

SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ

*por Nicolás Dietl Sagüés
Profesor-Tutor de Mecánica Cuántica (U.N.E.D.)*

La Física es la ciencia que se ha ocupado desde siglos de estudiar la materia y la radiación, y todas las interacciones entre ambas. La evolución de las distintas teorías que se han propuesto para explicar la naturaleza de la luz constituye una de las partes más apasionantes de la historia de la Física, en particular, y de la Ciencia, en general. Algunos autores, como Carmen Carreras, Profesora Titular, y Manuel Yuste¹, Catedrático del Departamento de Física de Materiales de la U.N.E.D., y ambos, profesores de Óptica en dicha Universidad, sugieren para su estudio una división en tres etapas:

1. De los griegos a Newton (Antigüedad – siglo XVIII)
2. El siglo de las ondas (siglo XIX)
3. La dualidad onda-corpúsculo (siglo XX)

Toda esta evolución se puede resumir en la confrontación entre dos concepciones sobre la naturaleza de la luz: la *teoría ondulatoria* y la *teoría corpuscular*.

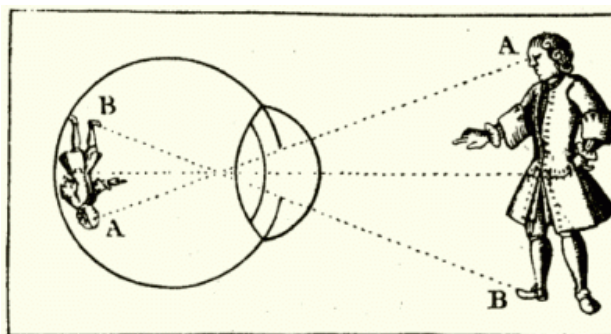
Los filósofos de la antigua Grecia consideraban la luz como un fluido que manaba de los ojos del observador. Homero recogió las creencias populares sobre la naturaleza de la luz en la Iliada y en la Odisea, por las que los ojos de los seres vivos proyectan rayos de fuego sutil. Esta idea permitió a EMPÉDOCLES (492-432 a.C.) formular la primera teoría sobre la luz: el ojo y los objetos emiten *efluvios* continuos que se entrecruzan. DEMÓCRITO (460-370 a.C.), padre de la *teoría atomista*, y PLATÓN (427-347 a.C.) formulan las primeras *teorías granulares* sobre la luz, pero es ARISTÓTELES (384-322 a.C.) quien da forma a la primera teoría dinámica, en la que hace intervenir el medio continuo. Tales efluvios modifican las cualidades del medio en que objeto y observador están inmersos, dando lugar a la sensación visual. Explicó asimismo los colores como una mezcla de luz y oscuridad en proporciones variables. El prestigio del Estagirita hizo que durante siglos no se cuestionara su teoría acerca de la naturaleza de la luz, lo cual no quiere decir que no se hicieran progresos en Óptica. EUCLIDES (s. III a.C.) y

¹ Carmen Carreras, Manuel Yuste: "*La luz a través de la historia*", editado por la U.N.E.D. en 1995

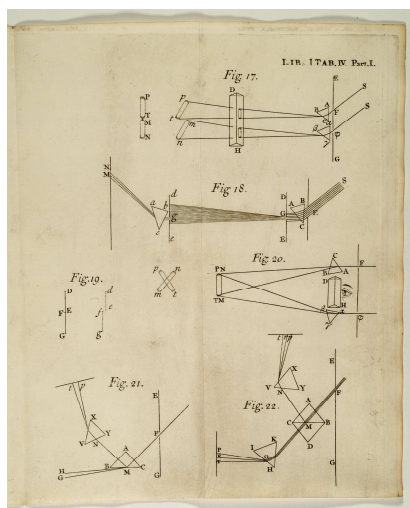
CLAUDIO PTOLOMEO de Alejandría (90-168 d.C.) escribieron sendos tratados de Óptica, donde perfilaron las leyes de la óptica geométrica que se fijaron definitivamente en el siglo XVIII. Las palabras *óptica* (= perspectiva), *catóptrica* (= reflexión), y *dióptrica* (= refracción), proceden todas del griego, y constituyen fenómenos de los rayos a los que los matemáticos griegos aplicaron las leyes de la geometría. Asimismo, los romanos utilizaron lentes, con toda seguridad, para la realización de ciertos trabajos manuales de precisión.

En la Edad Media, ALHACÉN de Basora (965-1039) estudió los espejos esféricos y parabólicos, y las lentes. Descubrió que el ángulo de refracción y el de incidencia no son proporcionales. Apoyó la idea pitagórica de que la luz se comporta como un proyectil y va de los focos luminosos a los objetos, y de éstos, siguiendo las leyes del choque elástico, a nuestros ojos.

WILLEBRORD SNELL (1580-1626) realizó experimentos que le permitieron enunciar la ley de la refracción, que lleva su nombre. Dicho trabajo experimental influyó seguramente en RENE DESCARTES (1596-1650), que como aplicación de su “Discurso del Método” publicó en su tratado “La Dióptrica”, la ley de la refracción de la luz. Para demostrarla partió de un modelo en el que la luz se hacía presente como una «presión transmitida» por un medio elástico.

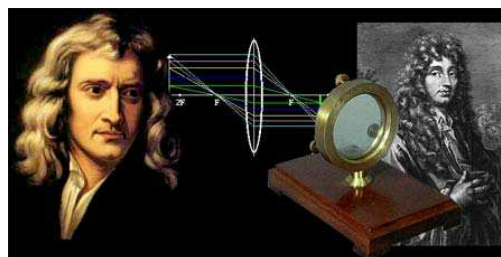


PIERRE DE FERMAT (1601-1655) postuló que la luz se propaga de un punto a otro por el *camino óptico* más corto, es decir, invirtiendo el tiempo mínimo.



Si a Descartes se le puede considerar precursor de Newton en su teoría sobre la naturaleza de la luz, de esencia corpuscular, los iniciadores de la *teoría ondulatoria* fueron el jesuita FRANCISCO M. GRIMALDI (1618-1663) y ROBERT HOOKE (1635-1703). El primero estudió el fenómeno de la difracción que se produce en la sombra de una varilla iluminada por una fuente pequeña. Hooke estudió los colores de las burbujas, las pompas de jabón y otras láminas delgadas, concluyendo que la luz consiste en la vibración rapidísima de “algo”; cada pulso o vibración de ese ente producía una esfera. Estas ideas fueron recogidas por el sabio danés CHRISTIAN HUYGENS (1629-1695), físico, matemático y astrónomo, que propuso la teoría ondulatoria de la luz. La energía

emitida por una fuente luminosa se propaga por el vacío y el espacio vacío dejado por las partículas de que está compuesta la materia por medio de un movimiento vibratorio transversal. En aquel momento era difícil concebir el vacío tal cual lo conocemos actualmente, por lo que, al igual que las ondas



transversales que se forman en un estanque necesitan del agua para propagarse, supuso que la luz precisaba de un medio material, de propiedades muy sutiles, para su propagación: el *éter*, como ya había apuntado Descartes. Con este principio, Huygens explicó perfectamente las leyes de la reflexión y de la refracción, postulando correctamente además que la luz debía viajar más deprisa en el aire que en el agua.



ISAAC NEWTON (1643-1727) trató de unificar ambas teorías, pero a medida que envejecía, defendió con más fuerza la *teoría corpuscular*, contrapuesta a la anterior. Imaginó el cuerpo emisor de luz *“como productor de partículas o granos de luz que cruzan el espacio a velocidades vertiginosas; esas partículas excitan el medio que atraviesan y en él se producen vibraciones más rápidas que las propias partículas”*. Descompuso la luz blanca mediante un prisma y estudió los colores –el *espectro* de la luz–, y postuló que si los colores se vuelven a mezclar producen luz blanca, como así es. Aplicó ideas de atracción gravitatoria a las leyes de la reflexión y la refracción, y aunque dedujo la ley de Snell basándose en la teoría de la emisión, la conclusión de que en el fenómeno de la refracción, las partículas de luz se sentían atraídas por el medio más denso, lo cual hacía aumentar la componente normal de su velocidad, manteniendo constante la componente paralela a la línea de separación de ambos medios, obligaba a deducir que la velocidad de la luz es mayor en el medio más denso, lo cual es erróneo. El sonido, que se propaga como una onda longitudinal, sí se mueve a mayor velocidad en un medio más denso y rígido, pero la luz, que es una onda transversal, viaja más deprisa en el vacío que en un medio material más denso. En lo que unos y otros estaban de acuerdo es que la luz viaja a una velocidad finita, pero tremendamente elevada.

Una vez más, el prestigio indiscutible de Newton, que como filósofo natural alcanzó a lo largo de su vida un gran nivel en las tres capacidades que debe reunir un científico, como son la teoría, la experimentación y las matemáticas, unido a la imposibilidad experimental de aquella época de medir la velocidad en el vacío y en el agua con precisión, hizo que la teoría corpuscular de Newton se impusiera, aunque contuviera algún error, a la teoría ondulatoria de Huygens. Recordemos que, en los países de cultura anglosajona, en Inglaterra, se denomina filosofía natural a la física, especialmente a la física teórica, por influencia, sin duda alguna, de Newton.

Durante el siglo XVIII, no obstante, hubo quien defendió la teoría ondulatoria de la luz, como el matemático suizo LEONHARD EULER (1707-1789), o THOMAS YOUNG (1773-1829), que la hizo renacer estudiando la interferencia de la luz en una doble rendija, determinando además los valores de la longitud de onda de los diferentes colores. AGUSTIN J. FRESNEL (1788-1827) fue el primero que logró explicar todos los fenómenos de la luz mediante la teoría ondulatoria. Herida de muerte la teoría corpuscular con los descubrimientos posteriores que se hicieron sobre la polarización de la luz, que puso en evidencia que la luz es una onda transversal, recibió el golpe final cuando se demostró que la velocidad de propagación de la luz es mayor en el aire que en el agua. Hacia el final del primer cuarto del siglo XIX quedaban ya muy pocos partidarios de la teoría corpuscular, que no vivieron lo suficiente para ver su sorprendente resurrección tan sólo ochenta años después...

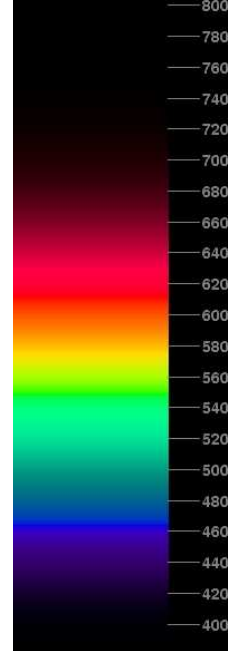
El siglo XIX conoció un desarrollo espectacular de diversas ramas de la física, como la termodinámica, la mecánica estadística, y, de modo independiente de la óptica, con la que no se consideraba que estuvieran relacionados, de la electricidad y el magnetismo. El inglés MICHAEL FARADAY (1791-1867), el mayor físico experimental que ha existido, con permiso de Ernest Rutherford, estableció una interrelación entre el electromagnetismo y la luz, estudiando que la luz polarizada, al atravesar un campo magnético, sufre una rotación. JAMES C. MAXWELL (1831-1879), influido por Faraday, estudió las ondas electromagnéticas, que son solución de la ecuación de ondas deducida de las célebres ecuaciones que llevan su nombre, y dedujo que dichas ondas viajan exactamente a la velocidad de la luz, es decir, que *las ondas luminosas son ondas electromagnéticas*, o, dicho de otro modo, *la luz es una perturbación electromagnética que se propaga a través del éter en forma de ondas*. Alcanzó la más completa síntesis del



electromagnetismo, pero murió sin ver confirmadas experimentalmente sus predicciones, y pensando además que dichas ondas se propagaban viajando sobre el éter, que era un medio material cada vez más difícil de explicar: por un lado debía ser muy sutil, invisible, pero al mismo tiempo rígido, pero no como para frenar el movimiento de los planetas. El físico alemán HEINRICH HERTZ (1857-1894) fue el primero capaz de generar y detectar, mediante dispositivos electrónicos, ondas electromagnéticas, de gran longitud de onda, que también se conocen como *ondas hertzianas*, y que viajan todas en el vacío a la velocidad de la luz c , confirmando la validez de la teoría electromagnética de Maxwell, y dando inicio al estudio del espectro electromagnético, cuyas aplicaciones han marcado todo el desarrollo tecnológico a lo largo del siglo XX, especialmente en telecomunicaciones. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las ondas electromagnéticas. Para todas ellas, la frecuencia de vibración f y la longitud de onda λ , están inversamente relacionadas a través de la velocidad de la luz en el medio. En el vacío, dicha velocidad c es una constante universal, y la relación se puede expresar así: $c = \lambda \cdot f$. De menor a mayor frecuencia, que es lo que caracteriza cada tipo de onda –la longitud depende del medio en el que se propaga–, en el espectro tenemos las ondas de radio, las microondas, las ondas infrarrojas, la luz visible, los rayos ultravioleta, los rayos X y la radiación gamma. En estos dos últimos casos, se mantienen como vemos los nombres históricos que recibieron, cuando dichos tipos de rayos fueron descubiertos, y no se conocía aún cuál era su naturaleza. Dado que su longitud de onda es muy pequeña, inferior a 10^{-10} m, sólo cuando entrado el siglo XX se pudieron realizar con dichos rayos experimentos de interferencia o difracción, se pudo probar su carácter ondulatorio. En el límite en el que la longitud de onda de una onda electromagnética tiende a cero se recuperan las leyes de la óptica geométrica que ya estudiaran los griegos.

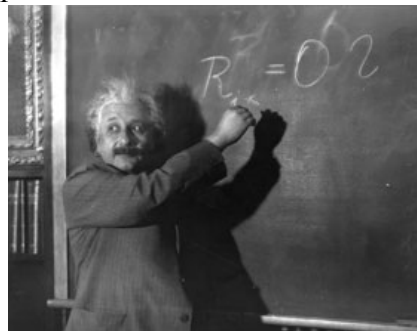
A finales del siglo XIX, los experimentos y mediciones precisas de ALBERT A. MICHELSON (1852-1931) y de EDWARD W. MORLEY (1838-1923) demostraron que no existe el éter, y que la luz, a diferencia del sonido, se propaga en el vacío.

En 1905 ALBERT EINSTEIN (1879-1955) explicó el efecto fotoeléctrico, un fenómeno por el cual una placa metálica emite electrones cuando se ilumina con luz ultravioleta.



Por dicho trabajo recibió el Premio Nobel en 1921, afirmando que la luz está compuesta de corpúsculos, *cuantos de luz*, cada uno de los cuales lleva concentrada, en forma de paquete, su energía, que es proporcional a su frecuencia, $E = h \cdot f$, apoyando las ideas de la teoría cuántica de Planck, iniciada en 1900, donde h es la constante de Planck, y recuperando de esta forma, de manera sorprendente e inimaginable por sus antecesores, la *teoría corpuscular* de la luz. En 1926 (G. N. Lewis), dichos cuantos de luz recibieron el nombre de *fotones*.

Por tanto, ¿qué es la luz?, ¿de qué está compuesta finalmente, de ondas o de partículas? son preguntas que podemos seguir formulándonos, como ha hecho la humanidad, desde los tiempos de los filósofos griegos. Los físicos contemporáneos nos hablan de *dualidad onda-corpúsculo*, o de *ondículas*, para referirse a la luz, que viaja y se propaga por el espacio como una onda, y se comporta como tal en todos los fenómenos de reflexión, refracción, interferencia y difracción, pero que actúa como una partícula, cuando interactúa con la materia, en todos los fenómenos de producción, absorción y emisión. Durante el desarrollo de la teoría cuántica, se descubrió, a partir de la hipótesis de LOUIS DE BROGLIE (1892-1981), confirmada experimentalmente después, que la materia también se comporta como una onda, completamente imperceptible en la física macroscópica, dada la pequeñez de la constante de Planck, y la naturaleza recupera así con esta doble dualidad una cierta simetría entre la materia y la radiación. Resulta curioso comentar que, en 1897, JOSEPH J. THOMSON (1856-1940) descubrió que los rayos catódicos están compuestos de *partículas* de carga negativa que denominó *electrones*, y por lo que recibió el Premio Nobel en 1906, y años más tarde, en 1927, su hijo GEORGE P. THOMSON (1892-1975) descubrió experimentalmente la *difracción de electrones*, poniendo en evidencia su comportamiento como *ondas*, por lo que recibió el Premio Nobel en 1937. En el caso de J. J. Thomson, además, al igual que ocurriera con Aristóteles y con Newton, fue su alto prestigio científico el que impuso durante unos años su *modelo atómico*, semejante a un pastel de pasas, desoyendo el *modelo planetario* del átomo, como propuso Nagaoka en 1904, y más consistente con los trabajos posteriores de Rutherford y de Bohr. Ello nos llevaría a hablar más de la mecánica cuántica, que se desarrolló durante el primer tercio del siglo XX, y que ya fue tratada en otro número de esta revista.



Las teorías físicas se pueden proponer como hipótesis, pero siempre deben ser refrendadas por los experimentos. En ocasiones, como hemos visto, teorías propuestas por científicos de gran prestigio se han impuesto durante años o siglos, hasta que han podido ser confirmadas o rebatidas por experimentos posteriores, tal como trató en su *teoría de la falsación* KARL POPPER (1902-1994), el más grande filósofo de la ciencia del siglo XX, que fue muy bien estudiado por D. MARIANO ARTIGAS (1938-2006), físico y teólogo, recientemente fallecido, cuyas ideas sobre filosofía de la ciencia experimental han ejercido tanta influencia en los últimos veinte años, y al que desde aquí queremos rendir un homenaje.