



## LUZ Y ONDAS. HUYGENS: LA LUZ COMO PROPAGACIÓN ONDULATORIA

## LIGHT AND WAVES. HUYGENS: LIGHT AS A PROPAGATING WAVE

**David Blanco Laserna**

[contacto@davidblancolaserna.com](mailto:contacto@davidblancolaserna.com)

**Cómo citar este artículo/Citation:** Blanco Laserna, D. (2015). "Luz y ondas. Huygens: la luz como propagación ondulatoria". *Arbor*, 191 (775): a263. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/arbor.2015.775n5002>

**Copyright:** © 2015 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-Non Commercial (by-nc) Spain 3.0.

Recibido: 11 diciembre 2014. Aceptado: 6 marzo 2015.

**RESUMEN:** La óptica geométrica ofreció la primera descripción matemática y rigurosa de la luz. Sin embargo, a finales del siglo XVII comenzaron a estudiarse fenómenos que trascendían sus límites. El *Traité de la lumière* de Huygens ocupa un lugar destacado entre los intentos de definir una imagen más compleja y profunda de la luz.

**ABSTRACT:** Geometrical optics provided the first rigorous mathematical description of light. However, in the late seventeenth century, phenomena that went beyond its limits began to be studied. Huygens' *Traité de la lumière* deserves an eminent place among the attempts to define a more complex and deeper image of light.

**PALABRAS CLAVE:** dióptrica; aberración esférica; aberración cromática; teoría ondulatoria de la luz; doble refracción; principio de Huygens.

**KEYWORDS:** dioptrics; spherical aberration; chromatic aberration; wave theory of light; double refraction; Huygens' principle.

## 1. LA BÚSQUDA DEL TELESCOPIO PERFECTO

El siglo XVII dio a la imprenta notables tratados sobre la luz. En sus páginas se expusieron datos, leyes y fenómenos ópticos inéditos, o desconocidos al menos para la ciencia de Occidente, como la ley exacta de la refracción, la doble refracción en el espato de Islandia, la descomposición de la luz blanca en colores o estimaciones razonables de su velocidad de propagación en el vacío. Entre sus autores figuran científicos de la talla de Kepler, Descartes, Newton o Huygens. Las obras de estos dos últimos, tan diversas en tono y propósito como corresponde a sus personalidades científicas, polarizaron un debate sobre la naturaleza última de la luz, corpuscular u ondulatoria. El *Opticks*, que Newton no quiso publicar hasta después de la muerte de Hooke, conoció entre sus contemporáneos más fortuna que el *Traité de la lumière*. El paso del tiempo pareció reivindicar la figura de Huygens, gracias a la labor de Thomas Young y Augustin-Jean Fresnel en el frente ondulatorio, hasta que la revolución cuántica quitó sentido a la disputa, trasladándola a una dimensión nueva.

La escritura del *Traité de la lumière* siguió el curso azaroso de muchas obras de Huygens, que las revisaba una y otra vez, aplazando sine die el momento de su publicación. A este respecto, el científico holandés no conoció jamás las urgencias que agobian a los investigadores contemporáneos. Para compensar, resulta difícil concebir un revisor técnico más estricto que él mismo. Su tendencia a no considerar acabado ningún proyecto provocó que, con frecuencia, se le adelantaran autores menos ambiciosos a los que cedió la prioridad de numerosos descubrimientos. El *Traité* fue el fruto inesperado de una autoexigencia extrema, que desbarató al menos tres importantes tratados previos sobre dióptrica, gestados y malogrados a lo largo de dos décadas. La muerte le sorprendió sin que se hubiera decidido aún a publicar gran parte del material que iba a integrar estas obras, que terminaría editándose solo póstumamente, en 1703.

El interés de Huygens por la óptica geométrica se despertó en 1652, a los veintitrés años, avivado por el hallazgo de un contraejemplo que rebatía las tesis de Descartes. Escribe entonces a su mentor, Frans van Schooten (Huygens, 1888, p. 215): “La dióptrica me absorbe por completo”. Había descubierto que uno de los perfiles que Descartes había propuesto para las lentes libres de aberración esférica se podía reducir a un círculo. Esto le condujo a pensar que podría aplicarse en la fabricación de lentes esféricas. El diseño en sí resultó no tener aplicación práctica, pero abría

Figura 1. Christiaan Huygens. Retrato de Caspar Netscher



una puerta que Descartes había dejado cerrada. En el octavo discurso de *La Dioptrique*, el francés había advertido sobre los defectos de las lentes esféricas, para concluir “que las lentes hiperbólicas y elípticas son preferibles a cuantas otras puedan imaginarse, e incluso las hiperbólicas resultan preferibles casi en todo a las elípticas” (Descartes, 1824, p. 119). Convencido de que el perfeccionamiento de los instrumentos ópticos se había de alcanzar por esa vía, Descartes llegó a diseñar un torno para pulir lentes de corte hiperbólico. En noviembre de 1629, propuso su construcción a un joven artesano de París, Jean Ferrier, al que trató de contagiar su confianza ciega en la empresa (Burnett, 2005, p. 1):

[...] si dispone de un año o dos para implicarse hasta donde sea necesario, confío en que podamos comprobar, gracias a su esfuerzo, si existen animales en la Luna.

Sin embargo, ni Ferrier ni ningún otro artesano de la época supo imponer al vidrio las formas que Descartes se había representado en la imaginación. Este, tras una concatenación de tentativas fracasadas, escribía

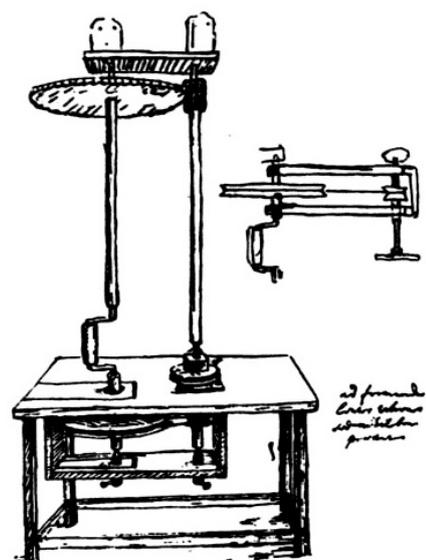
en enero de 1640 al padre Mersenne, con su modestia característica (Burnett, 2005, p. 70): “¿Piensa acaso que estoy triste? Le juro que todo lo contrario: me vanaglorio de que la mano de los mejores operarios no sepa llegar hasta donde ha llegado mi raciocinio”. Más de diez años después de su muerte, en enero de 1662, Fermat aún se lamentaba en una carta a Pierre Cureau de La Chambre (Burnett, 2005, p. 91): “en cuanto a las maravillas que el señor Descartes nos hizo esperar, con razón, de sus lentes elípticas e hiperbólicas, tendremos que aguardar a que surjan artesanos con la habilidad suficiente para hacerlas y rematarlas”.

Huygens se mantuvo más pegado a la tierra y quiso ceñirse a lo que pudieran dar de sí las lentes esféricas, que los artesanos sabían producir con una calidad aceptable. Kepler había centrado su interés en ellas, pero no fue capaz de deducir la ley exacta de la refracción. Por tanto, no logró desarrollar su teoría de la imagen hasta sus últimas consecuencias. Descartes sí dedujo la ley, pero desestimó las lentes esféricas, embarcándose en un programa utópico que acabó embarrancando. Huygens vio en su incidental refutación al pensador francés el punto de partida de una senda alternativa practicable. Invertió horas incontables en pulir las lentes que encajaba más tarde en sus telescopios y linternas mágicas, un arte que tanto él como su hermano mayor Constantijn llegaron a practicar con virtuosismo. Huygens quiso asentar el diseño de los instrumentos ópticos, en particular del telesco-

pio, sobre una base matemática, pero no desdeñó el trabajo en el taller. Inventó toda clase de máquinas y métodos para depurar las técnicas artesanales. Entre las sucesivas mejoras que fue introduciendo en el telescopio, como el diafragma, el micrómetro o el ocular que lleva su nombre, unas fueron el resultado de un preciso análisis geométrico; otras se deben a una tenaz aplicación del método de ensayo y error. En 1653 inició su *Tractatus de refractione et telescopiis*. Fue en sus páginas donde se utilizó por primera vez la ley de Snell para determinar las distancias focales y magnificaciones de las lentes esféricas, aspectos que Descartes había tratado solo cualitativamente.

A pesar de que estos hallazgos merecían una pronta difusión, el *Tractatus* no tardó en verse fagocitado por otro proyecto de mayor envergadura. El 7 de octubre de 1665, Spinoza, vecino de Huygens en la villa de Voorburg y avezado pulidor de lentes, escribe al primer secretario de la Royal Society, Henry Oldenburg (Spinoza, 1995, p. 187): “Cuando pregunté a Huygens por su *Dióptrica* [...], me contestó que sigue buscando la solución a cierto problema dióptrico y que, tan pronto como logre resolverlo, llevará el libro a la imprenta [...]”. ¿En qué consistía este desafío, capaz de desviar la atención de Huygens y de postergar la publicación del *Tractatus*? Él mismo se ocuparía de resumirlo en la proposición IX del nuevo tratado que ya se estaba fraguando en su cabeza (Huygens, 1916, p. 318):

**Figura 2.** Detalle de una de las lentes de Huygens (Museum Boerhaave de Leiden) y diseño de una de sus máquinas para pulirlas (figura extraída de sus *Oeuvres Complètes*, tomo XVII, p. 304)



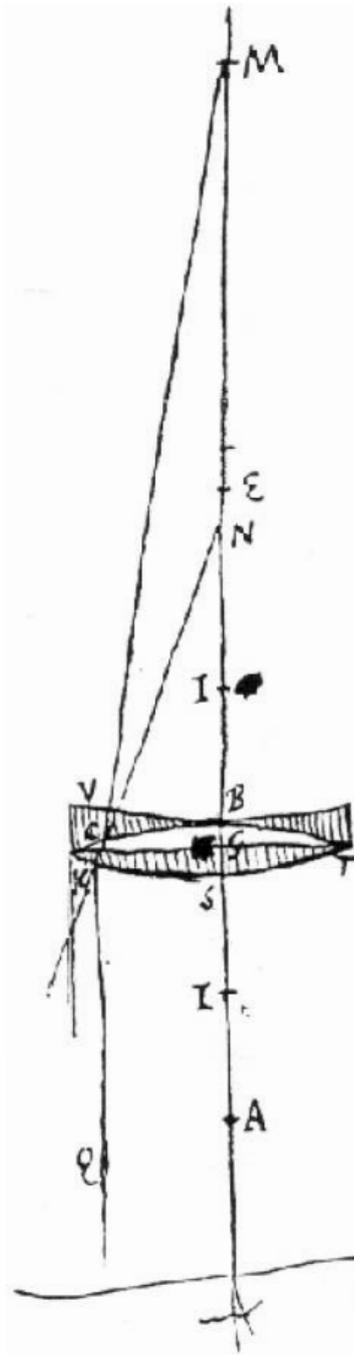
[...] ni la lente esférica convexa puede reunir exactamente en un solo punto los rayos paralelos; ni la lente cóncava, en el supuesto de que tendiesen realmente a un punto único, puede hacerlos de nuevo exactamente paralelos. Hasta ahora se ha venido pensando que, por estas dos razones, las superficies esféricas resultan menos apropiadas para este cometido: nadie ha sospechado que el defecto de las lentes convexas pueda corregirse con la ayuda de lentes cóncavas. Pero demostraremos aquí que dicha corrección es posible y que, por tanto, los telescopios de este género pueden hacerse más perfectos que los que se construyen habitualmente.

Huygens pretendía encontrar una configuración de lentes esféricas que ajustase sus defectos ópticos individuales de modo que el conjunto no presentara aberración. El tratado que iba a proporcionar las instrucciones para armar un telescopio perfecto (al menos, desde la perspectiva de la óptica geométrica) se titularía *De Aberratione radiorum a foco*. El 6 de agosto de 1665 obtuvo un primer resultado alentador: la relación de curvaturas para un ocular cóncavo que corregía la aberración de un objetivo convexo. Se trataba de un triunfo relativo, porque correspondía a un telescopio de tipo terrestre y el interés de Huygens se orientaba sobre todo a la observación astronómica. En cualquier caso, había dado un paso firme en la dirección deseada. Resuelto el problema geométrico, quiso verificar las bondades de su diseño con lentes reales. Diversos compromisos lo distrajeron, sin embargo, de este propósito; entre otros, su nombramiento como director científico de la Real Academia de Ciencias de París y su mudanza a la capital de Francia. El asunto no regresaría al primer plano de su correspondencia hasta un par de años después. En abril de 1668 escribió a su hermano mayor, rogándole que confeccionase varias lentes, de acuerdo con una serie precisa de medidas. La prueba de fuego tuvo lugar dos meses más tarde. Al aplicar el ojo al objetivo del nuevo telescopio, Huygens encontró que la imagen quedaba enturbiada por la aparición de colores, que atribuyó al perfil de una de las lentes. Constantijn, además, no había seguido sus instrucciones al pie de la letra, por lo que no consideró concluyente el resultado. A lo largo de los meses siguientes, reclamó a su hermano con insistencia, y escaso éxito, el envío de nuevas lentes, más acordes con sus instrucciones.

La segunda prueba no llegaría a producirse, porque el 1 de febrero de 1669 Huygens hizo un descubrimiento que trastocó por completo sus planes: la concepción de un telescopio kepleriano que se com-

portaba como un sistema aplanático, es decir, que no estaba aquejado de aberración esférica. En lugar de trabajar sobre el ocular, esta vez optó por duplicar las lentes del objetivo, acoplando una lente bicóncava a una planoconvexa. La clave del diseño radicaba en la relación entre el radio de las curvaturas, que Huygens determinó con exactitud.

**Figura 3.** El diseño aplanático de febrero de 1669 (en *Oeuvres Complètes*, tomo XIII, p. 411)



La aparición en octubre de las *Lectiones XVIII* de Isaac Barrow amenguó un tanto los méritos del *Aberratione*. En su libro, Barrow construía con rigor matemático una teoría sobre la formación de imágenes, determinando las distancias focales de las lentes esféricas. Huygens había completado la misma tarea quince años atrás, pero el *Tractatus* seguía acumulando polvo en un cajón. Por fortuna, Barrow se circunscribió a “aquella parte de la óptica que es más propiamente matemática” (Shapiro, 1990, p. 106). Fuera de esos límites quedaban los telescopios y el cálculo de la magnificación de las lentes. No se internó, por tanto, en el terreno que Huygens había explorado más a fondo. Este encajó el golpe con diplomacia. A finales de enero de 1670, escribía a Oldenburg (Huygens, 1897, pp. 2-3): “Hace algún tiempo recibí por medio del señor Justel el tratado de dióptrica del señor Barrow, que da muestras por igual del conocimiento y del ingenio de su autor, pero aunque produzca la impresión de que ha expuesto por completo la materia, algún día comprobará que lo que yo he escrito es muy diferente”.

Ese día no llegaría nunca. El frente inglés, desde Cambridge, no tardó en descargar una segunda andanada, que hundiría definitivamente *De aberratione*. El sucesor de Barrow en la Cátedra Lucasiana, Isaac Newton, publicaba en febrero de 1672 en las *Philosophical Transactions* “Una nueva teoría sobre la luz y los colores”. En ella establecía que la luz “es una mezcla heterogénea de rayos con distinta refrangibilidad”. Al multiplicarse los rayos, las nítidas líneas de los diseños de Huygens se emborronaban. Newton desconocía seguramente su proyecto de construir un telescopio de refracción libre de aberraciones, pero algunas de sus palabras sonaban casi como una advertencia personal (Newton, 2005, p. 72):

De manera que un cristal que se conciba con absoluta precisión para que reúna en un punto una clase cualquiera de rayos, no podrá reunir en el mismo punto aquellos que, incidiendo del mismo modo sobre el mismo medio, hayan de sufrir una refracción diferente.

Los colores que desbarataban los diseños de Huygens no se debían a la forma de las lentes, sino a la propia naturaleza de la luz, que se refractaba en ángulos distintos en función de su longitud de onda. Newton fijaba límites severos al perfeccionamiento del telescopio refractor (Newton, 2005, p. 72): “el objetivo de cualquier telescopio no puede recoger todos los rayos que proceden de un punto de un objeto de forma que converjan a su foco en una extensión menor que un espacio circular, cuyo diámetro es la quincuagésima parte del diámetro de su apertura”.

Huygens sopesó las razones de Newton con cautela. Sospechaba que el empeño de liquidar el telescopio de refracción obedecía al deseo del inglés de promocionar su propio diseño de reflexión. Aun así, después de un breve e intenso intercambio epistolar con Newton y de reconsiderar a fondo el fenómeno de la descomposición de la luz, reconoció su impacto en los cimientos del *Aberratione*. En sus notas, tachó el boceto del telescopio exento de aberración esférica, añadiendo (Dijksterhuis, 2004, p. 83): “esta invención resulta inútil, en virtud de la aberración newtoniana que genera colores”. Estas palabras enterraban las aspiraciones de dos décadas de investigación, alentadas por su temprano éxito de 1652.

## 2. EL ENIGMA DE ISLANDIA

Aunque la estrella que había guiado la empresa de Huygens se ocultase, por el camino había recogido un cúmulo de impresionantes resultados. Resignado a rebajar su ambición, en 1673 elaboró el plan de una nueva obra, que tituló provisionalmente *Projet du Contenu de la Dioptrique*. Una vez extirpadas las secciones dañadas por la aberración cromática, parecía un proyecto de rápida ejecución. De forma inopinada, volvió a perderse en un laberinto durante la elaboración del tratado.

Esbozó un índice que contemplaba ocho capítulos. Más de la mitad, el grueso de la obra, se consagraba a la dióptrica. El manuscrito se abría con un capítulo sobre la historia del telescopio y se cerraba con otro dedicado a la última pieza de cualquier instrumento óptico: el ojo. En los libros de óptica geométrica de la época era costumbre incluir un estudio sobre la naturaleza de la luz, que respaldase las leyes que se presentaban a continuación. Huygens dispuso el suyo justo después del repaso histórico que servía para situar sus descubrimientos. Su función era justificar la relación de Snell, que intervenía en la demostración de gran parte de los teoremas. La naturaleza de la luz, como tal, no había merecido ningún pasaje memorable del *Tractatus de refractione et telescopiis* ni del *Aberratione*. Prueba de que Huygens lo consideraba casi como un mero trámite es que un científico tan original como él recurrió a otro autor para resolver el expediente. En las observaciones deshilvanadas que acompañan al índice, apuntó (Huygens, 1916, p. 742): “Refracción tal como la explica Pardies. Comparada con el sonido. [O]ndas en el aire. [C]omparadas con las del agua [...] un medio capaz de este movimiento sucesivo. Propagación perpendicular a los círculos”.

La obra del jesuita Ignace-Gaston Pardies nos ha llegado a través de otros autores que, como Huygens, leyeron versiones manuscritas de un tratado que no llegó a completar. Según parece, Pardies consideraba la luz como un pulso que se propaga en una esfera creciente. Los rayos luminosos se extienden radialmente, como rectas perpendiculares a la superficie de la esfera, una premisa que otros habían adoptado antes, Kepler sin ir más lejos. Partiendo de ella, había demostrado la ley de Snell. Pardies recurría a la imagen icónica que suele invocarse a la hora de introducir el concepto de propagación ondulatoria (Sabra, 1981, p. 196): los círculos “que se forman en la superficie del agua cuando se arroja en ella una piedra”. Sin embargo, sus ondas luminosas no eran transversales, sino longitudinales, como las del sonido. Pardies también atribuía una velocidad finita a la propagación de la luz. En el momento de elaborar el *Projet*, Huygens aceptó ambos supuestos, con alguna matización (Huygens, 1916, p. 742):

La luz se extiende en círculos y no instantáneamente, al menos en los cuerpos que se hallan aquí abajo, porque en lo que se refiere a la luz de los astros, resulta complicado afirmar que no sea instantánea.

Entre esta sección y la dióptrica, Huygens interpuso un tercer capítulo, que llama poderosamente la atención en el índice de un texto que pretendía aplicar las leyes de la óptica geométrica a los telescopios. ¿Su título? “Cristal de Islandia”. Este extraño elemento sería el artefacto que dinamitaría el *Projet*.

En la primavera de 1668, el rey Federico III de Dinamarca había ordenado una expedición geológica a la costa oriental de Islandia, rumbo a Helgustadir. Su propósito era recoger muestras de una variedad de calcita que exhibía una transparencia inusitada. Erasmus Bartholinus, profesor de geometría y medicina de la Universidad de Copenhague, estudió las propiedades ópticas del mineral y halló un raro fenómeno. Cuando un rayo de luz incidía contra una de las caras del espato de Islandia, se dividía en dos. En su recorrido a través del cristal, los rayos mantenían su divergencia, hasta cruzar de nuevo la frontera. De vuelta en el aire, proseguían su camino en paralelo. Esta duplicación de los rayos generaba imágenes dobles cuando Bartholinus miraba algún objeto pequeño a través de dos caras opuestas del espato.

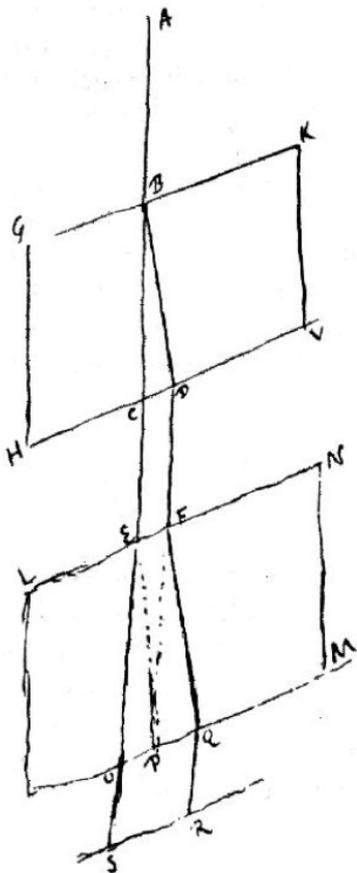
Los ángulos de entrada y salida del rayo extraordinario no se ajustaban a la relación de Snell. Bartholinus trató de sujetarlos a una nueva ley de refracción, con resultados parciales. En julio de 1671, la Real Aca-

demia de Ciencias francesa encomendó al astrónomo Jean Picard una misión científica que lo llevaría hasta la isla de Ven. Debía determinar con la mayor precisión posible los grados que separaban los meridianos de París y del castillo de Uraniborg, una información indispensable para cotejar las tablas astronómicas de Tycho Brahe con las observaciones que se estaban realizando en Francia. Al pasar por Copenhague, Picard visitó a Bartholinus y, a su regreso a París, trajo consigo varias muestras de espato. Huygens celebró el año nuevo de 1673 sometiéndolas a un examen minucioso. Bartholinus había restringido su estudio a los rayos en la sección principal del cristal. Huygens lo extendió a toda clase de rayos. En el proceso, descubrió fenómenos que Bartholinus había pasado por alto. El más llamativo se producía al situar dos cristales, uno a continuación del otro. Los rayos luminosos, al incidir sobre la superficie del primero, se dividían en dos. Ambos seguían su camino, pero, al incidir sobre la superficie del segundo cristal, no volvían a escindirse. ¿Por qué el primer rayo incidente se partía, mientras el segundo y el tercero mantenían su integridad? ¿Qué le ocurría a la luz durante su viaje a través de la calcita? ¿Por qué al salir perdía su capacidad para producir un rayo extraordinario? Además de desviarse, algo alteraba su naturaleza. Sin saberlo, Huygens acababa de ejecutar el primer experimento que ponía de manifiesto la polarización de la luz.

Su investigación dejaba un montón de interrogantes en el aire y una sola certidumbre: la existencia del espato ponía en jaque la teoría de Pardies. La propagación en círculos que este defendía tropezaba con un escollo que parecía insalvable: cuando un rayo luminoso incidía en ángulo recto sobre la superficie del cristal de calcita, seguía emergiendo el rayo extraordinario, que se propagaba oblicuamente en su interior. Tras fracasar en su intento de acomodar el rayo extraordinario en frentes esféricos, Huygens concluyó que el fenómeno contradecía la hipótesis ondulatoria.

Esta constatación lo situaba en una situación embarazosa. ¿Qué capítulo podía escribir sobre la naturaleza de la luz que justificara la ley de la refracción que dominaba el *Projet*? Otros investigadores hubieran soslayado la dificultad, dando prioridad a la difusión de sus descubrimientos. A fin de cuentas, las lentes de ningún instrumento óptico se tallaban sobre cristales de Islandia y lo que se traía entre manos era un tratado sobre telescopios. ¿Por qué permitir que una cuestión marginal paralizase su publicación? Le bastaba con pasar por alto el fenómeno de la doble refracción, que no asomaba en ninguno de sus teoremas de

**Figura 4.** Esquema de Huygens del experimento con dos cristales de Islandia (en *Oeuvres Complètes*, tomo XIX, p. 413)



óptica geométrica. Sin embargo, da la sensación de que Huygens no podía llevar a la imprenta un tratado que incluyese, bajo su nombre, una explicación que él mismo consideraba insatisfactoria. Una vez más, aparcó el proyecto hasta haber resuelto el problema.

Otros asuntos vinieron a reclamar su atención, pero prueba de que el rompecabezas seguía rondándole la cabeza es que en una de sus retiradas estratégicas a Holanda, en 1676, se llevó consigo una muestra de espato de Islandia. Un año después, aprovechando un prolongado retiro en La Haya, consumó el ataque definitivo. Parece que el punto de partida fue un estudio sobre cáusticas, materia en la que cabe reconocer una sutil afinidad con el principio de Huygens. Este se materializó por fin tras una serie de tanteos, bocetos y cálculos, que remataría con una nota triunfal (Huygens, 1937, p. 428): “Eureka. 6 agosto 1677. La causa de la refracción extraordinaria en el cristal de Islandia”. Antes de regresar a París, Huygens desarrolló sus

ideas a fondo y a mediados de 1679 hizo una presentación ordenada de su teoría ante la Real Academia de Ciencias, que conformaría el contenido medular del *Traité de la lumière*.

### 3. EL TRAITÉ DE LA LUMIÈRE

¿Qué es realmente un rayo luminoso? ¿Se compone de partes o se muestra indivisible? ¿Cómo funciona el mecanismo de su propagación? ¿A qué se debe la ley de refracción? En el *Projet*, Huygens había concedido una importancia relativa a estos interrogantes. El capítulo destinado a la naturaleza de la luz, como el que le precedía, centrado en la historia del telescopio, no eran más que adornos que vestían y daban prestancia a un tratado de óptica geométrica. Su determinación de explicar la doble refracción lo empujó más allá de los límites de la dióptrica. En las primeras páginas del *Traité*, sin embargo, Huygens retira el andamio que le ha encaramado hasta su famoso principio y atribuye el cambio de actitud a la mera curiosidad (Huygens, 1937, p. 459).

En óptica, como en cualquier otra ciencia donde la geometría se aplique a la materia, las demostraciones se apoyan en hechos experimentales; por ejemplo, que la luz viaja siguiendo líneas rectas, que los ángulos de incidencia y reflexión son iguales o que los rayos de luz se refractan de acuerdo con la ley de los senos [...]. La mayoría de los autores que abordan la materia se contentan con asumir estos hechos. Sin embargo, otros, con una mente más inquisitiva, han tratado de hallar su origen y su causa, considerándolos en sí mismos como fenómenos naturales dignos de interés. Y aunque han llegado a plantear algunas ideas ingeniosas, no bastan para que los lectores más inteligentes no deseen explicaciones más profundas que los dejen plenamente satisfechos.

En el proceso de reelaborar el *Projet*, Huygens abandonó la primera categoría de autores, aquellos que se conformaban con asumir los hechos experimentales, para ingresar en las filas de los segundos, de mente más inquisitiva. Su trabajo previo en óptica examinaba el comportamiento matemático de los rayos luminosos y, por tanto, cartografiaba un entorno inmediato. Sus dibujos, hipótesis y teoremas se referían a lentes de curvatura diversa, tubos de telescopio, rayos de luz. El espato de Islandia le planteaba un problema de índole distinta, que se podía describir, pero no elucidar geoméricamente. Las hipótesis para su resolución tampoco se armaban con elementos tangibles. Su enigma había de resolverse a una escala microscópica que eludía la observación directa.

Para pasar de la geometría a sus causas, no queda más remedio que internarse en un ámbito inaccesible. En cierto sentido, se trata de un espacio mental que adquiere forma a base de conjeturas. La única guía se encuentra en la confrontación de las predicciones observables de cada modelo microscópico (a las que se llega a través de una concatenación lógica de razonamientos, que parte de elementos inaprensibles) con la realidad que definen los experimentos. Este nivel superior de abstracción, que exige un esfuerzo adicional de la imaginación, es un terreno muy cartesiano en el que Newton no se sentía tan cómodo. ¿Existen los átomos de Demócrito? ¿Los vórtices cartesianos? ¿Existen las partículas de éter que postulará Huygens? ¿Existen los quarks?

La luz, a escala macroscópica, muestra una paradójica y poliédrica naturaleza. Newton y Huygens adoptaron perspectivas diferentes que parecían interpretar con acierto algunas de sus facetas, a costa de ofrecer una respuesta menos convincente para las demás. El *Opticks* dedica un extenso apartado a la refrangibilidad dispar de los rayos de distinto color, en sus grabados abundan los prismas y su autor hace honor a la máxima: "Hypotheses non fingo". El *Traité* ignora olímpicamente la cuestión de los colores y dibuja un paisaje microscópico, que solo puede contemplarse con la imaginación. Ambos parten de una base corpuscular, porque para los dos la luz es fruto de la actividad de partículas. La diferencia está en cómo se desarrolla y se manifiesta esa actividad. Newton no vislumbraba ninguna onda tras las maneras de la luz, tal como argumentó en la *query* 28 del *Opticks* (Newton, 2005, p. 151):

Cuando las ondas en la superficie del agua estancada pasan por los lados de un obstáculo ancho, que detiene a una parte de ellas, doblan a continuación las esquinas y se ensanchan gradualmente en el agua quieta detrás del obstáculo. Las ondas, los pulsos o vibraciones del aire, en que consiste el sonido, se doblan de modo manifiesto, aunque no tanto como las ondas del agua. Porque una campana o un cañón pueden oírse tras una colina que bloquea la vista del cuerpo que suena, y los sonidos se propagan con la misma facilidad a través de los tubos curvos que de los rectos. Pero jamás se ha sabido de la luz que siga pasajes torcidos ni que se doble hacia la sombra.

Huygens, por su parte, señala en el primer capítulo del *Traité* una traba insalvable en la imagen de la luz como un haz corpuscular (Huygens, 1937, p. 461):

[...] la luz consiste en un movimiento de la materia entre nosotros y el cuerpo luminoso. Si además tenemos en cuenta y consideramos la extraordinaria velocidad con que la luz se esparce en todas direcciones y también el hecho de que procediendo, como lo hace, de direcciones muy diferentes y en verdad opuestas, los rayos se interpenetran sin obstruirse unos a otros, entonces podemos comprender que siempre que vemos un objeto luminoso, no puede ser debido a la transmisión de la materia que nos llega del objeto, como por ejemplo un proyectil o una flecha que vuela en el aire [...].

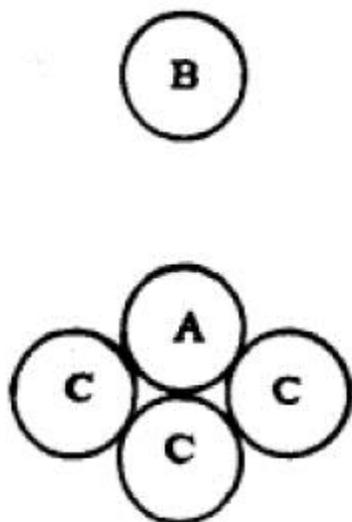
En el modelo que propone en el *Traité*, las partículas interpretan el papel de mediadoras (una intuición, si se quiere, clarividente). No se propagan, lo que se propaga es la agitación que las anima. Poco después de cumplir su papel transmisor, volvemos a encontrarlas más o menos en la misma ubicación, mientras la perturbación que las agitó progresa para afectar a otras partículas más alejadas.

Según Huygens, las partículas de un cuerpo luminoso chocan contra las partículas de éter de su entorno inmediato, comunicándoles su movimiento, que se transmitirá en una cadena de colisiones hasta excitar las células del ojo. Aquí pisa terreno conocido: veinticinco años atrás, en *De motu corporum ex percussione*, había analizado con perspicacia la mecánica de las colisiones. De todos modos, Huygens no se pierde demasiado en el jardín del éter. Recurre a él porque los experimentos de Robert Boyle y Evangelista Torricelli ya habían establecido que el sonido no se propaga en el vacío, mientras que la luz sí lo hace. La materia común, como el aire, no podía por tanto transmitir ambas. Huygens postuló entonces la existencia de una materia sutil e invisible, el éter, integrada por partículas "que se aproximan a una dureza casi perfecta y que poseen una elasticidad tan pronta como se quiera" (Huygens, 1937, p. 472). Ocupan todo el espacio que dejan los elementos que constituyen los sólidos, gases y líquidos. Huygens contempla la posibilidad de que el éter no penetre en los cuerpos, aunque él se inclina por lo contrario. En este sentido, parece considerar la materia como una esponja, por cuyos orificios y recovecos se cuecen las partículas de éter.

La agitación local de las partículas promueve una cadena de colisiones, que se dilata en un frente esférico en torno a la fuente luminosa. Este modelo de propagación aclara por qué dos rayos se atraviesan sin interferirse (Huygens, 1937, p. 474): "La misma partícula de materia puede servir a multitud de on-

das que procedan de distintos frentes o incluso de sentidos opuestos". Cada colisión no transmite su impulso en una dirección estrictamente radial, sino que lo difunde en abanico, siempre hacia delante (Huygens, 1937, p. 473).

Figura 5



[...] cuando una esfera, como sucede aquí con *A*, se halla en contacto con varias esferas similares *CCC*, recibe el impacto de otra esfera *B*, de tal modo que ejerza un impulso sobre todas las esferas *CCC* que la tocan, les transmitirá la totalidad de su movimiento, tras lo cual permanecerá inmóvil, como la esfera *B*.

A escala microscópica, Huygens despliega un colosal juego de billar en tres dimensiones, donde cada bola transmite el golpe que recibe y se detiene. Al menos, en promedio. Cada partícula mantiene una relativa libertad de movimientos, pero, en lo que respecta a la luz, se comporta como un corredor de relevos que enseguida entrega el testigo.

#### 4. EL PRINCIPIO DE HUYGENS

Aunque en muchas ocasiones se considere a Huygens fundador de la moderna teoría ondulatoria de la luz, hay que tener cuidado con el significado que él atribuye a la palabra "onda", porque no coincide con el que asumieron otros científicos al extender sus ideas. En el *Traité* se atiene a la analogía de Pardies (Huygens, 1937, p. 463):

[La luz,] como el sonido, debe propagarse en superficies esféricas u ondas; las llamo ondas a causa de su analogía con las que vemos formarse en el agua

cuando arrojamos en ella una piedra y a causa de que nos permiten observar una semejante y gradual propagación en círculos, aunque responden a una causa diferente y solo se forman en una superficie plana.

Huygens toma de las ondas en el agua la "propagación gradual en círculos", pero advierte que "responden a una causa diferente". En ningún caso menciona atributos característicos de modelos ondulatorios posteriores, como la longitud de onda, la fase o la interferencia. Llega a precisar que los frentes no se generan periódicamente (Huygens, 1937, p. 474): "las percusiones en el centro de estas ondas no se suceden con regularidad, por eso no hay que imaginar que las mismas ondas se siguen unas a otras a distancias iguales".

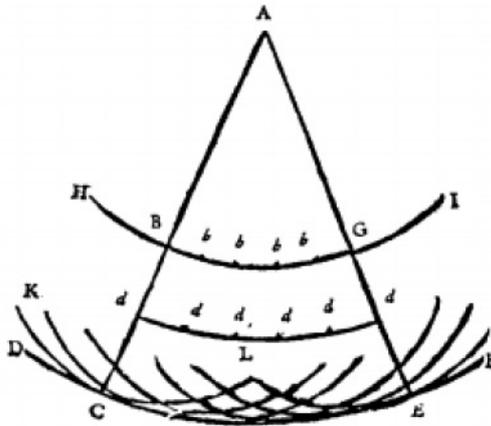
La pieza clave de su construcción es el "principio de Huygens": cada partícula afectada por un frente luminoso se transforma a su vez en el origen de un nuevo frente. A la vista de su fundamento mecánico, estos frentes secundarios no se abren en una esfera completa, sino en un ángulo sólido (Huygens, 1937, p. 475):

[...] cada partícula de una porción de materia en la que se propaga una onda, no debería de transmitir su movimiento solo a la siguiente partícula que se encuentre en una línea recta dibujada desde la fuente luminosa, sino que también comunica necesariamente una parte a todas las demás que la tocan y que se oponen a su movimiento. Por tanto, se sigue que alrededor de cada partícula se desarrolla una onda de la cual esa partícula es el centro.

Las ondas secundarias brotan por efecto de las colisiones —donde intervienen partículas idénticas y no se producen rebotes—, por eso no se expanden hacia el interior, de regreso a la fuente luminosa. En los dibujos de Huygens, que se interpretan como secciones, nunca dibuja círculos completos, solo arcos.

El principio de Huygens establece que si conocemos cómo es el frente de la perturbación en un momento dado, podremos determinarlo con exactitud en cualquier instante posterior. Basta con considerar cada punto del viejo frente como fuente de nuevos frentes secundarios, que se expanden progresivamente. El frente resultante será la superficie que envuelva todas las esferas a la vez, en el estado en el que se encuentren en cada momento. En cierto modo, el trasfondo de partículas de éter con sus colisiones sirve de coartada física para un método de construcción geométrico, un juego de regla y compás que permite dibujar cómo evoluciona la perturbación. La física, por supuesto, determina los parámetros de la composición, como la apertura del compás.

**Figura 6.** El principio de Huygens, tal como se ilustra en el *Traité de la lumière*



En el *Traité*, Huygens estrena el principio en las situaciones más elementales: la propagación de la luz en líneas rectas y la reflexión. En estos ejemplos, su construcción se antoja algo barroca y hasta innecesaria. El propio Huygens se siente obligado a hacer una advertencia (Huygens, 1937, p. 476): “no debe parecer que todo esto se ha averiguado con demasiado esmero ni demasiada sutileza, ya que a continuación se verá que todas las propiedades de la luz y cuanto se refiere a su reflexión y refracción, se explican principalmente por este medio”. En seguida aplica el principio al tránsito de la luz desde el aire al interior de un cuerpo transparente, derivando la ley de Snell. Asume que la luz viaja a mayor velocidad en el aire que en el vidrio o el agua. Para esta diferencia, propone la siguiente explicación (Huygens, 1937, p. 483):

Siendo la rarefacción de los cuerpos transparentes tal como se ha dicho, uno concibe con facilidad que las ondas se podrían transmitir en la materia etérea que ocupa los intersticios entre partículas. Y, por otra parte, uno puede concebir que la progresión de estas ondas debe ser un poco más lenta en el interior de los cuerpos, en virtud de los pequeños desvíos que las mismas partículas provocan.

Las partículas de éter transmiten la perturbación con más celeridad en la escasa densidad del aire, donde encuentran escasos tropiezos, que cuando se pierden en el esponjoso laberinto de la materia transparente.

La teoría corpuscular de Newton también atribuía la causa de la refracción a la disparidad en las velocidades de propagación en un medio y otro, aunque

predecía justo el efecto contrario: que la luz viaja más rápido en los materiales más densos. Según la interpretación de Newton, la luz es una corriente de partículas. Cuando se aproximan a la frontera entre dos medios, su masa experimenta una mayor atracción neta hacia el material más denso, que las acelera. Esa aceleración se produce solo en la dirección perpendicular a la frontera, lo que cierra el ángulo de propagación hacia dentro.

La discrepancia entre ambas predicciones ofrecía, a priori, una manera de fallar en favor de una u otra teoría a través de un experimento, pero en el siglo XVII no se disponía de medios técnicos para medir la velocidad de la luz en el aire o el vidrio. Solo se había logrado acotar en el vacío, mediante las observaciones astronómicas del yerno de Erasmus Bartholinus, Ole Rømer. Parece que Huygens fue la primera persona que aprovechó las irregularidades en el periodo aparente de Ío, registradas por Rømer, para un cálculo realista de la velocidad de la luz. Sus estimaciones, que incluye en el *Traité*, arrojan un valor de más de “mil cien veces cien mil *toises*” por segundo (Huygens, 1937, p. 469). Es decir, más de 214000 km/s (el *toise* era una medida de longitud que equivalía a 1,949 m). Hasta un siglo después de la muerte de Newton, el físico francés Léon Foucault no determinó en un laboratorio que la luz viaja más despacio en el agua que en el aire.

Huygens cierra la primera parte del *Traité* demostrando con su construcción el principio del tiempo mínimo de Fermat y estudiando la refracción de la luz en la atmósfera. A continuación, sirve su gran golpe de efecto.

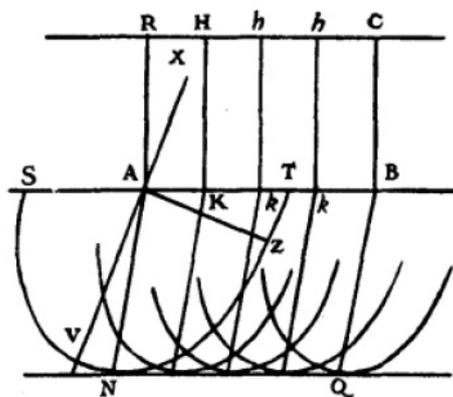
## 5. LAS RAZONES DEL RAYO EXTRAORDINARIO

Después de mucho bregar para encajar la doble refracción del espato de Islandia en su modelo de emisión corpuscular, Newton solo produjo enunciados de difícil exégesis, como sucede en la *query* 26, que atribuye a cada rayo de luz “cuatro lados o cuartos, dos de los cuales, opuestos entre sí, inclinan el rayo a que se refracte en la forma inusual” (Newton, 2005, p. 149). A falta de una explicación más diáfana, da la impresión de que, ante todo, pretendía demostrar que el modelo ondulatorio no era el único marco conceptual capaz de abordar la doble refracción.

El principal logro de Huygens fue que aunque el rayo extraordinario no respetase la ley de Snell, sí se sometía a su principio, después de practicar una serie de adaptaciones razonables. En su descripción,

cada punto en la superficie del espato se convierte, en cuanto acusa la perturbación del frente luminoso, en generador de dos clases de frentes secundarios independientes. Uno es esférico y da cuenta del rayo ordinario. El segundo adopta la forma de un elipsoide. ¿En qué direcciones hay que disponer sus ejes? La respuesta viene dada por las propiedades geométricas del cristal. Los elipsoides se orientan de modo que su eje menor quede paralelo al eje óptico. La longitud de este eje menor coincide con el diámetro de las esferas que alimentan el rayo ordinario, puesto que la velocidad de propagación de ambos frentes es la misma a lo largo del eje óptico. En los dibujos, bidimensionales, el frente ordinario vendrá dictado por círculos crecientes y el secundario, por elipses.

Figura 7



Llama la atención todo el espacio que dedica Huygens a describir la construcción geométrica de estos dos frentes en el *Traité de la lumière* y el poco que reserva a su justificación física. ¿Por qué se genera en el espato de Islandia un segundo frente elipsoidal y no en el resto de materiales transparentes conocidos? Huygens se limita a apuntar una razón (Huygens, 1937, p. 500):

Me parece que la disposición, o el orden regular, de estas partículas [que componen el cristal] contribuye a la formación de las ondas esféricas (no se requiere nada más, para ello, que el movimiento sucesivo de la luz se propague un poco más deprisa en una dirección que en otra) y apenas albergo dudas de que en el cristal exista una disposición tal de partículas iguales y semejantes, debido a su forma y a sus ángulos de medida definida e invariable.

Las esferas corresponden a un desplazamiento de la luz igual en todas las direcciones. La ruptura de esta simetría deforma la esfera, estirándola en las direcciones del cristal donde la luz se propaga más deprisa y generando el elipsoide. Pero de nuevo: ¿por qué el

espato de Islandia da lugar a esta asimetría? Huygens sugiere que la respuesta hay que buscarla en la disposición de las partículas que forman el cristal, pero tampoco ofrece más detalles. Desde luego, era consciente de que no estaba proporcionando una solución completa. Cierra su estudio del espato haciendo referencia a cómo la doble refracción desaparece cuando la luz se hace pasar por un segundo cristal. En un rasgo de honestidad científica, presenta el fenómeno como un problema abierto (Huygens, 1937, p. 517):

Aunque no he sido capaz hasta ahora de hallar la causa, no por esa razón me resisto a describirlo, para ofrecer así a otros la oportunidad de investigarlo.

Irónicamente, la solución vendría de suministrar “lados” a las ondas (o vibraciones transversales a la dirección de propagación), como había postulado Newton para las partículas. Con el *Traité*, Huygens consigue tender un puente lógico entre el escenario abstracto, hipotético, donde pululan las partículas de éter y que solo contempla la mente, y los rayos luminosos que percibe el ojo. Dispone un teatro físico cuya actividad microscópica, observada desde la distancia, adopta la apariencia de los fenómenos que maneja la óptica geométrica. Sin embargo, como en todas las teorías clásicas de la luz, muchas sutilezas eluden el cedazo. Logra incorporar la refracción extraordinaria, pero el modelo no describe con nitidez suficiente lo que ocurre en el espato de Islandia para que se generen las ondas elipsoidales. Tampoco explica el fenómeno de la polarización. Por fortuna, en esta ocasión no esperó a contar con una teoría plenamente satisfactoria para publicar sus resultados. La omisión más llamativa tiene que ver con el rasgo de la luz más alejado de la óptica geométrica: el color, laguna que algunos científicos, como Hooke, no pasaron por alto.

Desde un punto de vista utilitario, su elegante principio de construcción geométrica eliminaba el obstáculo que había estorbado hasta entonces la consumación del *Projet*. A pesar de dejar la vía expedita, no se aventuró a recorrerla hasta el final. Los vastos conocimientos que había ido atesorando a lo largo de una vida científica consagrada a la dióptrica y, en particular, a su aplicación al arte de fabricar telescopios, se perdieron en un limbo de continuos replanteamientos, enmiendas y ampliaciones. Se puede juzgar el *Traité de la lumière* como un pináculo en muchos sentidos. Lo es por la brillantez con la que despliega su interpretación de la luz, sentando las bases del modelo ondulatorio. También es una cima porque se alza como la punta de un iceberg, deslumbrante, aguda, el remate a una imponente masa oculta.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andriessse, C. D. (2005). *Huygens: The Man Behind the Principle*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bell, A. E. (1947). *Christian Huygens and the Development of Science in the Seventeenth Century*. Londres: Edward Arnold.
- Blanco Laserna, D. (2013). *Huygens. Un rayo atrapado en una onda*. Barcelona: RBA.
- Burnett, D. G. (2005). *Descartes and the Hyperbolic Quest: Lens Making Machines and Their Significance in the Seventeenth Century*. Filadelfia: American Philosophical Society.
- Cohen, I. B. (1940). Roemer and the First Determination of the Velocity of Light (1676). *Isis*, 31, 2, pp. 327-379. <http://dx.doi.org/10.1086/347594>
- Descartes, R. (1824). *La Dioptrique*. En: Victor Cousin (ed.). *Oeuvres de Descartes (tome cinquième)*. Paris: F. G. Levrault.
- Dijksterhuis, F. J. (2004). *Lenses and Waves: Christiaan Huygens and the Mathematical Science of Optics in the Seventeenth Century*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Dijksterhuis, F. J. (2007). Constructive thinking: a case for dioptrics. En: Roberts, L., Schaffer, S. y Dear, P. (eds.). *The Mindful Hand: inquiry and invention from the late Renaissance to early industrialisation*. Amsterdam: Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, pp. 59-82.
- Huygens, Ch. (1888). *Correspondance 1638-1656*. En: Bierens de Haan, D. (ed.). *Oeuvres complètes (tome I)*. La Haya: Martinus Nijhoff.
- Huygens, Ch. (1895). *Correspondance, 1666-1669*. En: Bosscha, J. (ed.). *Oeuvres complètes (tome VI)*. La Haya: Martinus Nijhoff.
- Huygens, Ch. (1897). *Correspondance, 1670-1675*. En: Bosscha, J. (ed.). *Oeuvres complètes (tome VII)*. La Haya: Martinus Nijhoff.
- Huygens, Ch. (1899). *Correspondance, 1676-1684*. En: Bosscha, J. (ed.). *Oeuvres complètes (tome VIII)*. La Haya: Martinus Nijhoff.
- Huygens, Ch. (1916). *Dioptrique*. En: Korteweg, D. J. (ed.). *Oeuvres complètes (tome XIII)*. La Haya: Martinus Nijhoff.
- Huygens, Ch. (1937). *Mécanique théorique et physique, 1666-1695*. En: Vollgraff, J. A. (ed.). *Oeuvres complètes (tome XIX)*. La Haya: Martinus Nijhoff.
- Newton, I. (2005). *Newton's Philosophy of Nature. Selections from His Writings* (ed. Thayer, H. S.). Nueva York: Dover.
- Sabra, A. I. (1981). *Theories of Light, from Descartes to Newton*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Shapiro, A. E. (1990). The Optical Lectures and the foundations of the theory of optical imagery. En: Feingold, M. (ed.). *Before Newton: The Life and Times of Isaac Barrow*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 105-178. <http://dx.doi.org/10.1017/cbo9780511983559.003>
- Spinoza, B. (1995). *The Letters*. Indianápolis: Hackett.
- Van Helden, A. C. y Van Gent, R. H. (1999). The Lens Production by Christiaan and Constantijn Huygens. *Annals of Science*, 56, 1, pp. 69-79. <http://dx.doi.org/10.1080/000337999296535>