

## Newton y Maxwell: la contraposición corpúsculos-onda

**Resumen:** El presente texto tiene por objetivo explicar las teorías sobre la luz de Isacc Newton y James Clerk Maxwell, dándole un énfasis al problema de la contraposición entre una concepción corpuscular y una ondulatoria de la luz, mostrando de esa manera que la dualidad onda-partícula que surge en la física durante el siglo XX tiene un precedente en esta contraposición que se muestra en los estudios de estos dos pensadores.

**Palabras clave:** Luz, Newton, Maxwell, corpúsculo-onda

**Abstract:** This article studies the theories of light of Isacc Newton and James Clerk Maxwell, giving emphasis on the problem of the contraposition between the corpuscular and the wave conceptions about light, showing this way that duality wave-particle that arise in the twentieth century has a precedent in this contraposition present in the work of this two thinkers.

**Key words:** light, Newton, Maxwell, corpuscle-wave

En 1704 se da un hecho fundamental en el estudio de la luz, ya que sale a la luz (valga la metáfora) la obra *Opticks* de Sir Isaac Newton, obra que tiene un gran impacto en la comunidad científica de la época y que lo convierte en una especie de celebridad científica (justamente un año después es nombrado caballero por la Reina Ana Estuardo). El impacto de esta obra es tal que Albert Einstein considera que se tuvo que esperar más de un siglo y medio para el siguiente gran avance teórico en el campo de la óptica.

Al señalar esto, Einstein se refiere al trabajo de James Clerk Maxwell *A Treatise on Electricity and Magnetism*, en el cual formula la teoría electromagnética clásica, con la cual produce el cambio en la concepción de la realidad “más profundo y fructífero que se ha producido en la física desde los tiempos de Newton” (Einstein, 99). Justamente estos dos autores, señalados y admirados por Einstein son el objeto de la presente ponencia. Esto porque a pesar de que la teoría acerca de la luz fue construida por el aporte de muchos grandes pensadores y científicos, la unidad teórica con la que la dotaron estos dos grandes

científicos no tiene precedentes en la historia de la ciencia.

Las teorías de Newton y de Maxwell sobre la luz nos muestran un esfuerzo por unificar las leyes de la física, y además nos muestra que en este esfuerzo siempre ha estado presente de alguna manera la dualidad onda-partícula (entendida en esta época como una contraposición entre una teoría corpuscular y una ondulatoria de la luz) que tanto ha dado que hablar en la física contemporánea. El esfuerzo de estos autores por la unificación y superación de este problema se refleja en la concepción que tuvieron acerca de la naturaleza de la luz. Para Newton concebir la luz cómo partícula le permitía colocarla como un fenómeno más dentro de un universo mecánico, y por otro lado, la concepción ondulatoria de la luz derivada de la Teoría electromagnética de Maxwell también le permite colocarla dentro del amplio espectro electromagnético junto a la electricidad y el magnetismo.

El presente trabajo pretende dar un pequeño recorrido por las teorías ópticas de estos dos pensadores con los objetivos de mostrar las ideas que están detrás de las mismas y mostrar cómo la luz ha sido uno de los grandes problemas de la física, ya que su estudio nos ha heredado una contraposición entre dos concepciones acerca de la misma (como corpúsculos o como ondas), las cuales en el siglo XX serán reelaboradas completamente en

lo que será la dualidad onda-partícula de la física contemporánea.

### **Newton**

Desde la antigüedad se había llegado a la conclusión de que algunas de las propiedades de la luz pueden ser explicadas de mejor manera bajo la hipótesis de que la luz está constituida por pequeños corpúsculos (1) que viajan en línea recta, de ahí que el primer gran estudio acerca de la luz (Ὀπτικὰ de Euclides) sea un estudio inscrito dentro de lo que hoy llamamos óptica geométrica. El hecho de que la luz se mueve en línea recta es la presunción principal de la que parte esta teoría de la luz, el razonamiento detrás de esto es que la sombra que produce la luz al pasar por un obstáculo es completamente pronunciada y aguda. Así, esta fue prácticamente la única teoría acerca de la naturaleza de la luz hasta el siglo XVII, fue defendida por Euclides, Herón de Alejandría, Claudio Ptolomeo y Alhacén.

En la modernidad la teoría atomista fue defendida por Pierre Gassendi en Francia, Isaac Beeckman en Holanda y Walter Charleton en Inglaterra. Al menos este último parece tener gran influencia en Isaac Newton, quien para 1664 en sus escritos filosóficos mostraba su acuerdo con la tesis atomista de Charleton al señalar la necesidad de que la materia estuviese constituida por átomos, en contra de la teoría cartesiana del continuo (Darrigol, 2012).

Según Newton, su perspectiva acerca de la naturaleza de la luz proviene de sus experimentos. Algunos de estos experimentos se llevaron a cabo durante sus años más creativos (1665 y 1666, llamados sus *anni mirabiles*), durante los cuales Newton, aun siendo estudiante en Cambridge University, se tuvo que retirar al campo para escapar de la plaga bubónica que provocó una fuerte pandemia en este periodo (2).

Durante estos años Newton trabajó en sus experimentos y teorías día y noche, casi de manera continua, descuidando todos los demás aspectos de su vida (el descanso, la alimentación, su familia, el aseo personal, incluso su salud). Cuenta una historia sobre esta época, recolectada por Bardi (2006), que al estar interesado en la luz él miraba el sol directamente por largos periodos de tiempo y que luego veía las “fantasías” (imágenes) de color en su campo de visión de manera que tenía que encerrarse en un cuarto oscuro durante días para restaurar su visión. También hizo experimentos con sus ojos utilizando una gran aguja para hacer agujeros en el cuero (*bodkin*), la cual introducía dentro de su cavidad ocular para presionar el ojo y alterar su retina, de manera que pudiera estudiar los efectos visuales que esto producía.

Otros experimentos, mucho menos riesgosos, son los conocidos experimentos con prismas (los cuales ya había iniciado en Cambridge). Estos le permitieron observar que la luz blanca se descompone en colores, y que

posteriormente estos colores pueden componer nuevamente la luz blanca por medio del proceso inverso.

Para explicar esto, Newton propone dos teorías similares: en la primera, considera que este fenómeno se debe a que al pasar a través del prisma las partículas que constituyen la luz, que tienen la misma masa, se aceleran unas más que otras, siendo así los distintos colores partículas viajando a distintas velocidades (con distinto *momentum*). La segunda teoría establece que la luz es constituida por partículas con distintas masas que tienen una velocidad inicial igual, y que al pasar por el prisma se separan, ya que los distintos tamaños de partículas van a verse afectados de distinta manera por la interacción con el prisma, así los distintos colores se deben a partículas con distinta masa.

En este sentido, para Newton es claro que la luz blanca entonces sería una mezcla homogénea de todas las partículas con distintas masas, las cuales son simplemente separadas durante el paso por el prisma.

A pesar del famoso *hypotheses non fingo* de los *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, es interesante ver cómo para el momento en el que Newton comienza sus investigaciones sobre el color ya había adoptado la concepción atomista de la luz (3), según la cual estos son pequeños glóbulos moviéndose rápidamente en línea recta, reinterpretando las leyes de la

reflexión y de la refracción en términos de corpúsculos individuales de luz (Darrigol, 2012). Esto es problemático, ya que para la época existía otra concepción acerca de la naturaleza de la luz, como la de Francesco Grimaldi.

Algunos años antes, en 1665, Francesco María Grimaldi (1618-1663) publicó *Physico-mathesis de lumine coloribus et iride*, en el cual muestra las conclusiones de sus experimentos sobre la luz, entre las cuales está el hecho de que “Lumen propagatur seu diffunditur non solum Directe, Refracte, ac Reflexe, sed etiam quodam quarto modo Diffracte” (prop. 1) (4).

Grimaldi llegó a esta conclusión al estudiar la sombra de un cabello humano, notando que la sombra de este es muy difusa en sus bordes, y que al aumentar la intensidad lumínica esta parte difuminada se convierte en una serie de franjas paralelas a los bordes de la sombra. Sin embargo, esto no es lo más importante de los resultados de Grimaldi, lo más sorprendente e importante es que estas franjas no aparecen solamente a lo externo de la sombra, sino que también se produce dentro de la sombra (Russell, 1960), rompiendo así con aquel supuesto que desde la antigüedad griega había servido para fundamentar la óptica geométrica, y la teoría corpuscular de la luz.

Newton conocía estos resultados de Grimaldi, al igual que la teoría ondulatoria de la luz que se deriva de estos resultados, como podemos verlo en el libro tercero de *Opticks* (5):

Grimaldo has informed us, that if a beam of the Sun's Light be let into a dark Room through a very small Hole, the shadows of things in this Light will be larger than they ought to be if the rays went on by the Bodies in straight Lines, and that these shadows have three parallel fringes, bands or ranks of coloured Light adjacent to them (Newton, 113) (6).

Incluso dentro de los experimentos de Newton se habían presentado fenómenos similares, como lo es el caso de lo que hoy llamamos Anillos de Newton, los cuales son anillos concéntricos coloreados que se observan cuando se colocan superpuestas dos placas de vidrio con una pequeña diferencia en su curvatura. Además, replicó el mismo experimento de Grimaldi, el cual explica con lujo de detalles en la tercera parte de *Opticks*, observación II.

The shadows of all Bodies (Metals, Stones, Glass, Wood, Horn, Ice, etc.) in this Light were bordered with three parallel fringes or bands of coloured Light, whereof that which was contiguous to the shadow was broadest and most luminous, and that which was remotest from it was narrowest, and so faint, as not easily to be visible. It was difficult to distinguish the Colours unless when the Light fell very obliquely upon a smooth Paper [...] (Newton, 116) (7).

No obstante, para Newton era inconcebible considerar que la luz tuviera un comportamiento ondulatorio, ya que este es exclusivo de los fluidos, los cuales no viajan en línea recta (como sí lo hacen las partículas). Esto podemos verlo ya claramente en sus *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, prop. XLII: “Motus omnis per fluidum propagatus divergit a recto tramite in spatia immota” (8).

Para resolver esto Newton tuvo que introducir algunas ideas ondulatorias sobre la luz, sin embargo, muy ingeniosamente pudo hacer esto sin rechazar aun la teoría corpuscular de la luz. Las franjas exteriores son explicadas por Newton por medio de una teoría “híbrida” en la cual el elemento ondulatorio no refiere directamente a la luz: la idea es que los corpúsculos son influenciados de alguna manera por una perturbación en el medio circundante (éter). Es decir, al igual que una piedra produce una perturbación ondulatoria en el agua al entrar en ella, los corpúsculos lumínicos producen una perturbación ondulatoria en el éter al moverse a través de él, y este fenómeno hace que parezca que es la luz misma que tiene un cierto carácter ondulatorio. De esta manera, la luz viaja en línea recta (como Newton lo espera) pero está acompañada de un movimiento ondulatorio que lo asimila al sonido, sin que sea el mismo tipo de fenómeno:

Spectant propositiones novissimæ ad  
motum lucis & sonorum. Lux enim cum

propagetur secundum lineas rectas, in  
actione sola (per prop. XLI. & XLII.)  
consistere nequit. Soni vero propterea  
quod a corporibus tremulis orientur,  
nihil aliud sunt quam aëris pulsus  
propagate, per prop. XLIII. (*Philosophiæ  
Naturalis Principia Mathematica*, prop. L,  
probl. XII, scholium) (9).

A través de esta teoría pudo explicar igualmente la reflexión y la refracción de la luz: dependiendo de en qué parte de la onda producida en el éter se encuentre una partícula de luz esta tenderá a reflejarse o refractarse. En otras palabras, si la partícula incidente sobre una superficie (como el agua) viaja en la cresta de una onda de éter la propensión de la misma a seguir en línea recta aumentará, y sucederá lo contrario si la partícula se encuentra entre ondas (Russell, 1960). Además, así como sucede con otros fluidos, variando la densidad del éter se altera la dirección de los corpúsculos de luz que lo atraviesan, de manera que todos los fenómenos luminosos se pueden explicar por medio de tales cambios de dirección (Westfall, 1980).

Como se puede ver, Newton hizo un gran esfuerzo teórico para mantener la teoría corpuscular de la luz, a pesar de que había datos experimentales que la ponían en serias dificultades. La hipótesis del éter así se convirtió en uno de los enunciados básicos de la teoría de la luz y de todo sistema mecanicista de la naturaleza de Newton

(Westfall, 1980), y su autoridad intelectual hizo que la física posterior a él le diera un papel hegemónico a esta teoría, a pesar de que grandes pensadores, como Francesco Grimaldi y Christian Huygens, tuvieran una teoría alternativa que responde a los problemas de esta.

Sin embargo, estas teorías ondulatorias presentaban también un problema, que paradójicamente es solucionado de la misma manera que Newton resuelve los problemas de la teoría corpuscular de la luz, a través de la postulación de un medio circundante, que está en toda parte, el éter. Esta solución podemos verla en el trabajo de James Clerk Maxwell, casi doscientos años después.

## Maxwell

En 1865, James Clerk Maxwell publica en *Philosophical Transactions of the Royal Society* un artículo llamado *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, el cual nos presenta sus ecuaciones que describen el electromagnetismo (inicialmente veinte, que luego se reducen, gracias al trabajo de Oliver Heaviside, a solo cuatro), y que fue seguido por *A Treatise on Electricity and Magnetism* en 1873, con lo cual termina de construir la teoría electromagnética clásica.

La teoría electromagnética de Maxwell (por lo tanto, su teoría sobre la luz) se desarrolla por un camino muy diferente al que siguió Newton para desarrollar su teoría de la luz. Las teorías

sobre la electricidad y el magnetismo habían surcado históricamente caminos muy distintos a los de las teorías sobre la luz.

Los fenómenos eléctricos y magnéticos son conocidos desde la antigüedad, debido al descubrimiento de dos materiales en los que naturalmente se presentan: el ámbar y la magnetita. El ámbar es una resina proveniente de un árbol que al solidificarse tiene la apariencia de una piedra, y tiene la propiedad de que cuando es frotado posee la capacidad de atraer objetos livianos. Este material ya era conocido por los antiguos griegos, que le llamaban ἤλεκτρον, de donde provienen justamente el nombre que posee este fenómeno (me refiero a la *electricidad*).

Por otra parte, la magnetita es un mineral constituido por óxido ferroso-diférrico ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) que está naturalmente magnetizado, es decir, que tiene la capacidad de atraer el hierro, y cuyo nombre viene de la antigua ciudad griega Magnesia de Tesalia. En ese sentido es un fenómeno conocido por los antiguos, incluso se dice que ya Tales de Mileto realizaba observaciones con estos dos materiales.

Aunque es claro que estos dos fenómenos tienen ciertas similitudes, fueron históricamente pensados como fenómenos separados debido a la diferencia sutil de que el ámbar al ser frotado atrae gran variedad de objetos, en cambio la magnetita solamente hierro. Por esta razón, los grandes trabajos que se llevaron a cabo durante la modernidad

en general trataban los dos fenómenos de forma separada, y nunca como fenómenos asociados íntimamente; un ejemplo de esto es la obra de 1600 *De magnete* de William Gilbert, en cuyo segundo libro Gilbert hace la distinción entre estos dos fenómenos (Coronado, 2015).

No obstante, en el siglo XIX se llevan a cabo grandes experimentos que dan resultados que comienzan a cambiar esta situación. En 1820 Hans Christian Oersted se dio cuenta de que si se coloca un alambre por el que circula una corriente encima (o debajo) de una brújula, la dirección a la que esta apunta se ve alterada, apuntando en la dirección perpendicular al alambre. Este experimento se convierte en la primera muestra de que estos fenómenos estaban directamente relacionados (Hall, 2008).

Por otra parte, André Marie Ampère realizó un experimento en el cual colocó dos alambres paralelos por los que circula corriente observando que estos se atraían o se separaban dependiendo de las direcciones de las corrientes en cada uno de los alambres. Este resultado le permitió a Ampère expresar matemáticamente el campo magnético generado por una corriente eléctrica. Nótese que este experimento complementa magníficamente el experimento de Oersted, ya que con él se demuestra que, no solo un magneto es afectado por una corriente eléctrica (como lo demostró Oersted), sino que

también una corriente eléctrica es afectada por otra corriente eléctrica.

Otro experimento crucial para el trabajo de Maxwell fue el realizado por el inglés Michael Faraday en 1831. Él colocó dos bobinas de alambre separadas por una pequeña distancia, una conectada a un galvanómetro y la otra conectada a una batería. Cuando encendía la batería la aguja del galvanómetro se movía, y eso volvía a suceder en el momento en el que apagaba la batería, sin embargo, en los momentos intermedios el galvanómetro no detectaba ninguna corriente, a pesar de que la batería estuviese encendida.

Brillantemente, a Faraday se le ocurrió que lo que producía el movimiento de la aguja (la corriente eléctrica) debía ser el *cambio* en el campo magnético al encender y apagar la batería. Por esta razón, replanteó el experimento utilizando una sola bobina y un magneto, demostrando que se puede generar una corriente con el simple movimiento del magneto hacia adelante y hacia atrás. Por supuesto, este efecto no se daba si el magneto simplemente se colocaba estacionario respecto de la bobina.

Para Maxwell el trabajo de Faraday es fundamental, ya que Maxwell busca una formulación matemática de las ideas intuitivas (y leyes fenomenológicas) de Faraday. De esta manera, Maxwell acepta la existencia de los campos eléctricos y magnéticos propuestos por Faraday, y su concepto de líneas de fuerza

(10), lo cual lo lleva a abandonar la doctrina clásica (newtoniana) que consideraba las fuerzas eléctricas y magnéticas como acciones a distancia (Beléndez, 2008). Esto se hace evidente al notar que el primer aporte que hace Maxwell a la teoría electromagnética es un trabajo de 1855 llamado *On Faraday's Lines of Force*, en el que Maxwell introduce un fluido hipotético incompresible cuyo flujo produce las líneas de fuerza introducidas por Faraday, de manera que las fuentes de flujo serían identificadas con las cargas positivas y los sumideros con las cargas negativas.

Como se puede ver, este enfoque es completamente geométrico, a la manera de Newton, lo cual presentaba la dificultad de que no permitía explicar la interrelación demostrada por Oersted, Ampère y Faraday entre el campo eléctrico y el magnético (Hall, 2008)

En este trabajo Maxwell introduce la idea de vórtices y celdas (*cells*), en un intento de explicar las propiedades rotacionales de campo magnético. Estos vórtices serían muy pequeños (pero con masa) y elásticos, y sus propiedades serían dependientes del medio que los rodea. Según Maxwell, los vórtices están separados por partículas que rotan, siendo este el origen de los vórtices. Estas partículas al estar estacionarias giran en la misma dirección produciendo que el vórtice sea uniforme, pero cuando presentan movimiento de traslación producirán perturbaciones en los vórtices. Así, los vórtices

representan para Maxwell el campo magnético, su magnitud dependerá que la velocidad de rotación de los vórtices, y su dirección del sentido de rotación del vórtice. El movimiento de las partículas que están entre los vórtices representa la corriente eléctrica. Con esta teoría Maxwell fue capaz de derivar la ley de Ampère y explicar la ley de inducción de Faraday.

En un posterior trabajo llamado *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (1865) Maxwell pretende eliminar de su teoría estos elementos visuales y analogías que anteriormente se mencionaron, para tratar de construir una teoría matemática del electromagnetismo (trabajo que terminará cabalmente en su obra de 1873). Para esto tomó los aportes de matemáticos y científicos anteriores como Ampere, Faraday, Gauss, Kelvin, Green y Stokes, de donde logró derivar sus famosas ecuaciones del electromagnetismo (llamadas ecuaciones de Maxwell).

En la construcción de estas ecuaciones Maxwell se da cuenta de que los campos eléctrico y magnético satisfacen la ecuación de onda con una velocidad de propagación que se calculó en 310 740 000 m/s, increíblemente similar a los valores de la velocidad de la luz obtenidos por Fizeau y Foucault pocos años antes (314 858 000 m/s y 298 000 000 m/s respectivamente) y al valor actualmente aceptado.



De esta manera Maxwell demostró que la luz es un fenómeno electromagnético. En palabras de Maxwell: "The agreement of the results seems to show that light and magnetism are affections of the same substance, and that light is an electromagnetic disturbance propagated through the field according to electromagnetic laws" (11) (1865, p. 499). Con esto no solo unifica la electricidad, el magnetismo y la luz, sino que muestra también que la luz tiene un carácter ondulatorio, lo cual lo llevó a señalar la necesidad de un éter respecto del cual se podía medir la velocidad de la luz.

Posteriormente, en 1865, Maxwell abandona su cátedra que tenía en Londres en ese momento para retirarse a su finca en Glenlair, y ahí escribió su obra cumbre, la cual sintetizaría todos sus trabajos anteriores (la síntesis maxwelliana): *A Treatise on Electricity and Magnetism* en 1873, el cual ha sido comparado con *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. En esta obra Maxwell unifica todos los fenómenos conocidos sobre magnetismo, electricidad y óptica por medio de sus ecuaciones del electromagnetismo.

En este tratado discute claramente el problema de la naturaleza de la luz, la cual es ondulatoria, y explica la necesidad de un medio en el cual transmitirse, hipótesis que Maxwell está dispuesto a aceptar:

In several parts of this treatise an attempt has been made to explain

electromagnetic phenomena by means of mechanical action transmitted from one body to another by means of a medium occupying the space between them. The undulatory theory of light also assumes the existence of a medium. We have now to shew that the properties of the electromagnetic medium are identical with those of the luminiferous medium (1881, p. 393) (12).

Como se puede ver, para Maxwell, la teoría ondulatoria de la luz implica necesariamente la hipótesis del medio luminoso (como curiosamente también lo fue para Newton en el caso de la teoría corpuscular), no por simple tradición filosófica (como parece verse en el caso de Newton), sino porque, para Maxwell, dos caminos diferentes llevan al mismo resultado, lo cual robustecía la hipótesis:

To fill all space with a new medium whenever any new phenomenon is to be explained is by no means philosophical, but if the study of two different branches of science has independently suggested the idea of a medium, and if the properties which must be attributed to the medium in order to account for electromagnetic phenomena are of the same kind as those which we attribute to the luminiferous medium in order to account for the phenomena of light, the

evidence for the physical existence of the medium will be considerably strengthened (1881, p. 394) (13).

Sin embargo, como sabemos hoy en día, el medio luminosos (éter) no existe, y en ese sentido, a pesar de que Maxwell parecía tener un criterio sólido para afirmarlo, no se percató que partía de un supuesto (propio de la tradición de la física) de que las ondas solo pueden transmitirse a través de un medio, supuesto que es el que terminó siendo falso.

A pesar de esto, Maxwell nos legó “una de las creaciones científicas más originales e importantes que se han hecho jamás, tanto desde el punto de vista de la comprensión de los fenómenos naturales como en lo que se refiere a su aplicación al mundo de la técnica” (Beléndez, p.14), ya que aunque Maxwell insistiera en la existencia de este medio luminoso, su teoría dio paso a una gran cantidad de adelantos científicos y tecnológicos que no habrían sido posibles sin su aporte.

## Conclusión

De esta manera, estos pensadores nos muestran que la dualidad onda-partícula en la naturaleza de la luz que surge en el siglo XX no es del todo nueva, sino que ha estado presente, como una contraposición entre las ideas de corpúsculos y ondas, desde los inicios de la física como disciplina (cuando aún era parte de la filosofía natural), y que sus esfuerzos de

superación de este problema llevaron a unas de las teorías más importantes de la física, que aún cuentan con algún grado de actualidad (es decir, aun se pueden utilizar de forma heurística), y a la unificación campos que anteriormente se consideraban áreas completamente distintas de nuestra realidad física.

## Bibliografía

- Bardi, J.S. (2006). *The Calculus Wars. The Greatest Mathematical Clash of All Time*. New York: Thunder's Mouth Press.
- Beléndez, A. (2008). La unificación de luz, electricidad y magnetismo: la “síntesis electromagnética” de Maxwell. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(2), 2601.
- Coronado, G. (2015). *Mis perspectivas*. San José: Antanacsis.
- Darrigol, O. (2012). *A history of optics from Greek antiquity to the nineteenth century*. New York: Oxford University Press.
- Einstein, A. (1927). On Newton. *The Wilson Quarterly*. 3(1) (Winter, 1979), 114-120.
- Einstein, A. (2005). La influencia de Maxwell en la evolución de la idea de la realidad física. En: Sanchez, J.M. (comp.) (2005). *Einstein. Obra esencial*. Barcelona: Crítica.
- Grimaldi, F.M. (1665). *Physico-mathesis de lumine, coloribus et iride, aliisque sequenti pagina indicatis*. Bologna: Vittorio Bonati.
- Hall, G. (2008). Maxwell's Electromagnetic Theory and Special Relativity. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1871), 1849-1860.
- Maxwell, J.C. (1865). A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155, 459-512.

Maxwell, J. C. (1881). *A treatise on electricity and magnetism* (Vol. 2). London: Clarendon press.

Newton, Isaac (1704). *Opticks: or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light. Also two treatises of the species and magnitude of curvilinear figures*. London: Sam Smith and Benjamin Walford.

Russell, N. (1960). Waves, Particles and Newton's "fits". *Journal of History of Ideas*. 21(3), 370-391.

Westfall, R. S. (1980). *La construcción de la ciencia moderna*. Barcelona: Editorial Labor.

### Notas:

(1) En la antigüedad griega (de donde se tiene las principales fuentes escritas acerca de este problema), tenía al menos dos teorías acerca de la luz explicadas por Darrigol (2012): la teoría del fuego visual, según la cual los ojos emiten un fuego cuyos rayos exploran el objeto observado, y la teoría atomista, según la cual la visión se debe a partículas indivisibles (átomos o *efigies*, como las llama Tito Lucrecio Caro) que viajan desde el objeto hasta el ojo que las percibe.

(2) No obstante, se sabe que no todos sus experimentos los habría hecho en su casa en el campo, sino que muchos de ellos ya los había hecho previamente en su cuarto en Cambridge.

(3) Como bien lo señala Westfall, hipótesis non fingo es claramente falso, ya que "Newton inventó hipótesis, e hipótesis grandiosas. En el sentido de que mantenía una rígida distinción entre las conclusiones demostradas y las hipótesis que se establecen para explicarlas" (Westfall, 1980, p.222).

(4) "La luz no solo se propaga o difunde directamente [en línea recta], o por refracción

o reflexión, sino que también se propaga de un cuarto modo; se difracta".

(5) En el caso de la obra *Opticks* de Newton se mantiene la ortografía del texto original de 1704, para evitar modificaciones innecesarias.

(6) "Grimaldo nos ha informado que, si un rayo de la luz del sol se deja entrar en una habitación oscura a través de un agujero muy pequeño, las sombras de las cosas en esta luz serán más grandes de lo que deberían ser si los rayos viajaran a través de los cuerpos en línea recta, y que estas sombras tienen tres franjas paralelas, bandas o filas de color claro adyacente a ellas".

(7) "Las sombras de los cuerpos (metales, piedras, vidrio, madera, cuerno, hielo, etc.) en esta luz estaban bordeadas con tres franjas paralelas o bandas de color claro, de las cuales la que era contigua a la sombra era más amplia y luminosa, y la que era más remota era más estrecha, y tan débil, que no es fácil verlas. Era difícil distinguir los colores a no ser que la luz caiga muy oblicuamente sobre un papel suave".

(8) "Todo movimiento que se propaga a través de un fluido es distinto de un tránsito rectilíneo en los espacios inmóviles".

(9) "Las últimas proposiciones refieren a los movimientos de la luz y el sonido. Si bien es cierto que la luz se propaga en línea recta esta no puede consistir solo en acción (por prop. XLI y XLII). El sonido, en la medida en que surge de cuerpos vibratorios, no puede ser más que pulsos que se propagan en el aire, por la prop. XLIII".

(10) El concepto de línea de fuerza fue introducido por Faraday para explicar las fuerzas implicadas en el fenómeno electromagnético. Faraday imaginó líneas rectas que eran emitidas por las cargas eléctricas, y líneas cerradas que eran emitidas por los polos magnéticos.

(11) “La concordancia de los resultados parecen mostrar que la luz y el magnetismo son afecciones de la misma substancia, y que la luz es una perturbación en el campo electromagnético propagada a través del campo en acuerdo con las leyes del electromagnetismo”.

(12) “En varias partes de este tratado se ha hecho un intento de explicar el fenómeno electromagnético por medio de una acción mecánica transmitida de un cuerpo a otro a través de un medio que ocupa el espacio entre ellos. La teoría ondulatoria de la luz también asume la existencia de un medio. Ahora tenemos que mostrar que las propiedades del medio electromagnético son idénticas a las del medio luminoso”.

(13) “Llenar todo el espacio con un nuevo medio para explicar cualquier nuevo fenómeno de ninguna manera (es una idea) filosófica, sino que si el estudio de dos ramas diferentes de la ciencia ha sugerido de forma independiente la idea de un medio, y si las propiedades que deben ser atribuidos al medio con el fin de dar cuenta de los fenómenos electromagnéticos son de la misma naturaleza que los que atribuimos al medio lumínico con el fin de dar cuenta de los fenómenos de la luz, se reforzará considerablemente la evidencia de la existencia física del medio”.