

## **La naturaleza de la luz en la época del doctor Cerdá y Rico (1848-1921)**

*Juan A. López Villanueva*

### **1.- Introducción**

De entre todos los temas que he podido elegir para aprovechar la oportunidad que amablemente me brindan los editores de la revista *Contraluz* de colaborar en su primer número, dentro de la sección de divulgación científica, ninguno me ha parecido más apropiado que el de la luz. Y de la misma manera que el Doctor Cerdá y Rico fijó en sus placas innumerables escenas de su época para nuestro deleite, me he propuesto trazar unas pinceladas de la situación de la Física en ese mismo periodo histórico a través de la evolución del conocimiento que se iba adquiriendo sobre este importante fenómeno.

No cabe duda del componente fascinante y misterioso que la luz ha tenido para el hombre. Ha sido generalmente un símbolo de vida e inmortalidad, y se le han opuesto las tinieblas como símbolo de muerte. No es de extrañar, por tanto, que la curiosidad humana por desentrañar los secretos de la naturaleza haya elegido a la luz como uno de sus objetivos principales desde el principio de las civilizaciones.

Las primeras ideas conocidas acerca de la naturaleza de la luz surgieron en la Grecia antigua, y desde entonces se han sucedido numerosas propuestas sobre la interpretación de los distintos fenómenos relacionados con ella. En este artículo se resumirá la evolución histórica de las diferentes teorías planteadas, dividiéndola en tres etapas, a las que se dedican los apartados segundo, tercero y cuarto, respectivamente. La primera etapa comprende el periodo que transcurre desde la antigüedad hasta aproximadamente el año 1844, fecha de nacimiento del Doctor Cerdá y Rico; en la segunda etapa se analiza la teoría electromagnética de la luz, que fue el avance más importante conseguido durante la segunda mitad del siglo XIX; y, finalmente, se comentan dos teorías que surgieron en los primeros

años del siglo XX, en las cuales la luz desempeñó un papel relevante. En esta historia resumida se han tenido que omitir algunos protagonistas y a veces se puede haber sacrificado el rigor científico en aras de una mayor claridad. El autor confía en la indulgencia de los lectores en ambos casos.

## **2.- La luz en 1844**

Los primeros pensadores con interés documentado sobre la naturaleza de la luz fueron los filósofos griegos. En la época de Platón (427-347 a.C.), la visión se explicaba mediante una serie de rayos que surgían del ojo y se dirigían hacia el objeto visto. Sin embargo, a partir de Aristóteles (384-322 a.C.) la Óptica quedó supeditada a la Geometría, centrándose el interés de los estudiosos en las propiedades de los rayos de luz y en los fenómenos asociados a ellos más bien que en su origen. Aristóteles estudió el arco iris y defendió que su causa era la reflexión en las gotas de agua de la nube, elaborando una teoría según la cual el arco iris era la base de un cono cuyo ápice se encontraba en el Sol y cuyo eje iba del Sol al centro del arco, pasando a través del ojo del observador. Los estudios sobre la luz continuaron con los geómetras griegos. Euclides (siglo III a.C.), y más tarde Ptolomeo (100-170), aunque seguían defendiendo la teoría según la cual los rayos salían del ojo y seguían una trayectoria recta a partir de él, obtuvieron las primeras conclusiones importantes: que el ángulo de incidencia de los rayos de luz con respecto a una línea perpendicular al espejo era igual al ángulo que formaban los rayos reflejados con esa línea, y que cambiaba el ángulo de los rayos al pasar del aire a un líquido, modificándose su trayectoria, fenómeno conocido como refracción (Figura 1). Ptolomeo midió el ángulo de refracción de los rayos al pasar del aire al agua y al vidrio, y observó que este ángulo era siempre menor que el ángulo de incidencia, pero se equivocó al suponer que esto ocurría en una proporción constante.

Las ideas de los filósofos griegos fueron transmitidas a Europa por los árabes, principalmente Alkindi (-, 873), Alhazen (965-1039), Avicena (980-1037) y el cordobés Averroes (1126-1198). Alhazen es, además, autor de importantes estudios: mostró que el ángulo de refracción no era proporcional al ángulo de incidencia y analizó los

espejos esféricos y parabólicos, las aberraciones esféricas, las lentes y la refracción atmosférica; afirmaba también que la refracción de la luz no era instantánea y rechazaba la teoría de emisión de los geómetras griegos, a favor de la idea de que la luz no iba del ojo al objeto, sino que venía del objeto al ojo, donde formaba una imagen, aunque propuso erróneamente que esto ocurría en el cristalino.

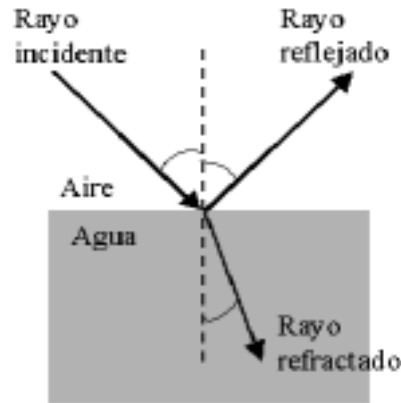


Figura 1.- Esquema que muestra un rayo de luz que incide en una superficie de separación entre dos medios, el rayo que se refleja en la superficie, y el rayo que se refracta, cambiando su dirección, al pasar de un medio al otro.

Un impulso importante a la comprensión de los fenómenos luminosos, también en la Edad Media, vendría de parte de Roberto Grossetesta (1168-1253) y sus discípulos, principalmente el británico Roger Bacon (1214-1292). Grossetesta planteó la importancia de indagar en los fundamentos de la luz, afirmando que, aunque la Geometría podía dar una descripción de lo que sucedía, no podía explicar porqué sucedía: la causa del comportamiento observado de la luz, de la igualdad de los ángulos de incidencia y de reflexión, debía buscarse en la naturaleza de la misma luz. Observó la doble refracción de los rayos de luz en las lentes, una al entrar en ellas y la otra al salir por el lado opuesto, y sugirió su empleo para agrandar los objetos pequeños y acercar los objetos lejanos, estableciendo el camino hacia la invención de las gafas, que fueron utilizadas en el norte de Italia a finales del siglo XIII. También analizó el arco iris, atribuyéndolo a la refracción, aunque pensaba que ésta era producida por la nube como un todo, que actuaba a modo de una gran lente. Más adelante, Bacon

adoptó definitivamente la teoría de que la luz se propagaba a enorme velocidad, aunque finita, y pasaba del objeto visto al ojo. Consideraba, como Grosetesta, que no se trataba del flujo de un cuerpo como el agua, sino una especie de vibración, como el sonido. No obstante, matizó que la luz se propaga mucho más deprisa que el sonido, haciendo notar que si alguien da un golpe con un martillo, cualquier observador situado a distancia verá el golpe antes de oír el ruido, del mismo modo que vemos el relámpago antes de oír el trueno. Como su maestro, examinó el arco iris a partir de la teoría de Aristóteles, manifestando que el arco que veía un observador determinado se debía solamente a aquellas gotas de agua cuyos rayos reflejados iban directamente a sus ojos. Otro discípulo de Grosetesta, el silesiano Witelo (1230, -), adaptó un aparato previamente descrito por Alhazen para determinar los valores de los ángulos de refracción de la luz al pasar por aire, agua y vidrio, con los que elaboró una tabla, e intentó referir sus resultados a diferencias en la densidad del medio. Realizó también experimentos en los que reprodujo los colores del arco iris haciendo pasar luz blanca a través de un cristal hexagonal, y comprendió que los rayos azules se desviaban más que los rojos, explicándolo mediante un debilitamiento progresivo de la luz blanca al refractarse. Ofreció, así, una de las primeras explicaciones de los colores del arco iris, aunque incorrecta, pero avanzó también en la comprensión de este meteoro al señalar la participación de tanto la reflexión como la refracción de los rayos en las gotas de lluvia individuales.

Una explicación más completa del arco iris, próxima a la vigente en la actualidad, la proporcionaría en aquella misma época Dietrich de Freiberg (-, 1311). Después de realizar experimentos con recipientes esféricos de cristal llenos de agua, Dietrich propuso la teoría de que el arco primario estaba producido por la luz que caía sobre las gotas esféricas de lluvia, siendo refractada en cada gota, reflejada en su superficie interior y refractada hacia fuera de nuevo, y que el arco secundario se debía a una nueva reflexión antes de la segunda refracción. También intentó investigar experimentalmente los colores del arco iris, mostrando que se podían reproducir haciendo pasar la luz a través de sus recipientes esféricos, y observó que estaban siempre en el mismo orden, con el rojo más próximo a la línea de incidencia, pero los explicó proponiendo que la corriente de luz

estaba constituida por columnas con cierta anchura, de manera que partes diferentes de ellas podían ser afectadas desigualmente al atravesar un medio apropiado. Así, cuando la luz caía oblicuamente sobre el cristal esférico se refractaba y debilitaba, y, de acuerdo con la teoría que había desarrollado Averroes al comentar a Aristóteles, su brillo era reducido por una aportación positiva de oscuridad pasando desde el más brillante, el rojo, al más oscuro, el azul. Una explicación similar a la de Dietrich de Freiberg, al parecer de forma independiente, fue proporcionada por los árabes Qutb al-din al-Shirazi (1236-1311) y Kamal al-din al-Farisi (-, 1320), que también se habían basado en Aristóteles y Alhazen. Al-Farisi propuso una interesante explicación de la refracción, al sugerir que podía deberse a la reducción de la velocidad de la luz al pasar a través de diferentes medios en proporción inversa a lo que denominaba la densidad óptica. Al-Farisi también propuso una teoría de la “cámara oscura”, paralela a la del judío Levi ben-Gerson (1288-1344). Este artefacto consistía en una caja herméticamente cerrada con un agujero muy pequeño a través del cual penetraban los rayos de luz formando una imagen precisa de los objetos, y fue el primer precedente de la cámara fotográfica.

En resumen, podemos afirmar que en la Edad Media se disponía ya de un profundo conocimiento de los aspectos geométricos de los rayos de luz, aunque aún no se había establecido una relación matemática válida para la refracción. Sin embargo, las ideas propuestas sobre su naturaleza física eran muy rudimentarias, y habría que esperar varios siglos para ser capaces de interpretar correctamente el origen de los diferentes colores.

El siguiente impulso significativo a nuestro conocimiento sobre la luz se produjo en el siglo XVII, tanto en las aplicaciones de la óptica geométrica como en los modelos físicos. La auténtica ley de la refracción, que nos proporciona la relación matemática aceptada hoy entre el ángulo incidente del rayo de luz y el ángulo del rayo refractado al cambiar de medio, parece haber sido descubierta en 1610 por el inglés Thomas Harriot (1560-1621), y alrededor de 1620 por el holandés Willebrord Snell van Roijen (1591-1626), siendo denominada hoy “ley de Snell”. También pudo haber sido obtenida con anterioridad por el francés René Descartes (1596-1650), aunque no la publicaría hasta 1637, fecha de edición de su “Dioptrique”,

escrito explícitamente para dar una base científica a la construcción de lentes para telescopios y gafas y para presentar sus contribuciones a la fisiología de la visión. Tanto Snell como Descartes y el también francés Pierre de Fermat (1601-1665) consiguieron importantes avances en la aplicación de las matemáticas al estudio de la luz. El análisis matemático del arco iris de Descartes constituye la explicación aceptada en la actualidad, y el principio de Fermat, enunciado en 1658, según el cual un rayo luminoso que viaja entre dos puntos sigue el camino que puede recorrer en un tiempo mínimo, ha sido la base de muchos estudios posteriores en óptica geométrica. Y en cuanto a la interpretación de los colores, Johan Marcus Marci de Kronland (1595-1667) demostró que si se separaban o dispersaban los rayos de luz en los diferentes colores mediante un prisma de vidrio, los rayos de un color determinado ya no eran dispersados por un segundo prisma. Sin embargo, ninguno de estos estudiosos consiguió elaborar una teoría adecuada del color, que tendría que esperar unos cuantos años más para ser explicado de forma satisfactoria.

Sería a finales del siglo XVII y principios del XVIII cuando aparecerían las primeras teorías modernas sobre la naturaleza de la luz, con la pretensión de explicar los distintos fenómenos experimentales conocidos. La principal de esas teorías se debe a Isaac Newton (1642-1727). Newton, quizá más conocido por sus importantísimas contribuciones en otros campos de la Física, como la ley de la gravitación universal, es también una figura clave en la historia de la óptica. Propuso en 1669 su teoría corpuscular, según la cual la luz está formada por pequeños corpúsculos o gránulos que emergen de un foco formando un rayo luminoso a través del cual se desplazan; tras ser reflejados de forma especular o difusa en los objetos, inciden en el ojo. El movimiento de los corpúsculos integrantes del rayo se rige por las mismas leyes mecánicas de los cuerpos materiales, de manera que si llegan a un espejo, son reflejados por el choque elástico con su superficie, y si penetran en un medio diferente como el agua, existe una fuerza efectiva en una delgada capa superficial que actúa sobre los corpúsculos luminosos causando en ellos una aceleración tal que emergen de esa superficie con velocidad diferente. La luz estaba constituida, pues, por partículas, y existían fuerzas que actuaban entre esas partículas de luz y las de la materia ordinaria. Descompuso la luz blanca haciéndola pasar por un prisma

triangular de vidrio y, lo que es más importante, la recompuso mediante un segundo prisma invertido, demostrando así que la luz blanca no es pura sino que es una mezcla de corpúsculos correspondientes a los diferentes colores. Dio el nombre de “espectro” a la sucesión de colores obtenida, semejante a la del arco iris, y explicó su aparición aduciendo que el vidrio o el agua tienen un índice de refracción diferente para cada color, al acelerarse de forma desigual los distintos tipos de corpúsculos.



Figura 2.- Sir Isaac Newton, autor de la teoría corpuscular de la luz, en sellos de correos de diferentes países

Una visión alternativa a la de Newton sería propuesta por el holandés Christian Huygens (1629-1695). En su “Tratado sobre la luz” de 1690, Huygens desarrollaba una teoría ondulatoria según la cual la luz se propaga emitiendo una nueva onda desde cada punto que ha alcanzado en un instante anterior, y mostraba que podía explicar así las propiedades de la reflexión y la refracción. Como otros seguidores de Descartes, Huygens criticó las teorías del color de Newton, a las que tachaba de meramente descriptivas y predictivas pero no explicativas. Newton, reconocido maestro del método experimental, se defendió afirmando que su investigación de las leyes de los fenómenos era independiente de cualquier indagación sobre las causas o procesos mecánicos que las producían, que solamente después de

establecidas experimentalmente las leyes de los fenómenos como datos que debían ser explicados, podía comenzar el intento de su interpretación con esperanzas de éxito, y que ninguna ley establecida experimentalmente podía ser refutada simplemente porque fuera contradicha por una hipótesis relativa a las causas de los fenómenos.

Dado el gran éxito de las teorías de Newton sobre la gravitación y el movimiento de los cuerpos, su visión se consolidó a lo largo del siglo XVIII, imponiéndose la llamada concepción “mecanicista” del Universo, según la cual todos los fenómenos de la naturaleza se podrían reducir en último lugar a simples fuerzas de atracción y repulsión cuyas intensidades dependen totalmente de la distancia. Siempre que aparecía un nuevo fenómeno, se suponía la existencia de una sustancia que lo explicara. En ese contexto cabía perfectamente la teoría corpuscular de la luz, que la representaba como un fluido imponderable, esto es, que no pesaba y no restaba peso a los cuerpos que la emitían. Se pensaba que estos fluidos estaban compuestos por partículas que se repelían, que eran “sutiles”, esto es, capaces de extenderse por los espacios vacíos entre las partículas de la materia, y eran atraídos por la materia ordinaria. A finales del XVIII existía una multiplicidad de fluidos imponderables: uno o dos para la electricidad, uno para el calor, llamado calórico, el “flogisto”, que le daba a los cuerpos la capacidad de arder, y los de la luz. Esta teoría de las fuerzas intercorpúsculares y de los fluidos imponderables tuvo fuertes defensores, como el gran científico francés Pierre Simon de Laplace (1749-1827), que ejerció una influencia dominante en la Francia napoleónica. Sin embargo, al morir Napoleón, las teorías laplacianas fueron duramente atacadas, así como las de fluidos imponderables, aunque la formulación matemática de Laplace, que permitía plantear los problemas físicos dentro de la concepción mecanicista sin necesidad de conocer la constitución de la materia, siguió vigente y reconocida como gran aportación a la Ciencia. La teoría ondulatoria de la luz fue entonces propuesta como una alternativa a la óptica corpuscular.

En la victoria de la teoría ondulatoria sobre la corpuscular fue determinante la dificultad de la segunda para explicar el fenómeno de la difracción, observado por Francesco Grimaldi (1618-1663) y publicado por primera vez en 1665, que consistía en la aparición de



círculos claros y oscuros en una pantalla después de atravesar la luz un agujero muy pequeño. Los defensores de la teoría corpuscular lo habían interpretado mediante una interacción de tipo mecánico de los corpúsculos de luz con los bordes del agujero, pero fueron incapaces de explicar experimentos posteriores de Thomas Young (1773-1829) en los cuales se observaban bandas alternativamente claras y oscuras cuando la luz atravesaba dos agujeros muy pequeños y muy próximos (Figura 3). Según las predicciones de la teoría corpuscular deberían haberse observado dos familias de círculos, y sólo los fenómenos de interferencia de las ondas que atraviesan los dos agujeros podían dar cuenta de la aparición de las bandas.

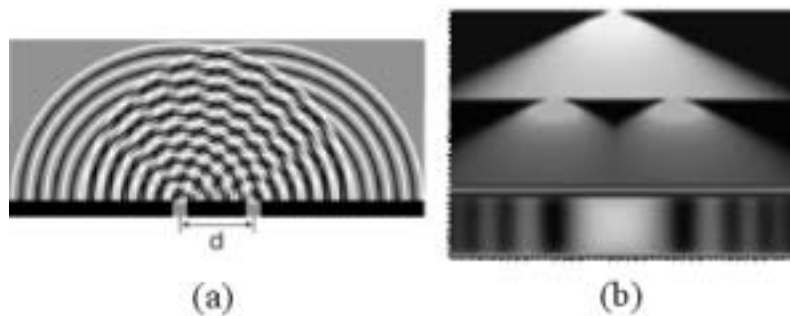


Figura 3.- Detalles del experimento de Young. (a): Esquema de la difracción a través de dos agujeros próximos, mostrando la interferencia de las ondas luminosas. (b): Aparición de las bandas claras y oscuras debidas a las interferencias

Pero, a principios del siglo XIX, la propagación de cualquier tipo de ondas requería un sustrato material que oscilara, por lo que Young, cuando propuso su teoría ondulatoria, supuso la existencia de una sustancia etérea universal, y argüía que la luz, el calor, y las capacidades cohesivas y repelentes de los cuerpos se debían a ese éter. Cuando Young elaboró su teoría ondulatoria, entre 1799 y 1804, estaba plenamente vigente la teoría corpuscular y la de los fluidos imponderables y recibió fuertes críticas, gozando de mayor aceptación el desarrollo posterior de las ideas de Young que publicaría Augustin Jean Fresnel (1788-1827).

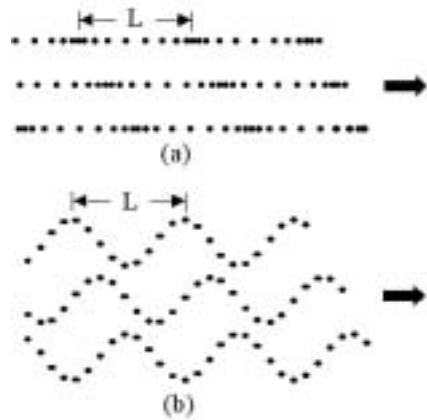


Figura 4.- Propagación de ondas longitudinales y transversales. (a).- Ondas longitudinales: la dirección de oscilación coincide con la dirección de propagación. (b).- Ondas transversales: la dirección de oscilación es perpendicular a la dirección de propagación. Se muestra también la longitud de onda L en los dos casos.

Fresnel reformuló la óptica a partir de la dinámica del éter lumínico, como medio propagador de ondas, con cuyas vibraciones explicaba prácticamente todos los fenómenos de la luz. No obstante, cuando envió en 1819 su artículo sobre la difracción óptica, aunque ganó el premio de la Academia de París gracias a él, no consiguió convertir a los laplacianos. La razón era que aún quedaba un punto débil: la explicación de la polarización de la luz, que había sido observada por Etienne Louis Malus (1775-1812) en 1808. Fresnel había supuesto en principio que el éter se comportaba como un fluido y que las ondas luminosas se propagaban en él de forma similar a como lo hacen las ondas de sonido en el aire, es decir, mediante compresiones y expansiones. Suponía pues que las ondas de luz eran longitudinales (Véase la Figura 4). Sin embargo, esto no explicaba porqué la luz se transmitía a través de dos cristales polarizadores si sus ejes eran paralelos mientras que no lo hacía si los ejes eran perpendiculares. Una explicación mediante la teoría ondulatoria requería que las ondas fueran transversales, es decir, la vibración tendría que ser perpendicular al sentido de avance de la onda, de la misma manera que podemos observar el movimiento hacia arriba y hacia abajo de un corcho que flota en el agua al propagarse las ondas de su superficie. En la luz polarizada las vibraciones transversales

estarían restringidas a un plano (Figura 5), y no podrían atravesar el polarizador si su eje óptico se orienta perpendicularmente a ese plano. Pero para que esto ocurriera el éter no podía ser fluido sino rígido.

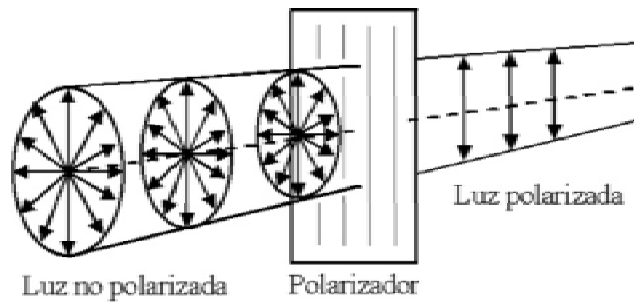


Figura 5.- Antes de atravesar el polarizador, la luz vibra en todas las direcciones transversales. Después del polarizador, la vibración está restringida a un plano transversal. Este efecto no se podría explicar si las ondas fueran longitudinales

Con la teoría ondulatoria de Fresnel parecían haberse contestado todos los interrogantes planteados con respecto a la naturaleza de la luz, que al basarse en vibraciones del éter quedaba dentro de la concepción mecánica de la naturaleza. En 1830 fue publicado un artículo determinante de Augustin Louis Cauchy (1789-1857) en el que, partiendo de la hipótesis de un éter con las características de un medio sólido elástico, demostró que se podían explicar matemáticamente las vibraciones transversales de la luz. En la década de 1830 la teoría ondulatoria de la luz estaba totalmente aceptada, y sólo quedaba el problema de construir un modelo mecánico del éter capaz de transmitir ondas transversales. Este éter debería llenar todo el espacio, ya que a través de él recibimos la luz procedente de las estrellas. Con ese propósito, George Gabriel Stokes (1819-1903) publicó en la década de 1840 una serie de artículos en los que suponía que el éter tenía una estructura corpuscular, aunque evitaba hacer uso de una hipótesis molecular. Sugería que el éter podía actuar como un fluido con respecto al movimiento de la Tierra y de los planetas a su través, y como un sólido elástico con respecto a las vibraciones en que consistía la luz.

En conclusión, en el año de nacimiento del Doctor Cerdá y Rico, el problema de la naturaleza de la luz parecía estar resuelto, y únicamente quedaba el “fleco” de conseguir un modelo coherente de la naturaleza del éter. Además, sólo un año más tarde se completaría el conocimiento disponible sobre la luz con la medida de su velocidad por parte de Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896). Para ello, Fizeau interpuso una rueda dentada giratoria en el camino de un rayo luminoso orientado hacia un espejo, de manera que, a medida que la rueda se aceleraba, llegaba un momento en el que el rayo incidente penetraba por un agujero de la rueda y el reflejado regresaba por el hueco siguiente. La velocidad de la luz se dedujo de la velocidad de la rueda en ese momento y la distancia recorrida por el rayo. El resultado obtenido por Fizeau fue de unos 315.000 kilómetros por segundo, un cinco por ciento superior al valor aceptado en la actualidad.

### **3.- Teoría electromagnética de la luz**

Allá por el año 1850 la Física había conseguido una unicidad y una coherencia interna bien definidas que no se hubieran imaginado a principios del siglo XIX. Los fenómenos físicos quedaban unificados en el marco explicativo de la concepción mecánica, la necesidad de la formulación matemática estaba bien establecida y el principio de conservación de la energía era aceptado como una ley universal. En el caso de la luz, cuya naturaleza ondulatoria había sido recientemente admitida de forma inequívoca, se acababa de demostrar su estrecha relación con los otros fenómenos gracias a un descubrimiento reciente del inglés Michael Faraday (1791-1867): Faraday había observado en 1845 que si se aplicaba un campo magnético intenso a un medio transparente que estaba siendo atravesado por luz polarizada, se producía una rotación del plano de polarización. Se trataba del primer caso conocido de interacción entre el magnetismo y la luz, y le llevó a proponer que todas las fuerzas de la naturaleza se reducen a una sola, reforzando así la concepción unificada de la Física.

En realidad, previamente se había establecido una fuerte interrelación entre la electricidad y el magnetismo, campos considerados independientes hasta el siglo XIX. Para ello habían sido decisivos los experimentos del danés Hans Christian Oersted (1777-

1851), el francés André Marie Ampère (1775-1836), y el mencionado Michael Faraday. Oersted observó en 1820 que una corriente eléctrica desviaba una aguja magnética situada en sus proximidades, y que esa desviación se producía en direcciones opuestas si la aguja se colocaba por encima o por debajo del hilo que transportaba la corriente, por lo que infirió que las fuerzas eléctricas ondulantes del hilo producían un movimiento circular en el espacio que lo rodeaba. Se propuso entonces que las fuerzas eléctricas y magnéticas actuaban en círculos y se distribuían espacialmente. Ampère extendió los resultados de Oersted al demostrar que había interacciones entre los hilos que portaban corrientes eléctricas y elaboró una teoría matemática del electromagnetismo basada en fuerzas atractivas y repulsivas entre elementos de corriente. Ampère explicó así la propagación de la acción electromagnética recurriendo a la idea del éter lumínico de Fresnel: el éter estaba constituido por fluidos eléctricos positivos y negativos, los fenómenos electromagnéticos tenían lugar por la perturbación de los fluidos eléctricos, y en cambio la luz era el resultado de las vibraciones del fluido. Y Faraday había descubierto en 1831 que el paso de una corriente eléctrica por un hilo enrollado en un lado de un anillo de acero inducía una corriente en un hilo enrollado en el otro lado del anillo. Sugirió que el efecto se debía a la propagación de una “onda de electricidad”, esto es, las acciones eléctrica y magnética se propagaban en el tiempo y eran consideradas como el resultado de un movimiento progresivo.

Faraday introdujo el término “campo magnético” y usó inicialmente el concepto de líneas de fuerza como medio descriptivo para representarlo geoméricamente, esto es, proponía dibujar unas líneas curvas que representaran las direcciones en las que actuaban las fuerzas y cuya densidad fuera mayor allí donde las fuerzas eran más intensas. No obstante, cuando publicó en 1852 el artículo titulado “El carácter físico de las líneas de fuerza magnética”, en el que ilustraba experimentalmente esas líneas con las figuras que adoptaban pequeñas limaduras de hierro esparcidas alrededor de los imanes, declaró que las fuerzas “sólo pueden tener relación las unas con las otras mediante líneas de fuerza curvas a través del espacio circundante, y no se pueden concebir líneas de fuerza curvas sin que se den las condiciones de una existencia física en ese espacio intermedio”. Las líneas de fuerza dejaron de ser meros símbolos y adquirieron un sentido físico

pleno, pudiendo desempeñar el éter la función de transmisión de esas fuerzas. La teoría de Faraday fue apoyada por uno de los científicos más influyentes de la época, el británico William Thomson (1824-1907), también conocido como lord Kelvin al ser nombrado barón por la reina Victoria en 1892 en reconocimiento a su obra. Thomson publicó en 1851 el artículo “Una teoría matemática del magnetismo”, en el que utilizaba el concepto de “campo de fuerza” y representaba el campo magnético como una distribución continua en el espacio de una “imaginaria materia magnética”, que no se concebía como una sustancia, sino como una realización concreta de la teoría de Faraday de la primacía de las líneas de fuerza.

También fueron utilizadas las ideas de Faraday por el científico que va a tener el mayor protagonismo en este apartado: el británico James Clerk Maxwell (1831-1879). En su primera teoría del campo, publicada en 1856 con el título “Sobre las líneas de fuerza de Faraday”, Maxwell destacaba la utilidad de la idea en cuanto que representación geométrica de la distribución espacial de fuerza en el campo, no como representación física del campo, ya que por entonces defendía la necesidad de proponer un modelo mecánico concreto del éter. En su artículo “Sobre las líneas de fuerza físicas”, de 1861, presentó su propia teoría física del éter en la que suponía que el medio magnético podía ser representado como un fluido lleno de tubos de vórtices o remolinos en rotación, siendo su ordenación geométrica la indicada por las líneas de fuerza, y quedando determinada la intensidad del campo por las velocidades de rotación de esos remolinos. Sugería la existencia de capas de partículas que actuaban como ruedas de engranaje, colocadas entre los vórtices contiguos, de manera que la rotación de cada vórtice causase que los vecinos girasen en la misma dirección. Representaba, pues, el medio magneto-eléctrico como un éter celular, descrito como una colmena. Confesaba, sin embargo, que con su modelo sólo intentaba mostrar la posibilidad de una explicación mecánica del campo, sin reclamar que ese modo de transmisión de fuerzas fuera el realmente existente en la naturaleza. No obstante, en el artículo “Una teoría dinámica del campo electromagnético”, publicado en 1865, abandonó todo intento de formular un modelo mecánico específico del campo, y empleó en su lugar los métodos de la dinámica analítica, no vinculados a modelo mecánico específico alguno. Dio aquí la primera definición clara del

término campo, afirmando que la teoría que proponía “puede ser llamada una teoría del campo electromagnético, porque trata del espacio en la proximidad de los cuerpos eléctricos o magnéticos”. Pero Maxwell seguía dentro del marco conceptual dinámico: resaltaba que el campo se representaba dinámicamente mediante transformaciones de energía en el éter, esto es, de la energía cinética del movimiento de las partes del éter y de la energía potencial almacenada en las conexiones de la estructura mecánica del éter.



Figura 6.- James Clerk Maxwell, autor de la teoría de la que se dedujo la naturaleza electromagnética de la luz

En 1873, fecha en la cual el Doctor Cerdá y Rico se había casado e instalado ya en Cabra del Santo Cristo, Maxwell publicaba su “Tratado sobre electricidad y magnetismo”, en el que desarrollaba las ideas de Faraday formulando modelos físicos y matemáticos de forma más comprensiva y profunda. Afirmaba que el campo era un sistema en movimiento que se comunicaba de una parte a otra “mediante fuerzas cuya naturaleza y leyes no hemos todavía ni siquiera intentado definir”. Mediante las ecuaciones de Maxwell se había conseguido plantear una simetría entre las ecuaciones de la electricidad y del magnetismo, se predecía la existencia de las ondas electromagnéticas, y se llegaba a una consecuencia inesperada y sorprendente, que es uno de los hechos más importantes en esta historia: la velocidad esperada de las ondas electromagnéticas que se propagaban en el éter era la misma que se había medido experimentalmente para la luz. Llegó a la conclusión de que “difícilmente podemos eludir la inferencia de que la

luz consiste en las ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos”. Con la identificación de los medios electromagnético y lumínico elaboró su “teoría electromagnética de la luz”, que concebía la luz como una vibración electromagnética en el éter, unificando la óptica y el electromagnetismo fundamentados en una teoría mecánica del éter.

La teoría electromagnética de Maxwell tuvo una brillante confirmación experimental con la detección de las ondas electromagnéticas en 1888 por parte del alemán Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894), en cuyo honor se ha denominado “herzio” a la unidad de la frecuencia de vibración. En su experimento, Hertz inventó un generador de chispa que generaba las ondas, y demostró que están sometidas a las mismas leyes de reflexión y refracción de las ondas luminosas. El electromagnetismo y la óptica quedaban definitivamente unificadas y se abría de forma inmediata el camino a la radio y la telegrafía sin hilos, que sería desarrollada por el italiano Guglielmo Marconi (1874-1937) a partir de 1895, y al impresionante despliegue de la televisión y las comunicaciones inalámbricas a lo largo de todo el siglo XX. La naturaleza de la luz quedaba claramente establecida al descubrir que se trataba de un tipo de onda electromagnética similar a las ondas de radio, de las que se diferenciaba únicamente por su longitud de onda (definida en la Figura 4): mientras que la longitud de onda de las ondas de radio varía entre unos metros y varios kilómetros, la de las ondas de luz es del orden de media millonésima de metro. Entre ambas se encontrarían las microondas y las de la radiación infrarroja. La existencia del espectro electromagnético recibiría una fuerte confirmación adicional con el descubrimiento en 1895 de los rayos X, por parte de Wilhelm Conrad von Röntgen (1845-1923), por el que se le concedería el primer premio Nobel de Física en 1901. Estos rayos, que tenían la sorprendente propiedad de atravesar la materia orgánica y que permitieron un importante avance de la medicina, no resultaron ser más que otro tipo de onda electromagnética con longitud de onda más de mil veces menor que la de la luz. La peculiaridad de las ondas de luz con respecto al resto de las ondas electromagnéticas es que sus longitudes de onda son las que permiten estimular los receptores que existen en el interior del ojo humano.



El desarrollo de la teoría electromagnética tuvo también una importante consecuencia filosófica en los últimos años del siglo XIX: el abandono de la concepción mecanicista del Universo, vigente desde los tiempos de Newton, en favor de una concepción electromagnética. Fueron varios los científicos que comenzaron a plantear la necesidad de un cambio conceptual. En su artículo titulado “Sobre la teoría electromagnética de la reflexión y refracción de la luz”, de 1880, George Francis Fitzgerald (1857-1901) desarrolló una teoría en la que dotaba al éter de propiedades puramente electromagnéticas. Deseaba “emancipar nuestras mentes de la esclavitud del éter material” y, por lo tanto, no postulaba el movimiento del éter, limitándose a caracterizar sus propiedades electromagnéticas. Sin embargo, después de demostrada la existencia de las ondas electromagnéticas, Fitzgerald declaró que el experimento de Hertz probaba la teoría etérea del electromagnetismo. Quizá la voz más influyente en el cambio conceptual sería la del holandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), receptor en 1902 del segundo premio Nobel de Física. En la década de 1890, Lorentz elaboró su teoría del éter electromagnético en la que proponía privar al éter de toda propiedad mecánica, reduciendo las leyes de la naturaleza a las propiedades definidas por las ecuaciones del campo electromagnético. En su gran tratado “Tentativa de una teoría de los fenómenos eléctricos y ópticos de los cuerpos en movimiento”, de 1895, evitaba recurrir a los principios mecánicos y enunciaba las ecuaciones del campo electromagnético a manera de postulados electromagnéticos fundamentales. Mientras Hertz seguía afirmando que el éter electromagnético debía ser representado mediante el movimiento de masas ocultas, Lorentz mantenía que los postulados del campo debían basarse en una analogía electromagnética, y que, separado de la materia ordinaria, el campo era una realidad física independiente. Alrededor de 1900 la teoría de Lorentz ejercía una profunda influencia: muchos científicos sostenían que sería la electrodinámica, y no la mecánica, la que habría de proporcionar los fundamentos unificadores de la Física.

Finalizaba el siglo XIX, y mientras el Doctor Cerdá y Rico se aprovechaba de la luz y de sus propiedades de modificación de las propiedades químicas de la materia para impresionar magistralmente sus placas, los físicos parecían haber desvelado todos los secretos

sobre su naturaleza. Pero quedaban aún algunos detalles por resolver, que producirían algunas sorpresas en los años venideros.

#### **4.- La luz en el siglo XX: Relatividad y cuantos de luz**

A lo largo del siglo XIX se habían conseguido importantísimos avances en la comprensión de la naturaleza. Sin embargo, gran parte del impresionante edificio científico se había construido sobre un concepto, el éter, cuya naturaleza era aún desconocida. Podría extrañarnos hoy que la admisión de una sustancia misteriosa, con las curiosas propiedades de ser un fluido sutil tal que los cuerpos celestes se pudieran mover en su seno sin ver perturbado su desplazamiento y de ser suficientemente rígido para permitir la propagación de las ondas electromagnéticas transversales con muy altas frecuencias de vibración, no hubiera planteado más problemas a los científicos. Pero hemos de recordar que la propia materia “palpable” era también misteriosa en cierta manera, puesto que, aunque se conocía la existencia de los átomos y sus propiedades combinatorias en las reacciones químicas, no se conocía su estructura interna. Las primeras partículas constituyentes de los átomos, los electrones, no se descubrieron hasta 1897, fecha en la que los identificó el inglés Joseph John Thomson (1856-1940), y el primer modelo atómico que distinguía entre un núcleo pesado y una corteza electrónica, propuesto por Ernest Rutherford (1871-1937), no aparecería hasta 1911. No obstante, el cambio conceptual hacia una concepción electromagnética surgido a finales del siglo XIX hacía menos necesaria la idea de un soporte material y el éter estaba dejando de ser imprescindible.

Los intentos de observación directa del éter estuvieron muy relacionados con la medida de la velocidad de la luz, a la que dedicó prácticamente su vida el estadounidense de origen alemán Albert Abraham Michelson (1852-1931), premio Nobel de Física en 1907. Michelson había obtenido el valor 299.853 kilómetros por segundo, en 1882, algo menor del medido por Fizeau, y lo refinó a 299.798 kilómetros por segundo en 1923, haciendo a la luz atravesar la distancia entre dos montañas y volver al punto de partida, recorriendo una distancia de unos 35 km. En 1931 diseñó un instrumento en el que la luz recorría muchas veces la longitud de un tubo del que se había

extraído el aire, con un camino óptico total de 16 kilómetros; ese experimento se llevaría a cabo en 1933, después de su muerte, obteniendo 299.794 kilómetros por segundo, muy próximo al valor aceptado en la actualidad.

Michelson diseñó a lo largo de su vida diversos interferómetros, es decir, es decir, aparatos contruidos para producir figuras de interferencia de la luz. Pero el más famoso es el que había construido con ayuda del también estadounidense Edward Williams Morley (1838-1923) con el propósito de medir la velocidad de la luz con respecto al éter estacionario. En ese interferómetro la luz recorría dos caminos, uno en el sentido de avance de la Tierra y otro en sentido perpendicular, esperando que la diferencia de velocidades de los dos rayos, debida al movimiento de la Tierra con respecto al éter estacionario, hiciera que al unirse éstos de nuevo se produjeran figuras de interferencia. El resultado del experimento, llevado a cabo en 1887, fue negativo: la velocidad de la luz en los dos caminos resultó ser la misma y no se observaron esas figuras, por lo que habría que descartar la hipótesis del éter estacionario. Este resultado, entre otros, llevó a Albert Einstein (1879-1955) a postular la inexistencia del éter y la constancia de la velocidad de la luz en todos los sistemas de referencia. En uno de sus cuatro famosísimos artículos publicados en 1905, titulado “Sobre la electrodinámica de los cuerpos móviles”, propuso que la velocidad de la luz en el vacío es una constante de la naturaleza y no depende del estado de reposo o movimiento del cuerpo que la emite o la detecta. Como consecuencia de este postulado, dedujo las ecuaciones de su conocida teoría de la Relatividad restringida.

En otro de sus cuatro artículos de 1905, Albert Einstein interpretó uno de los resultados experimentales que aún planteaban cuestiones no totalmente resueltas sobre la acción de la luz: el efecto fotoeléctrico. Este efecto había sido descubierto por Heinrich Hertz, mientras investigaba en 1887 las descargas eléctricas en los gases. Hertz observó que la presencia de luz ultravioleta cambiaba el voltaje a partir del cual se producían las descargas entre los electrodos. Philipp Eduard Anton Lenard (1862-1947), premio Nobel de Física en 1905, analizó con detalle este efecto, demostrando que lo que se emite de los metales en el efecto fotoeléctrico son electrones, una vez

que se sabía de la existencia de éstos, y que la corriente eléctrica producida para una longitud de onda determinada es proporcional a la intensidad de la luz que la causa. Pero la explicación última la proporcionó Einstein, en su artículo “Sobre un punto de vista heurístico respecto a la producción y transformación de la luz”: elaboró en este trabajo una teoría cuántica de la luz, afirmando que ésta se transmite en paquetes indivisibles de energía, llamados fotones, de energía proporcional a su frecuencia de vibración, que se comportan como partículas, a pesar del carácter ondulatorio del conjunto. Para ello adoptó la ley de la radiación del alemán Max Karl Planck (1858-1947), premio Nobel de Física en 1918, según la cual la energía electromagnética sólo podía ser absorbida en cantidades elementales que llamaba “cuantos”. Con su hipótesis, Einstein explicó que solamente se podía arrancar electrones al metal emisor si la energía de los cuantos alcanzaba un valor mínimo, para lo que se requería un valor mínimo de la frecuencia de vibración de la luz, y que la mayor intensidad significaba un mayor número de fotones, capaces de arrancar una mayor cantidad de electrones. Con la teoría de Einstein quedó establecido el comportamiento dual de la luz: como onda y como corpúsculos de energía.



Figura 7.- De izquierda a derecha, Max Planck, Marie Curie, Hendrik Lorentz y Albert Einstein. Detalle de la fotografía “de familia” de los asistentes a la Conferencia Solvay, en 1927

Finalmente, Albert Einstein publicó en 1916 un artículo quizá más revolucionario, titulado “Fundamentos de la teoría general de la Relatividad”, en el que, entre otras cosas, predecía que la luz había de ser desviada por los campos gravitatorios intensos. Einstein propuso que se comprobara si la luz de una estrella próxima se desviaba al pasar junto al Sol, aprovechando para ello un eclipse total. El 29 de Mayo de 1919, Arthur Stanley Eddington (1882-1994) realizaba la comprobación, confirmando las predicciones de la teoría.

En 1921, mismo año en que fallecía el Doctor Cerdá y Rico, Albert Einstein recibía el premio Nobel de Física por su explicación del efecto fotoeléctrico, aunque en esa fecha era ya mucho más conocido por la teoría de la Relatividad. A lo largo de los últimos 73 años se habían conseguido importantes avances, y se había llegado a un alto nivel de comprensión sobre la naturaleza de la luz, muy próximo al disponible en la actualidad. Pero nadie podía afirmar entonces, ni puede afirmar hoy, que la luz hubiera revelado todos sus secretos.

### **Bibliografía**

- A.C. Crombie, “Historia de la Ciencia: De San Agustín a Galileo. Vol. 1 y 2”, 2ª Edición, Alianza Editorial, Madrid, 1979.
- P.M. Harman, “Energía, fuerza y materia: el desarrollo conceptual de la Física del siglo XIX”, Alianza Editorial, Madrid, 1990.
- A. Einstein y L. Infeld, “La evolución de la Física”, Biblioteca Científica Salvat, Barcelona, 1986.