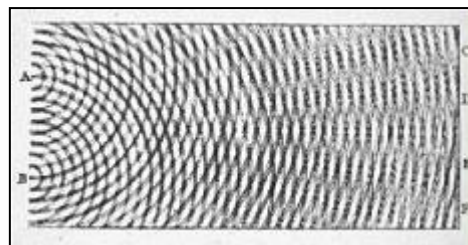


interferencia destructiva (representadas por líneas negras de trazo discontinuo)

En las figuras adjuntas se ha representado este mismo proceso con el programa Ondas 2.2. Como se observa, la distribución de la intensidad que se recibe en una pantalla situada a una cierta distancia de las rendijas resulta con una sucesión en la que se alternan máximos y mínimos, situándose el máximo de mayor intensidad exactamente enfrente del centro geométrico entre las dos rendijas. Por tanto, si el experimento se realiza con luz y esta se comporta como una onda, en la pantalla se tendrá que obtener una serie de franjas iluminadas y oscuras, con la franja de mayor iluminación enfrente del centro geométrico entre las dos rendijas.

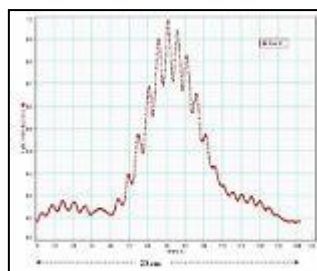


Esto fue lo que mostró Young en el experimento de las dos rendijas, que realizó en una reunión de la Royal Society. Hizo que un espejo dirigiera un delgado rayo de luz solar en un cuarto oscuro hacia una tarjeta de una anchura de unos 0.2 mm (para conseguirlo utilizó un espejo para reflejar el haz de luz solar e hizo que un asistente se cerciora de que el espejo lo dirigiera apropiadamente). Como el haz de luz tenía una anchura ligeramente superior al ancho de la tarjeta divisoria, cuando ésta se posicionaba correctamente, era dividido en dos, cada uno pasando por un lado distinto de la pared divisoria. El resultado, que se puede ver en una pantalla o proyectado sobre una pared en la habitación oscurecida, mostró el patrón de franjas de interferencia, con lo que evidenció simultáneamente la difracción y las interferencias luminosas.



Recreación del experimento de Young y dibujo original del propio Young en 1807. *(Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts)*

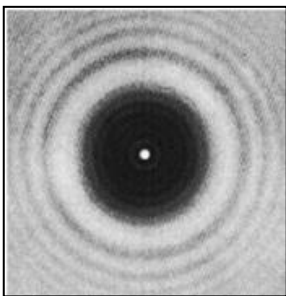
unos 0.2 mm (para conseguirlo utilizó un espejo para reflejar el haz de luz solar e hizo que un asistente se cerciora de que el espejo lo dirigiera apropiadamente). Como el haz de luz tenía una anchura ligeramente superior al ancho de la tarjeta divisoria, cuando ésta se posicionaba correctamente, era dividido en dos, cada uno pasando por un lado distinto de la pared divisoria. El resultado, que se puede ver en una pantalla o proyectado sobre una pared en la habitación oscurecida, mostró el patrón de franjas de interferencia, con lo que evidenció simultáneamente la difracción y las interferencias luminosas.



Con los medios de que se dispone actualmente en bastantes institutos, los estudiantes pueden emular en el laboratorio el experimento de la doble rendija. A modo de ejemplo, la fotografía adjunta situada más a la izquierda fue tomada por alumnos de 2º Bachillerato

en el laboratorio y muestra las franjas de interferencia producidas después de que un rayo de luz monocromática emitido por un puntero láser atraviesa una red de difracción. La otra fotografía (más a la derecha), pertenece a un experimento realizado en el IES "Sixto Marco" de Elche (gentileza de los profesores **Vicent Soler** y **Josep M. Oliver**) y muestra la gráfica de la correspondiente distribución de intensidad, medida con el sensor de luz.

Pocos años después Fresnel (1788-1817) hizo otra aportación muy destacada sobre la difracción y las interferencias luminosas. Fresnel había escrito una memoria sobre la difracción de la luz 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. Arago (1786-1853) 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.

DISPERSIÓN DE LA LUZ Y EL MODELO ONDULATORIO

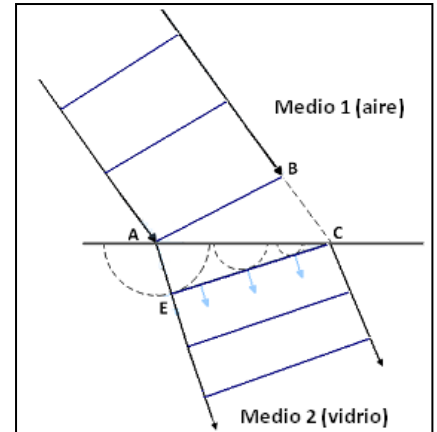


Otra propiedad de la luz que se explicó de forma satisfactoria al recuperar el modelo ondulatorio es la dispersión, que se produce cuando un rayo de luz blanca procedente del aire se refracta hacia un medio transparente (agua, vidrio, etc.). En dicho medio, la luz se descompone en una gama continua de colores que abarcan desde el extremo rojo hasta el azul-violeta. Recordamos que en 1666 Newton había investigado este fenómeno usando un prisma y lo había explicado con su modelo corpuscular, planteando que los corpúsculos de la luz eran de distinto tipo según el color de cada uno.

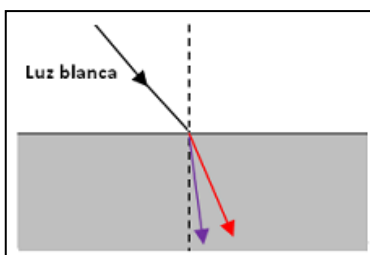
Por otra parte, aunque el espectro de la luz visible que investigó Newton está formado por una gama continua de colores, él enumeró siete fundamentales: **rojo**, **naranja**, **amarillo**, **verde**, **azul**, **añil** y **violeta**. Este planteamiento de Newton concordaba con el hecho de que a finales del siglo XVII, también eran siete los astros celestes conocidos (Sol, Luna, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno), los metales usados en la alquimia (oro, plata, cobre, mercurio, plomo, estaño e hierro), las notas musicales de una escala, e incluso los días de una semana.

Cuando en el siglo siguiente Young desarrolló su modelo ondulatorio de la luz, también estudió detenidamente la dispersión y mostró que se puede explicar satisfactoriamente con dicho modelo ondulatorio si se considera que **la vibración que corresponde a cada color de la luz tiene una longitud de onda (y, por tanto, una frecuencia) diferente o característica en cada medio.**

Para apoyar la veracidad de este concepto que planteó Young, hemos representado en la figura adjunta la refracción de una onda plana que viaja desde un medio 1 a otro medio 2, siendo menor la velocidad de propagación en el segundo medio que en el primero. Suponemos que se trata de luz monocromática (de un solo color), que el medio 1 es el aire y que el medio 2 es un medio material transparente, como, por ejemplo, vidrio (podría ser también: agua, plástico, etc.). De acuerdo con el principio de Huygens, a medida que el frente de ondas AB que viaja por el aire va incidiendo en la superficie de separación AC, los puntos de esa superficie se convierten en focos secundarios y transmiten la vibración hacia el vidrio. Como la longitud de onda (y la velocidad) es menor en este segundo medio que en el aire, la envolvente de las ondas secundarias transmitidas conforma un frente de ondas EC, en el que el punto E está más próximo a la superficie de separación que el B. Por tanto, al pasar del aire al vidrio los rayos se desvían acercándose a la dirección normal (perpendicular a la superficie de separación).



Ahora suponemos que la luz incidente no es monocromática, sino luz blanca. Entonces, se deduce que dicha luz se ha de separar en los colores del arco iris y se constata también que el rayo de luz violeta se ha de desviar más que el rayo de luz roja.



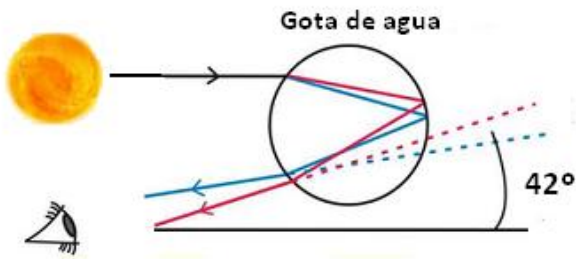
Esto es así porque en el vacío (y muy aproximadamente en el aire) todas las radiaciones luminosas que componen la luz blanca tienen a la misma velocidad (en ausencia de materia, esta velocidad es independiente de la longitud de onda o de la frecuencia). Pero, como planteó Young, en los demás medios no ocurre lo mismo, sino que cada color tiene una longitud de onda, λ , distinta. Por ejemplo, en el vidrio la luz roja tiene una longitud de onda $\lambda = 750\text{nm}$, y la luz violeta, en el otro extremo del espectro, tiene una longitud de onda $\lambda = 390\text{nm}$. Mayor longitud de onda implica mayor velocidad, de modo que el rayo de luz violeta se desvía más que el rayo de luz roja en este proceso de refracción.

Con su modelo ondulatorio Young también explicó los anillos de Newton (los interpretó como resultado de la interferencia de ondas luminosas) y formuló una teoría sobre el arco iris. Este fenómeno natural había permanecido inexplicado durante mucho tiempo y su espectacularidad probablemente pudo contribuir a que jugara un papel destacado en la Biblia, a que en ocasiones fuera tomado como portador de augurios y en otras como inspiración de leyenda.



Paisaje con arco iris (Rubens, 1640)

En la figura adjunta se explica someramente la formación del arco iris primario, que se observa cuando los rayos de luz solar se refractan en gotas de agua suspendidas en la atmósfera y luego se reflejan interiormente en ellas.

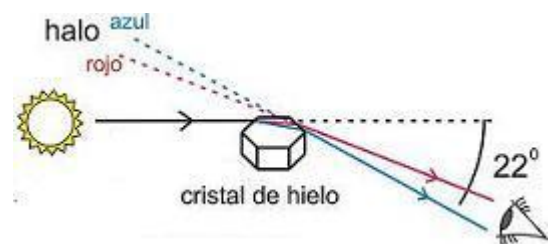


Como la luz solar procede de muy lejos, cada gota es iluminada por un haz de rayos prácticamente paralelos y el ángulo de desviación de cada rayo al refractarse depende de la altura a la que dicho rayo incide en la gota: Varía entre un grado mínimo de desviación y otro máximo. El arco iris lo forman los rayos que salen en direcciones próximas a la

desviación mínima (tienen la dirección indicada en la figura), porque, tal como se puede comprobar mediante aplicación de la geometría, en esa dirección se reúne un número mayor de rayos que en el resto y la concentración de luz reflejada es máxima.

Otro fenómeno natural que también se debe a la dispersión de la luz son los halos, que se pueden observar en el cielo cuando la luz solar atraviesa cristales de hielo microscópicos suspendidos en la atmósfera, como los contenidos en las nubes altas. Es un efecto llamativo y bastante común en nubes situadas a unos 22 grados a la derecha o izquierda del Sol.

En el halo que muestra la fotografía adjunta, el Sol está ubicado a la derecha de la imagen, y el rojo queda más cerca del Sol que el azul. Tal como se explica en el diagrama anexo, los cristales de hielo se



pueden considerar paralelepípedos de base hexagonal, cuyas caras y aristas forman prismas que desvían la luz con ángulo distinto para cada color. Esta fotografía y su explicación proceden de la magnífica Web: [Fenómenos ópticos cotidianos](#) del profesor **Alfredo Luis Aina** (Universidad Complutense de Madrid).

Finalmente, otra experiencia cotidiana, en la que se observa con mucha claridad la descomposición de la luz en colores, sucede al iluminar un CD. El espectro de colores de la luz blanca se puede ver mirando el CD directamente o proyectándolo sobre un papel blanco, tal como muestra esta fotografía, tomada en el laboratorio por alumnos de 3º ESO. En la versión digital del tema se aporta un documento donde se explica este proceso en el que el CD actúa



como una rejilla de difracción, debido a que el tamaño de sus ranuras es muy pequeño y comparable con la longitud de onda de la luz que incide sobre él. El CD iluminado devuelve luz desde múltiples puntos y la luz emitida en todas las direcciones desde cada uno de ellos interfiere con las emitidas desde los demás. Tal como muestra la fotografía adjunta (aportada por alumnos de 4º ESO en un trabajo monográfico realizado en 2015), estas interferencias provocan que cada luz de una determinada longitud de onda (cada color) emerja del CD con un ángulo diferente.

PERCEPCIÓN VISUAL DE LOS COLORES

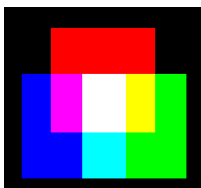
Otra contribución muy importante de Young apoyada en su modelo ondulatorio de la luz fue sobre la percepción de los colores. Young conocía bien el trabajo de Newton, y, sobre este tema, replicó de forma expresa el modelo newtoniano en un largo trabajo que presentó en 1802 en la Royal Society de Londres.

Recordamos que según Newton la luz sería una granizada de corpúsculos y cada corpúsculo luminoso que portara un determinado color debía ser diferente al resto (que portarían colores diferentes). Young afirmó que esto era insostenible. Puesto que la gama de tonalidades del espectro visible parecía prácticamente continua, para que fuera correcta la propuesta de Newton tendría que haber un número enorme (casi ilimitado) de corpúsculos de luz de diferente tipo. Entonces, dentro de nuestros ojos, tendríamos que poseer un número extraordinariamente elevado de receptores de distintos tipos, para que cada uno de ellos pudiera detectar o ser sensible a cada uno de esos corpúsculos.

Young mostró que su modelo ondulatorio podía superar esta dificultad. Planteó que cuando varias ondas luminosas de colores diferentes (diferentes longitudes de onda o diferentes frecuencias) viajan juntas, se perciben como una onda luminosa de un solo color (una longitud de onda o una frecuencia), que resulta de la composición de los colores de esas luces. Partiendo de esta premisa, comprobó empíricamente que los diferentes colores de luz del espectro pueden quedar reducidos a tres luces básicas: **verde**, **roja** y el **azul intensa**. De tal forma que las tres luces superpuestas se ven como luz blanca. Con ello, Young, además de reforzar su modelo ondulatorio, superó brillantemente la dificultad que había observado en la teoría de Newton, ya que puso de manifiesto que en nuestros ojos, solamente sería necesario tener receptores de tres tipos para distinguir todos los colores visibles.

Hoy es bien conocido que en la retina del ojo humano hay unas células especializadas, llamadas conos y bastones, que son sensibles a los rayos luminosos. Los conos, en un número del orden de siete millones, son sensibles a detalles finos de contraste, color y forma. Se activan en buenas condiciones de iluminación o luz "diurna". Por su parte, los bastones, en número del orden de 100 millones, se activan cuando reciben luz tenue o "nocturna". Los bastones no son capaces de distinguir el detalle fino o el color. Por eso, con baja iluminación es difícil distinguir los colores o ver límites precisos.

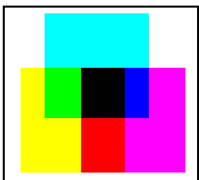
Tal como había predicho Young, existen básicamente tres tipos de conos: unos que presentan una sensibilidad máxima para las longitudes onda más largas ("**conos rojos**"), otros con mayor sensibilidad a las longitudes de onda medias ("**conos verdes**") y otros con mayor sensibilidad a las longitudes de onda más cortas ("**conos azules**"). La combinación de estas tres **luces básicas** en una mayor o menor proporción da lugar a la visión tricromática que poseen la mayoría de las personas y mediante la cual se abarcan todas las tonalidades del arco iris.



En la [versión digital de este tema](#), se vincula una animación (pertenece a la Web [Educaplus](#)), que permite practicar la suma aditiva de luces. Combinando las tres luces básicas (roja, verde y azul) de dos en dos se obtienen luces de otros tres colores del espectro visible (**amarillo**, **magenta** y **cian**) y combinando las tres luces se obtiene luz blanca. Esto significa que una fuente de luz se ve de cada uno de estos colores, cuando nuestros conos especializados reciben una, dos o las tres

luces básicas con la misma intensidad. Cualquier otro color intermedio (por ejemplo, naranja, marrón, gris, etc.) se obtiene siguiendo el mismo procedimiento de suma aditiva de los colores de las luces básicas, pero teniendo dichas luces intensidades relativas diferentes.

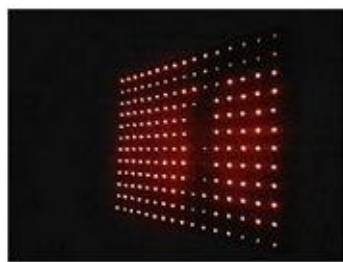
Para explicar el color con el que vemos muchos objetos que filtran la luz que les ilumina se recurre al concepto de suma sustractiva de colores (en lugar de la suma aditiva de luces). En términos generales, un filtro de luz es cualquier material (como las pinturas, las partículas de la atmósfera, etc.) que, al paso de ésta, absorbe algunas de las longitudes de onda y refleja y deja pasar el resto. El color de un filtro puede ser igual al de una luz primaria o no. Por ejemplo: un filtro **rojo** absorbe las luces **azul** y **verde**, y deja pasar y refleja la luz roja; un filtro **magenta** absorbe la luz **verde**, y deja pasar y refleja las luces **azul** y **roja** (la suma de las luces azul y roja es magenta), etc. Al mirar un filtro iluminado nos llega el conjunto de longitudes de onda que deja pasar y refleja (suma sustractiva). El color correspondiente a ellas se llama color pigmento.



En la [versión digital del tema](#), se vincula otra animación de [Educaplus](#), con la que se puede practicar la suma sustractiva de colores superponiendo filtros primarios (colores primarios sustractivos). Por ejemplo, si se superpone un filtro **magenta** (deja pasar y refleja las luces azul y roja, absorbe la luz verde) a otro filtro **amarillo** (deja pasar y refleja las luces roja y verde; absorbe la luz azul), el resultado es el color **rojo** (única luz primaria no absorbida). Si se superponen los tres filtros el resultado es la ausencia de color: **negro** (entre los tres filtros absorben las tres luces primarias).

A propósito de esto nos podemos plantear cómo es posible que veamos un objeto negro que no emite ninguna luz. La respuesta es que el ojo sí ve al resto de objetos que emiten luz alrededor del objeto negro. La silueta "vista" del objeto negro es el hueco que queda.

Este concepto, por el cual restamos los objetos luminosos que sí vemos para construir el contorno y la correspondiente silueta de los objetos negros invisibles, es uno de los recursos que utiliza el artista visual [Jim](#)



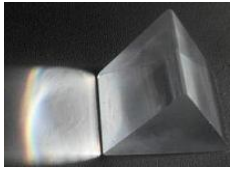
[Campbell](#) (a quien nos hemos referido en el apartado sobre la invisibilidad de la luz), para crear figuras "negras" en movimiento. Lo hace interrumpiendo a intervalos de tiempo adecuadamente programados, la emisión de luz por algunas de las fuentes (en el caso de la imagen y el video adjuntos estas fuentes son LEDs),

que, conjuntamente, dibujan el fondo (iluminado) de varios de sus "cuadros".

En nuestro Laboratorio se dispone de filtros de varios colores con los que los estudiantes practican la suma sustractiva. Por ejemplo, la fotografía situada más a la izquierda muestra la superposición de un **filtro cian** (absorbe la luz roja) y un **filtro amarillo** (absorbe la luz azul). El resultado es **verde** (única luz primaria no absorbida). La otra fotografía, situada más a la derecha, muestra la superposición de un **filtro rojo**



(absorbe las luces azul y verde) y un **filtro cian** (absorbe la luz roja). El resultado es **negro**, puesto que entre los dos filtros absorben las tres luces primarias.



Este es uno de un conjunto de experimentos sencillos que se puede realizar sobre la luz y la percepción de los colores. En la [versión digital del tema](#) se pueden ver varios de ellos: Sobre la descomposición de la luz con un prisma, sobre la suma de luces usando una lente convergente, con el disco de Newton, etc.

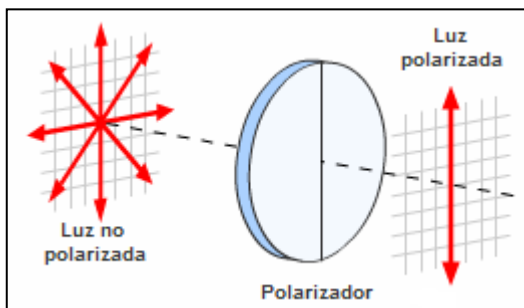
POLARIZACIÓN DE LA LUZ. TRABAJOS DE MALUS, ARAGO Y FRESNEL

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 ayudaron además a precisar que las ondas luminosas tienen que ser **transversales** y no longitudinales como se venía considerando.

En su época Huygens y Newton habían observado la polarización de la luz al atravesar cristales de calcita, pero no supieron cómo interpretarla y les pasó completamente desapercibido que el hecho delata que tiene que ser una onda transversal y no longitudinal como él creía.

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 sus trabajos 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 enseguida desarrolló también una teoría de la doble refracción de la luz en cristales, que publicó en 1810.

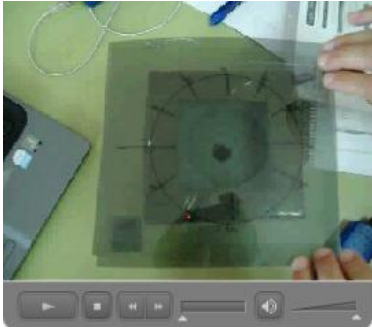
Pocos años después, **Arago** (1786-1853) y **Fresnel** (1788-1817), a quienes ya hemos citado por sus grandes aportaciones sobre la **difracción de la luz**, estudiaron en detalle fenómenos que manifiesta la luz polarizada.



Comprobaron 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 les indujo a pensar que en un rayo polarizado debe ocurrir algo en la dirección perpendicular a la de propagación. Supusieron que ese algo tiene que ser la propia vibración luminosa y en su modelo ondulatorio consideraron a la luz una onda transversal. En efecto, en una onda

transversal 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 pasa a oscilar sólo en un determinado plano, al que se denomina plano de polarización.

En la [versión digital del tema](#) se puede consultar un experimento sencillo que constata la polarización de la luz.



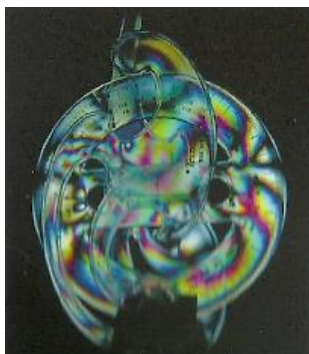
Debajo de una caja de cartón se coloca una lámpara encendida y encima de ella dos láminas superpuestas que actúan como filtros polarizadores. En la posición de partida los planos de polarización de las dos láminas tienen la misma orientación. Después traspasarlas, la onda luminosa vibra en esa dirección coincidente. Cuando una de las láminas gira 90° , los dos planos de polarización son perpendiculares entre sí y la luz no puede vibrar en ninguna dirección detrás de ellas. En el experimento se usa un sensor de luz para registrar las variaciones de intensidad luminosa al ir girando uno de los filtros polarizadores.

Actualmente se dispone de muchas aplicaciones tecnológicas de la polarización de la luz. Una bien conocida son las gafas de cristal polarizado, cuya misión es eliminar buena parte de la luz reflejada que llega a nuestros ojos. La luz solar ilumina los objetos que nos rodean y, después de ser reflejada por ellos, nos llega desde múltiples direcciones. Cuando procede de determinadas superficies planas (por ejemplo, en el mar, en la nieve, en el asfalto), nos puede deslumbrar, porque aporta un exceso de luz al ojo y quita visibilidad. Los cristales polarizados que tienen estas gafas actúan como filtros verticales. Así, bloquean la luz que llega en dirección horizontal y permiten el paso de la que llega en dirección vertical, que se aprovecha mejor para ver con claridad.

Otra aplicación tecnológica de la luz polarizada es el polariscopio, que, en el caso más simple, es un montaje que consta de dos filtros polarizadores cuyos centros ópticos se colocan perpendicularmente. Entre ambos filtros, se deja un espacio para poder intercalar entre ellos diversos objetos o materiales con objeto de analizarlos ópticamente. En ausencia de dichos materiales, la luz no atraviesa el instrumento, ya que el primer filtro polarizador sólo deja pasar las vibraciones luminosas que tienen lugar en una determinada dirección y el segundo sólo deja pasar las perpendiculares a ellas. (En la fotografía adjunta vemos un polariscopio antiguo, que se expone en el [Museo da Metroloxía de Galicia](#); un museo virtual del Laboratorio de Oficial de Metrología de Galicia).



Pero, cuando entre los dos filtros polarizadores se coloca un medio cristalino (puede ser un cristal sólido o líquido), entonces se ve a través del polariscopio un patrón de franjas de colores. Ello ocurre porque al atravesar el cristal, la luz que antes ha sido polarizada por el primer filtro, se desfasa, dependiendo la magnitud de dicho desfase de la longitud de onda (es decir, es diferente para cada color). Como consecuencia, las luces desfasadas sí pasan por el



segundo polarizador. Como ejemplo de esto, en la imagen adjunta se muestra el patrón de franjas coloreadas observado a través de un polariscopio plano, al intercalar entre sus dos filtros polarizadores tres herramientas de dibujo de plástico superpuestas. El autor de la imagen es [Héctor Navarro Fructuoso](#), que hace unos años, uno de nuestros mejores alumnos. Héctor ha leído recientemente su tesis doctoral en la Universidad de Valencia sobre: "Captura y reproducción de imágenes 3D mediante sistemas de Imagen Integral". Ahora trabaja en Munich en Huawei Technologies.

Todos los medios cristalinos presentan este fenómeno, excepto aquellos que cristalizan en el sistema regular, mientras carezcan de imperfecciones o no estén sometidos a tensiones. En esas condiciones son isótropos a la luz polarizada (o a la luz blanca), es decir, permiten el paso inalterado de la luz a su través, para cualquiera que sea la dirección de las vibraciones luminosas. Por este motivo, el polariscopio se utiliza para identificar tensiones en materiales de vidrio, de plástico, etc. El objeto a analizar (por ejemplo, en óptica las lentes, en automoción los cristales de un vehículo, etc.), se coloca entre los dos filtros polarizadores. Si padece tensiones significativas, éstas quedan reflejadas en el patrón de franjas observado y puede ser desechado por la industria.

En la [versión digital del tema](#), se muestra un experimento muy sencillo que aplica estos conceptos. Entre dos pequeños filtros polarizadores, se ha intercalado un pedazo de celofán al que se le han realizado varios dobleces con diferentes espesores. El desfase que sufre la luz al atravesar el celofán depende de la frecuencia (del color) y del espesor de celofán, de modo que, en una determinada posición de los filtros polarizadores se observa un cierto mosaico de colores. Los colores visibles son los que deja pasar el segundo filtro para esa posición en cada zona de un espesor determinado. Partiendo de esta situación, vamos rotando uno de los filtros. Entonces, el color de cada pedazo de mosaico va variando, ya que el segundo filtro al ir girando empieza a bloquear determinadas luces que antes no bloqueaba y en otras zonas empieza a dejar pasar luces que antes bloqueaba. Tras un giro de 90° los colores cambian a sus complementarios.

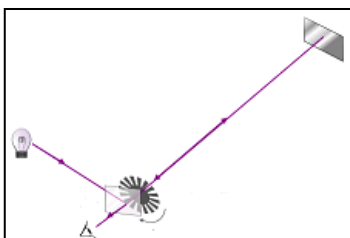


Algunos artistas visuales contemporáneos, conociendo estas propiedades de la luz polarizada, han trabajado con ella para crear imágenes vistosas y cambiantes. Se considera pionera a la artista [Austine Wood Comarow](#), que ha expuesto trabajos de [Polage art](#) en el Museo de la Ciencia de Boston, en el Museo de Historia Natural y Ciencia de Nuevo México, en Albuquerque, y en la Ciudad de Ciencia y de Industria en París.

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA LUZ. EXPERIMENTO DE FIZEAU Y FOUCAULT

Otra aportación importante que apoyó 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). Esta fue la primera vez que se obtenía una medida directa de la velocidad de la luz.

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 y

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, en consonancia con la predicción de la teoría ondulatoria.



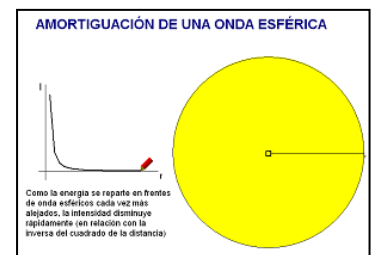
Fizeau y Foucault hicieron otros estudios notables sobre la luz acordes con el modelo ondulatorio. Fizeau (imagen más a la izquierda) descubrió en 1848, independientemente de Doppler, el efecto Doppler para la luz, al que nos referimos en el próximo apartado. Por su parte, Foucault (imagen a la derecha) inventó en 1857 un polarizador que lleva su nombre, y en los años siguientes concibió un método para probar los espejos de los telescopios reflectivos y determinar su forma. Ambos investigaron conjuntamente algunos fenómenos de interferencia luminosa.

AMORTIGUACIÓN Y ABSORCIÓN DE LA LUZ

Puesto que la luz emitida por cualquier fuente (una bombilla, el Sol) se propaga en el espacio en todas las direcciones, el modelo ondulatorio prevé que a medida que nos alejamos de dicha fuente se ha de producir un decaimiento de su intensidad. A dicho decaimiento pueden contribuir dos causas.

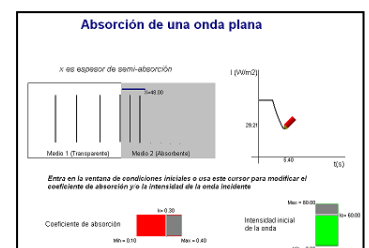
En primer lugar, la energía vibrante producida por la fuente se ha de ir repartiendo en frentes de onda cada vez más alejados del foco. En el espacio tridimensional, estos frentes de onda son esféricos y se ha de tener en cuenta que el área, S , de una superficie esférica es proporcional al cuadrado del radio ($S=4\pi r^2$). Por tanto, la intensidad luminosa también debería ser inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al foco. Este fenómeno se denomina **amortiguación**.

En la [versión digital del tema](#) se aporta una animación *Modellus* que muestra este proceso y se vincula un documento textual con la deducción de la ley de amortiguación, aplicada a la luz.



Adicionalmente, en cualquier medio material ocurre otro decaimiento de la intensidad luminosa debido a que, al atravesar la luz dicho medio, se ha de producir **absorción** de la energía de las vibraciones por las partículas del mismo. Así, por ejemplo, tenemos que la luz procedente de las estrellas viaja por un espacio interestelar vacío (en consecuencia, no absorbente), pero, luego, al atravesar la atmósfera interacciona con las moléculas de los gases que la componen y es absorbida total o parcialmente por ellos (medio absorbente). En este proceso, se denomina espesor de semi-absorción del medio absorbente (en este caso sería el aire) al valor de la distancia que recorre la luz hasta que su intensidad disminuye a la mitad de su valor inicial. El decrecimiento de intensidad producido por la absorción debe ser exponencial.

En la [versión digital del tema](#) se aporta otra animación *Modellus*, que simula el avance de una onda plana transmitiéndose de inicio por un medio no absorbente y a continuación por un medio absorbente. Permite modificar la intensidad de la luz incidente y el coeficiente de absorción del segundo medio, obteniendo el correspondiente espesor de semi-absorción. Así mismo, también se vincula otro



documento textual en el que se expone una deducción de la ley de la absorción.

Los alumnos de 2º Bachillerato realizan en nuestro Instituto varios experimentos en los que pueden medir el decaimiento de la intensidad luminosa, usando un sensor de luz. Utilizan varias fuentes (bombilla tradicional,



bombilla halógena, cañón de luz láser, etc.) y analizar las gráficas obtenidas del decaimiento de la intensidad en relación con las leyes que se esperan en situaciones diversas. Por ejemplo, al trabajar con un rayo unidireccional de luz láser (totalmente colimado), no se produce amortiguación y sí absorción, al usar como fuente de luz una bombilla abierta al aire, esa luz se propaga en todas las direcciones y se producen ambos fenómenos, etc.

Por otro lado, en el IES "Sixto Marco" de Elche, un grupo de alumnos de 2º Bachillerato, dirigidos por el profesor **Vicent Soler**, midieron la intensidad de la luz ultravioleta (UVA) emitida por varios tipos de bombilla. Este estudio tiene particular interés, porque el Sol es un emisor natural de luz UV para la Tierra.

Dependiendo del rango de longitudes de onda, la luz UV se denomina UVA (400-315 nm), UVB (315-280 nm) y UVC (280-100 nm). Los tipos UVB y UVC son los más peligrosos para los seres vivos, pero, afortunadamente, de toda la radiación UV procedente del Sol que llega a la superficie de la Tierra, el 99% es UVA, porque que



los tipos UVB y UVC son absorbidos rápidamente por la capa de ozono. Aún así, la radiación menos perjudicial (UVA) también es dañina si excede de una determinada dosis. Por ello es interesante evaluar el índice de emisión de radiación UV (y la rapidez con que decae su intensidad) de fuentes artificiales habituales, como bombillas, tubos fluorescentes, etc. En este caso, los estudiantes comprobaron que la bombilla incandescente tradicional es la que emite menos radiación UVA, aunque todas lo hacen en una cantidad insignificante respecto a la radiación UVA procedente del Sol. Este trabajo experimental, que se presentó en las XIII Jornadas de la Asociación de Profesores de Física y Química Curie (2009).

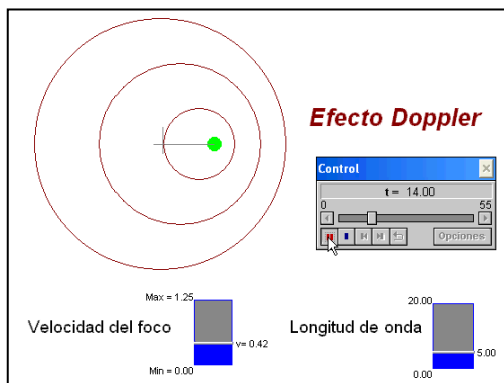
EL EFECTO DOPPLER EN LA LUZ

El efecto *Doppler* es una propiedad de los procesos ondulatorios causada por el movimiento relativo entre el foco emisor de las ondas y el receptor. Consiste en una variación de la frecuencia y la longitud de onda recibidas respecto de la frecuencia y la longitud de onda emitidas por la fuente. Fue propuesto por primera vez por Cristian Doppler (1803-1853) en 1842 en un trabajo llamado: "Sobre el color de la luz en estrellas binarias y otros astros".



Ya hemos dicho que en 1848 Fizeau también descubrió, de forma independiente, el mismo fenómeno (en Francia se conoce como efecto Doppler-Fizeau).

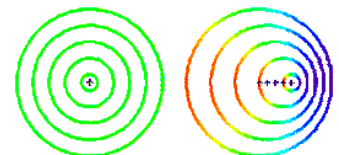
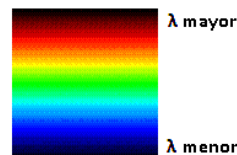
Para facilitar la apropiación del efecto *Doppler*, en la [versión digital del tema](#) aportamos una animación *Modellus* interactiva, en la que un foco puntual emite ondas circulares de una determinada frecuencia y longitud de onda. La



aplicación permite modificar la velocidad del foco y la longitud de onda emitida, comprobando el efecto que tiene sobre las ondas recibidas. Mientras el foco emisor permanece en reposo, los frentes de onda son concéntricos alrededor de él y tienen la misma separación en todas las direcciones. En cualquier lugar, la longitud de onda y la frecuencia recibidas son iguales a las emitidas. No se produce efecto *Doppler*. Sin embargo, cuando el foco se desplaza va emitiendo los frentes de onda sucesivos desde diferentes posiciones. Como la velocidad de propagación de la onda es independiente de ese movimiento del foco,

los frentes de onda dejan de ser concéntricos: se aprietan en el sentido hacia donde avanza el foco y se separan en el sentido desde donde se aleja dicho foco. En consecuencia, la longitud de onda recibida es mayor en las zonas que ven alejarse al emisor y es menor en las zonas que lo ven acercarse. Lo contrario le ocurre a la frecuencia.

Hemos visto que el espectro de luz visible por el ojo humano abarca una gama continua de colores desde el extremo rojo (λ mayor) hasta el azul-violeta (λ menor), según nos recuerda imagen situada debajo más a la izquierda. En



consecuencia, si, por ejemplo, una fuente que se está moviendo hacia la derecha, emite luz de color verde (corresponde a una longitud de onda, λ , que se sitúa aproximadamente en centro del espectro visible), el color de la luz que se recibe a la izquierda de dicha fuente se desplaza, por efecto *Doppler*, hacia el rojo y el color de la luz que se recibe a la derecha de dicha fuente se desplaza hacia el azul.

En la [versión digital del tema](#), se aporta un documento textual con la deducción de la ley del efecto *Doppler*. Si se conoce la frecuencia de la luz emitida por la fuente y la de la luz recibida por el observador, dicha ley permite calcular la velocidad a la que dicha fuente se acerca o se aleja (según proceda) de dicho observador.

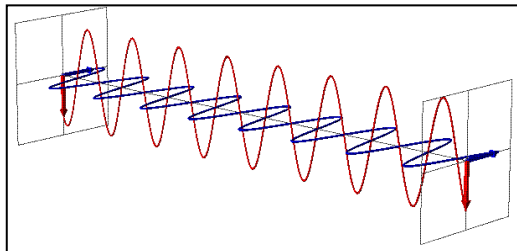
ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

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 μ y ϵ 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 y se consolidó definitivamente a los ojos de la comunidad científica la naturaleza electromagnética de la luz.

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. 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.

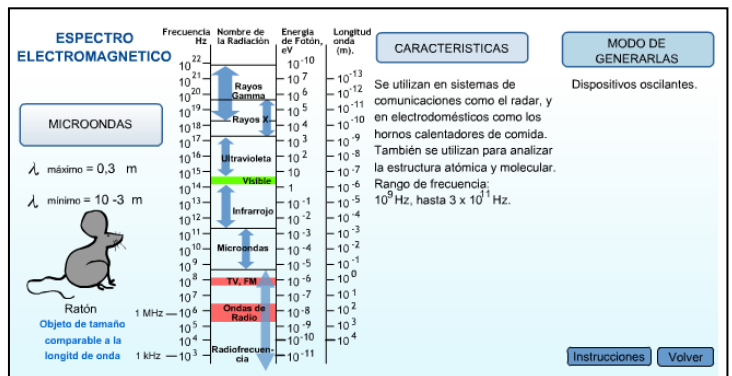
En la tabla adjunta se dan los intervalos de longitud de onda y de frecuencia correspondientes a diversos tipos de onda electromagnética. Como se observa, el espectro de luz visible solo cubre una pequeñísima parte (longitud de onda entre $4 \cdot 10^{-7}m$, violeta, y $7 \cdot 10^{-7}m$, rojo) del espectro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

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}		10^{-11}
10^{18}	Rayos X	10^{-10}
10^{17}		10^{-9}
10^{16}	Luz ultravioleta	10^{-8}
10^{15}	Luz visible	10^{-7}
10^{14}	Luz infrarroja	10^{-6}
10^{13}		10^{-5}
10^{12}		10^{-4}
10^{11}	Microondas	10^{-3}
10^{10}		10^{-2}
10^9		10^{-1}
10^8		1
10^7	Radiofrecuencia	10
10^6		10^2
10^5		10^3
10^4	Ondas de radio largas	10^4
10^3		10^5
10^2		10^6
10		10^7

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,..).

En la [versión digital del tema](#) se expone una aplicación flash muy útil para conocer algunas características el espectro electromagnético (formas de generar cada tipo de onda, tamaño de las longitudes de onda correspondientes, características principales de cada una, aplicaciones tecnológicas,..). Dicha aplicación pertenece a la **Web de la Editorial Santillana** (se expone con permiso expreso de la editorial), cuyo proyecto se propone complementar el texto escolar con el uso de las nuevas tecnologías (TIC).

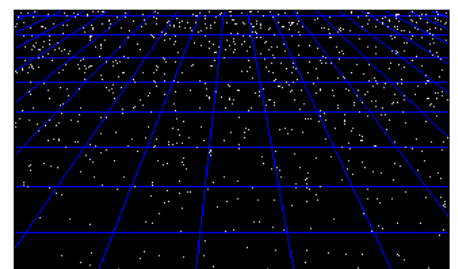


LA LUZ Y LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

El efecto *Doppler* jugó un papel destacado en la formulación en 1929 de la teoría del Big Bang y la expansión del Universo. Esto fue así porque la luz procedente otras galaxias que se recibe en observatorios astronómicos tiene una frecuencia menor (longitud de onda mayor) que la emitida. Se dice que está desplazada hacia el rojo, aunque esta expresión puede resultar confusa ya que, en el caso de longitudes de onda mayores que el rojo (infrarrojo, microondas y ondas de radio), los llamados "desplazamientos hacia el rojo" se alejan de la longitud de onda del rojo.

En la imagen ajunta se compara el espectro de luz que nos llega de una galaxia (observado) con el espectro que se tendría si dicha galaxia estuviera en reposo relativo con respecto a nosotros (esperado). El hecho de que las líneas de todos estos espectros "galácticos" estén desplazadas hacia el rojo, hizo plantear al astrónomo estadounidense **Hubble** (1889-1953) en 1929 que ello se debe al efecto *Doppler* y lo interpretó como una evidencia de que dichas galaxias se están alejando de nosotros. Aplicó la ley del efecto *Doppler* a estos espectros y comprobó que la velocidad de alejamiento de las galaxias es mayor cuanto más distantes estén de nosotros, lo que resulta coherente con la concepción de un Universo en expansión.

Dos años antes el astrofísico belga Lamaitre (1894-1966) había llegado a la misma conclusión, basándose en la solución dinámica de las ecuaciones de Einstein que había obtenido el físico, astrónomo y matemático holandés Willem de Sitter (1872-1924) y en los datos astronómicos de Slipher (1875-1969) y del propio Hubble. Esta aportación de Lamaitre fue anterior a la de Hubble y su conocimiento trajo un debate en la comunidad científica sobre el papel que hubiera podido jugar Hubble en una hipotética censura del trabajo de Lamaitre.



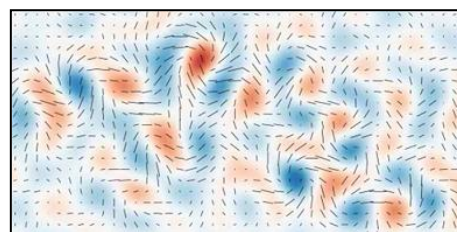
Otra aportación muy relevante del estudio de la luz al modelo de evolución de Universo, de candente actualidad, se refiere a los intentos de observar las huellas que debieron dejar en la radiación de fondo (resto de la luz emitida en el periodo inicial de formación del Universo) las ondas gravitacionales generadas en los primeros instantes del Universo. En los años setenta, Alan Guth (1947-) elaboró la primera formulación de la teoría de un Universo



inflacionario, según la cual, con el Big Bang se debió producir un proceso de inflación o expansión acelerada del Universo durante unas fracciones infinitesimales de segundo (lo llamó "el Bang del Big Bang"). Dicho proceso inflacionario habría generado fluctuaciones cuánticas que, tras ser estiradas por la expansión del Universo, deben producir dos tipos de perturbaciones en el espacio-tiempo: ondas de densidad y ondas gravitacionales. Las ondas de densidad fueron observadas inicialmente por el satélite COBE, en 1992, y más tarde por los WMAP y Planck y sus propiedades están perfectamente de acuerdo con las predicciones

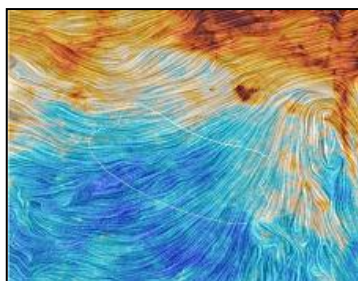
de la teoría de inflación.

Por su parte, las ondas gravitacionales constituían una de las predicciones más buscadas de la teoría y en marzo de 2014 un grupo de investigación anunció en la prensa la posible confirmación de su existencia. Dicho anuncio se basó en que las ondas gravitacionales producidas en "el Bang del Big Bang" han de generar un patrón característico en la orientación de



la polarización de la radiación cósmica de fondo. Como dicha radiación está muy débilmente polarizada, la señal que se buscaba es muy pequeña y, en consecuencia, muy difícil de detectar. En este caso, se partió de datos recogidos por un telescopio terrestre (BICEP-2, instalado en el Polo Sur), tras observar una región del firmamento en una única frecuencia en la banda de las microondas. La afirmación de que se habría podido detectar la señal buscada se basaba en la asunción de que las emisiones polarizadas en primer plano son prácticamente despreciables en esta región del espectro electromagnético.

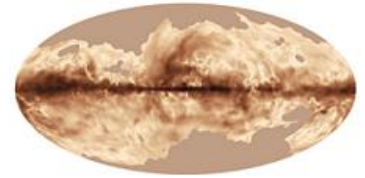
En seguida, la interpretación de estos datos fue motivo de encendido debate en la comunidad científica. La señal primordial de la radiación cósmica realmente se oculta detrás de la radiación de fondo de nuestra galaxia, la Vía Láctea, y el primer análisis de los datos obtenidos por el telescopio BICEP-2 no permitía afirmar con absoluta certeza que se hubiera sustraído debidamente el efecto del polvo de nuestra Galaxia. En esta situación, se esperaba que el análisis de los datos que obtuvo el telescopio espacial europeo Planck, gracias a sus medidas de gran



precisión, sirviera para aislar la polarización de la señal, y, quizá, pudiera dar una respuesta definitiva. Y, se realizó un análisis minucioso de la combinación de datos del Bicep-2 con los del telescopio Planck [La imagen adjunta (Fuente: ESA/Planck Collaboration) corresponde a un fragmento del cielo observado por el telescopio Bicep-2 tal y como lo ha visto el telescopio espacial europeo "Planck"], que ha llevado finalmente a la conclusión de que, de momento, no se pueden dar por encontradas, a partir de estos estudios, las ondas gravitacionales.

En un futuro próximo también se espera que satélites de tercera generación se lancen al espacio para explorar con mayor detalle las ondas gravitacionales.

Por otra parte, el observatorio Planck publicó en mayo de 2014 una imagen nueva sobre la estructura del campo magnético de la Vía Láctea, confeccionada a partir de las primeras observaciones a cielo completo de la luz polarizada emitida por el polvo interestelar de nuestra Galaxia.

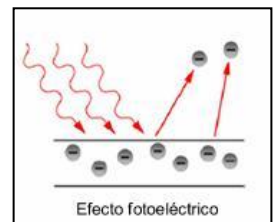


En la [versión digital del tema](#), se aportan varios artículos y noticias que se han publicado sobre estos avances y controversias.

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.

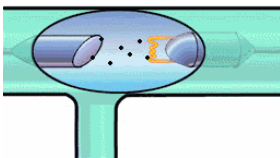
Según la hipótesis de Einstein-Planck, la energía que transporta la luz no está uniformemente distribuida en el espacio (como correspondería a una onda), sino concentrada en cuantos de energía sub-microscópicos a los que más tarde se llamó **fotones**. Atendiendo a la fórmula de Planck, la energía de 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:

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

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 hacer una estimación del 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 que se formulara 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.



NATURALEZA DUAL DE LA LUZ

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, etc.

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 la hipótesis de De Broglie 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.

Así por ejemplo, un electrón tiene masa y cantidad de movimiento (propiedades corpusculares), pero también longitud de onda (propiedad ondulatoria). En una colisión con otro electrón, se evidencia el comportamiento corpuscular de ambos, pero también ocurre que un haz de electrones se difracta cuando pasa por un pequeño orificio de tamaño comparable a su longitud de onda, que dos haces de electrones pueden producir interferencias si se les hace pasar a través de una rendija doble o múltiple, etc.

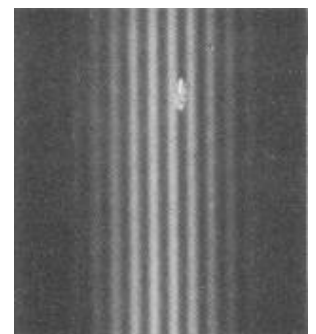
En 1927 **Davidsson** (1881-1958) y **Germer** (1856-1951) realizaron el experimento pionero que mostró la difracción de electrones. Estaban estudiando la dispersión de haces de electrones por una superficie de cristal de



níquel y observaron que cuando un haz incidía muy oblicuamente, los electrones eran dispersados preferentemente en unas direcciones determinadas. Este hallazgo les indujo a investigar específicamente la posible difracción de los electrones. Tras comprobar que los electrones dispersados producían un patrón típico de interferencias y que la separación entre los núcleos de níquel es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de los electrones del haz ateniéndose a la ley de De Broglie, comprobaron que se verificaban las leyes de la difracción en el patrón de interferencia obtenido. Por tanto, concluyeron que en este experimento

los electrones eran difractados por la red de níquel. Por este trabajo, Davidson obtuvo el premio Nobel en 1937.

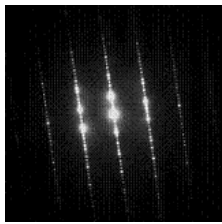
Una vez demostradas las propiedades ondulatorias de los electrones era lógico esperar que se intentara realizar con ellos un experimento similar al **experimento de Young de la doble rendija**. Lo consiguió Claus **Jönsson** (1930-) en 1959. Jönsson grabó ranuras de $0.3\mu\text{m}$ de espesor, separadas entre sí $1\mu\text{m}$, en una película de plata, para que actuara como red de difracción de los electrones. Luego realizó el experimento varias veces haciendo que los electrones pasaran por 1, 2, 3, 4 o 5 rendijas. Para dos ranuras obtuvo la fotografía adjunta (a la derecha). Este experimento fue elegido como el más bello de la



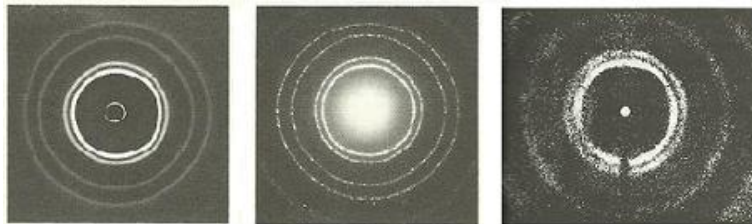
Resultado del experimento de la doble rendija con electrones.

historia de la Física, por una encuesta que realizó en 2002 Robert Crease, historiador de la ciencia.

Experimentos posteriores han mostrado que en estos procesos las interferencias se producen aunque los electrones



se lancen de uno en uno, lo cual indica que el resultado observado no es fruto de un proceso estadístico producido por la incidencia de un número elevado de electrones, sino que, en este caso, cada electrón interfiere consigo mismo. Ahora bien, si en el dispositivo experimental se usa un aparato para conocer por cuál de las dos rendijas pasa el electrón, el patrón de interferencias se destruye y se observan únicamente dos franjas enfrente de las rendijas, ya que bajo esas condiciones prevalece el carácter corpuscular del electrón.



Diagramas de difracción producidos por rayos X (izquierda), por electrones (centro) y por neutrones (derecha)

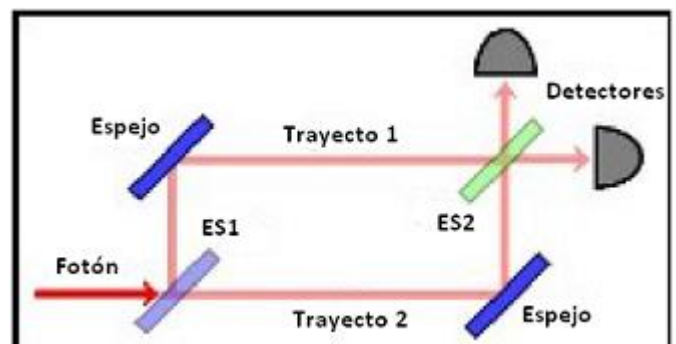
A modo de conclusión hay que decir que el concepto de **dualidad onda-corpúsculo** es una ley general de la física cuántica que se aplica sin excepción a todas las partículas (electrones, neutrones, protones, etc.) y también, desde luego, a los **fotones**. Por tanto, el estado actual del debate se puede expresar diciendo que para

la física moderna **la luz tiene naturaleza dual, corpuscular y ondulatoria**.

LA NATURALEZA DUAL DE LA LUZ Y EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD

Una característica importante de la dualidad onda-corpúsculo es su sometimiento al **principio de complementariedad**. Su formulación original se debe a **Bohr** (1885-1962), que resaltó el hecho de que el observador interactúa con el sistema en tal medida que condiciona la prevalencia de uno u otro comportamiento (corpuscular u ondulatorio): Si se realiza un experimento para medir propiedades ondulatorias de una partícula o de un fotón, se eliminan peculiaridades corpusculares (y viceversa) y, de hecho, ningún experimento puede mostrar a una partícula o a un fotón manifestando simultáneamente ambos comportamientos.

Esta influencia del observador (del dispositivo experimental) en el resultado del experimento es objeto de candente controversia y, a la vez, una fuente inspiradora de fructífera investigación. Entre los experimentos que tienen una relación directa con esta controversia, podemos mencionar, en primer lugar, uno realizado en 2007 en el CNRS (Centro Nacional para la Investigación Científica en Francia). En dicho experimento, un emisor de fotones los enviaba de uno en uno hacia un interferómetro y allí, cuando un fotón pasaba por el primer espejo semi-reflectante (ES1), tenía la misma probabilidad para seguir por dos trayectos distintos (de 48 metros de longitud, cada uno), que terminaban en sendos detectores. Justo antes de esos detectores, se podía insertar o retirar un segundo espejo semi-reflectante (ES2), mediante un sistema sincronizado con el emisor de fotones. Cuando se insertaba este espejo, los fotones podían alcanzar uno u otro detector, sin ser "observados" y cuando no, los



detectores permitían determinar u observar el camino seguido por el fotón. El resultado fue que, sin el bifurcador de emisiones, el fotón tomaba un camino u otro (es decir, se comportaba como una partícula), pero con él los detectores registraban interferencias (como si el fotón se estuviera comportando como onda, yendo por ambas vías simultáneamente). Para los investigadores, este resultado acentúa la controversia sobre la influencia del observador en la física cuántica, ya que *"podría dar a entender que alguna fuente concebible estaba informando secretamente al fotón de lo que debía hacer. Entonces debió mandarle un mensaje que viajaba más rápido que la velocidad de la luz, lo que está prohibido por las leyes de la relatividad"*.

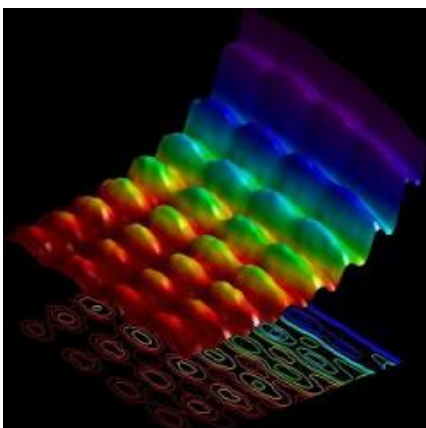
En 2012, se realizó otro experimento destinado a profundizar en la interpretación de la naturaleza dual del fotón. En este caso, se montó un dispositivo que aprovecha una característica cuántica de todas las partículas (incluidos



los fotones), llamada **entrelazamiento**: un conjunto de partículas entrelazadas no pueden definirse como partículas individuales con estados definidos, sino sólo como un sistema con una función de onda única para todo el sistema. Esta propiedad lleva a correlaciones entre las propiedades físicas observables de las partículas entrelazadas y, así por ejemplo, como dos fotones que nacen de una misma fuente coherente están entrelazados, lo que le ocurre a uno de ellos influye de forma instantánea a lo que le

ocurre al otro. Aprovechando este hecho, se entrelazaron dos fotones y se alternó en uno de ellos el método de medida (como onda o como partícula) para explorar en el otro la continua mutación entre su comportamiento dual. La interpretación de los investigadores fue afirmar que *"el fotón se comporta simultáneamente como onda y como partícula, lo que refuta los modelos en que es una u otra"*.

Para terminar, nos referimos a la noticia que se acaba de publicar en abril de 2015, acerca de otra investigación en la que unos científicos de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL) en Suiza han podido observar en una misma "fotografía" a la luz comportándose como onda y como partícula. En el experimento, situaron un finísimo hilo metálico (conductor) sobre una superficie de grafeno (aislante). Lanzaron haces de electrones sobre la superficie de contacto entre ambos y al mismo tiempo, iluminaron el hilo metálico con una luz láser ultravioleta. Esta iluminación excita a los electrones del hilo metálico, haciendo que se muevan colectivamente por el hilo y



liberen parte de la energía emitiendo fotones en la dirección perpendicular a la superficie del metal. Así consiguieron, por una parte, que los electrones incidentes chocaran contra los fotones emitidos por el hilo y, por otra, que se definieran en el hilo metálico regiones con mayor número de electrones que ganan energía y otras regiones donde el número es menor. La imagen adjunta registra, por un lado, la interacción entre los electrones incidentes desde el exterior con los fotones emitidos por el hilo conductor, lo que pone en evidencia el carácter corpuscular de esos fotones. Por otro lado, la imagen también registra, un patrón de interferencias, que pone en evidencia el

carácter ondulatorio de los fotones generados por una excitación electrónica colectiva del metal (tienen una distribución atribuible a una onda estacionaria en su interior).

Concluye aquí nuestro recorrido por "Debate histórico acerca de la naturaleza de la luz", y lo hace curiosamente, señalando que, después de tantos años de controversia entre el modelo ondulatorio y el modelo corpuscular, estos experimentos actuales ponen el énfasis en "observar" simultáneamente ambos modelos.

Este documento o cualquier parte de él se puede utilizar libremente con fines educativos o de divulgación, si bien se ha de citar la fuente (**Web de materiales didácticos de la Sección Local de Alicante de la Real Sociedad Española de Física**) y el autor (**Manuel Alonso Sánchez**)

Todos los **documentos** que se citan aquí, los **experimentos** y las **animaciones interactivas** para este tema se pueden descargar desde el tema "on line", disponible en la citada Web de materiales didácticos: <http://rsefalicante.umh.es/fisica.htm>

Contacto: Nos encantará recibir sugerencias, propuestas de mejora o aportaciones de cualquier tipo, También nos ofrecemos a impartir una charla (para docentes o para alumnos) o un curso de formación sobre algunos de los contenidos de la Web. Estamos a vuestra disposición en esta dirección: manuelalonso@inicia.es.

Documento actualizado por última vez en marzo de 2018