



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**DE ONDAS Y CORPÚSCULOS: UN
ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL
TRATADO DE LA LUZ DE CHRISTIAAN
HUYGENS Y LA *ÓPTICA* DE ISAAC
NEWTON**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

F Í S I C A

P R E S E N T A:

MADELYN HERNÁNDEZ OLIVARES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ ERNESTO MARQUINA FÁBREGA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2019



FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno

Hernández
Olivares
Madelyn
2411760376
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Física
410049822

2. Datos del tutor

Dr.
José Ernesto
Marquina
Fábrega

3. Datos del sinodal 1

Fís.
José Ramón
Hernández
Balanzar

4. Datos del sinodal 2

Dra.
Fernanda
Samaniego
Bañuelos

5. Datos del sinodal 3

Dr.
Roberto Alejandro
Ruelas
Mayorga

6. Datos del sinodal 4

Dr.
Raúl Arturo
Espejel
Morales

7. Datos del trabajo escrito.

De Ondas y Corpúsculos
Un Análisis Comparativo entre el *Tratado de la Luz* de Christiaan Huygens y la *Óptica* de Isaac Newton.
101 p
2019

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 1. HUYGENS.	7
Introducción	7
1.1 Descartes y La Dioptrique.	7
1.2 Hooke y Pardies.	9
1.2.1 Los pulsos de Hooke	9
1.2.2 Las Ondas de Pardies.	12
1.3 Projet du Contenu de la Dioptrique	14
1.4 La Solución a las Dificultades del Espato de Islandia.	19
1.5 Creación y publicación del Tratado de la Luz.	21
CAPÍTULO 2. TRATADO DE LA LUZ.	24
Introducción	24
2.1 Propagación de las Ondas de Luz.	25
2.1.1 Principio de Huygens	26
2.1.2 Propagación Rectilínea de la Luz.	28
2.2 Reflexión.	29
2.3 Refracción	30
2.4 Espato de Islandia.	32
2.4.1 Doble refracción	32
2.4.2 Polarización	36
2.5 Recepción del Tratado de la Luz.	37
CAPÍTULO 3. NEWTON	39
Introducción.	39
3.1 Quaestiones Quaedam Philosophicae.	39
3.2 De colores y Películas Delgadas.	42
3.3 Optical Lectures	45
3.4 Nueva Teoría de la Luz y los Colores	47
3.4.1 La Crítica de Hooke	49
3.4.2 Las Dificultades de Pardies	50
3.4.3 La Respuesta de Huygens	51
3.4.4 Tres Críticos	52
3.5 Hipótesis sobre la luz.	53
CAPÍTULO 4. ÓPTICA	59
Introducción	59

4.1 Libro I. Diferente refrangibilidad y Color.	59
4.1.1 Definiciones y Axiomas.	59
4.1.2 Diferentes grados de refrangibilidad.	60
4.1.3 Prueba de la Ley de Refracción.	62
4.1.4 Libro I. Parte 2: Color	67
4.1.5 Mezcla de colores.	68
4.2 Libro 2: Películas Delgadas y Fits	70
4.2.1 Películas Delgadas	70
4.2.2 Accesos de Fácil Reflexión y Fácil Transmisión.	73
4.3 Libro III. Parte 1: Difracción (Inflexión)	75
4.4 Cuestiones.	78
4.4.1 Doble refracción.	79
4.4.2 Crítica a la Teoría Ondulatoria	81
4.4.3 Naturaleza de la luz.	82
4.5 Recepción de la Óptica.	83
CAPÍTULO 5. COMPARACIÓN	85
Introducción.	85
5.1 Estructura y lenguaje.	86
5.1.1 Portada y Prefacio.	86
5.1.2 Lenguaje.	86
5.2 Metodología.	87
5.3 Naturaleza de la Luz	89
5.3.1 Velocidad de la Luz.	89
5.3.2 Uso de la Analogía Acústica	90
5.3.3 Ondas y Corpúsculos	91
5.4 Reflexión y Refracción	92
5.4.1 Reflexión	92
5.4.2 Refracción	92
5.5 Doble Refracción	93
5.6 Recepción.	94
CONCLUSIÓN	96
BIBLIOGRAFÍA	98

INTRODUCCIÓN

Ha terminado de llover. Una serie de charcos han cubierto las calles y permiten ver, ahí reflejadas, las siluetas de objetos a su alrededor. Coronando el espectáculo se observa un arcoíris y no queda más que admirar sus colores, poco después, las nubes dejan un pequeño espacio para que un rayo de sol alcance la tierra o se encuentre con un obstáculo... Reflexión, refracción, luz y sombra.

Estas y otras maravillas ópticas han sido vistas e interpretadas desde el inicio de la humanidad y sin embargo, no siempre fue la luz la protagonista de estas reflexiones, los griegos definieron la óptica como el estudio de la visión¹, y su objetivo era entender las causas físicas y fisiológicas de esta. Tendrían que pasar dos milenios para que estudiosos como Johannes Kepler, Willebrord Snell van Royen y René Descartes enriquecieran el enfoque matemático del estudio de la luz, explicando la formación de imágenes, arribando a la ley que gobierna la refracción e inaugurando una nueva forma de aproximarse a la óptica.

Christiaan Huygens e Isaac Newton, los protagonistas de este trabajo, vivieron y desarrollaron sus trabajos de óptica durante la segunda mitad del siglo XVII, una época tempestuosa, borboteante de ideas y debates, a través de los cuales se intentaba esclarecer la naturaleza de la luz. Aunado a esto, nuevos descubrimientos exigían atención, ya no bastaba explicar la reflexión y la refracción, en 1669 Erasmus Bartholinus dio a conocer un nuevo fenómeno: la doble refracción del Espato de Islandia y, en 1665, Francesco Maria Grimaldi realizó el primer estudio sobre la difracción.

Huygens y Newton tomaron entonces las herramientas que había a su alrededor, los desarrollos de óptica geométrica, los experimentos y fenómenos descubiertos hasta entonces y empezaron a crear una nueva ciencia, una óptica física que respondiera una pregunta fundamental: ¿Qué es la luz y cómo explica esto sus propiedades?

Sin embargo, aún con el mismo objetivo, sus desarrollos los llevarían por caminos diferentes, ya que Huygens presentaría una teoría ondulatoria de la luz, mientras que Newton se inclinaría por la naturaleza corpuscular de esta. Por lo tanto, las respuestas que cada uno dio a esa pregunta fueron muy distintas y quedaron concentradas, esencialmente, en dos obras: el *Tratado de la Luz* y la *Óptica*, escritas por Huygens y Newton, respectivamente. El objetivo de este trabajo es comparar ambas obras, sus planteamientos, metodologías y conclusiones, con lo cual podremos dilucidar el estado del estudio de la luz en el siglo XVII y entender mejor por qué estos dos libros marcaron un antes y un después en el mismo.

Por esta razón, el presente trabajo está estructurado de la siguiente forma:

El capítulo 1 está dedicado a Huygens y los antecedentes del *Tratado de la Luz*, sus principales influencias en el desarrollo de su teoría ondulatoria, así como la «dificultad» que representó para él, el estudio de la doble refracción o refracción extraordinaria que se presentaba en el Espato de Islandia, que lo obligó a realizar una investigación más

¹ La palabra óptica viene del griego *optika*, que se deriva del verbo *opteuō* -ver-, ambas palabras se relacionan con el sujeto *ōps* -ojo). Cfr. Smith, A. M. (2015). *From Sight to Light: The Passage from Ancient to Modern Optics*. Chicago and London.: The University of Chicago Press.

profunda sobre el fenómeno, que eventualmente lo llevaría a la formulación de su principio de propagación de onda. Además de la publicación del *Tratado de la Luz*.

El capítulo 2 es un resumen del contenido principal del *Tratado de la Luz*, donde se analiza la forma en que Huygens explicó la propagación rectilínea de la luz, la reflexión, la refracción y la doble refracción, así como un apartado final sobre la recepción del mismo en el siglo XVII.

El capítulo 3 corresponde a Newton, analizando cómo es que fueron tomando forma las ideas y conclusiones que terminarían plasmadas en la *Óptica*, sus primeras notas y experimentos; las disputas de sus primeras publicaciones y la publicación de su tratado.

El capítulo 4 resume la *Óptica*, su teoría de la diferente refrangibilidad, del color, de las películas delgadas; así como sus observaciones sobre la difracción y las «Cuestiones» que dejó para futuros investigadores. Cerrando el capítulo con el recibimiento que tuvo la *Óptica* durante el siglo XVIII.

Finalmente, el capítulo 5 corresponde a la comparación entre el *Tratado de la Luz* y la *Óptica*.

CAPÍTULO 1. HUYGENS.

Introducción

«La dióptrica² me absorbe por completo», escribió Huygens el 29 de octubre de 1652, en una carta dirigida a su mentor, Frans Van Schooten.³ En los meses que siguieron a esa carta, Huygens elaboró un tratado que contenía una teoría matemática sobre las propiedades de las lentes y los telescopios⁴; acompañando esto con interés por el trabajo práctico, puliendo lentes y construyendo telescopios, permitiéndole anunciar, apenas un año después, el descubrimiento de un satélite alrededor de Saturno, Titán y la posterior descripción de un «anillo sólido» alrededor de este planeta.⁵

Una década después⁶, en 1673, su interés en la dióptrica lo llevaría a formular un nuevo proyecto: *Projet du Contenu de la Dioptrique*, cuyo esbozo indica que este tratado condensaría gran parte de la dióptrica que había desarrollado desde 1653, además de una explicación de la refracción de rayos de luz en lentes y sus configuraciones, un capítulo sobre la naturaleza de la luz y la presentación del problema de la doble refracción del Espato de Islandia, un preámbulo para el desarrollo de su teoría ondulatoria.

En este capítulo se explorarán las principales influencias de Huygens para el desarrollo de su teoría ondulatoria, iniciando por Descartes y su concepción de la naturaleza de la luz, así como la presentación de la ley de refracción. Además de la influencia de Pardies y Hooke, en la concepción de la naturaleza ondulatoria de la luz. Posteriormente, dedicaré un espacio al *Projet du Contenu de la Dioptrique* o *Projet* (como me referiré a él a lo largo de este trabajo); así como de los intentos de solución al problema de la doble refracción. Y, finalmente, la publicación del *Tratado de la Luz*.

1.1 Descartes y *La Dioptrique*.

En 1637 René Descartes publicó *La Dioptrique*, una obra que consiste de diez discursos, los cuales tratan el funcionamiento del ojo y su relación con otros sentidos, el proceso de visión y las formas de mejorarla, las formas y el pulido de lentes; la naturaleza de la luz y aquello que los estudiosos en óptica habían buscado por siglos: la ley de refracción.

En el primer discurso de *La Dioptrique*, Descartes desglosa las propiedades y la naturaleza de la luz. En una primera analogía incita al lector a imaginarse caminando

² El estudio de la refracción de la luz, especialmente por medio de lentes.

³ Dijksterhuis, *Lenses and Waves*, pp. 11-12.

⁴ *Tractatus* (los editores de las Oeuvres Complètes lo han denominado *Dioptrica, Pars I. Tractatus de refractione et telescopiis*) el tratado inacabado de 1653 sobre dioptrías que marca el inicio del compromiso de Huygens con la óptica. *Tractatus* contenía una teoría exhaustiva y rigurosa del telescopio y argumentaré que esto lo hace único en la óptica matemática del siglo XVII.

Y su posterior tratado sobre dióptrica, *De Aberratione* de 1665, donde Huygens hizo un esfuerzo único para emplear la teoría dioptrica para mejorar el telescopio. (Ibíd, pp. 4-5).

⁵ El descubrimiento de Titán se publicaría en un panfleto *De saturni luna observatio nova*, un texto que terminaba con un anagrama que anticipaba un segundo descubrimiento: la verdadera naturaleza de la inexplicable apariencia de Saturno. Tres años después, elaboraría su explicación en *Systema saturnium*, donde describía que el planeta tenía un anillo sólido alrededor del mismo (Ibíd, p. 12).

⁶ Durante la década de 1655 a 1672, Huygens alcanzaría la virtuosidad matemática que caracterizaría sus futuros trabajos. Estos años fueron donde sus logros más renombrados vieron la luz: el descubrimiento, de un satélite de Saturno y la identificación de su anillo; la invención de un ocular para el telescopio; la invención, mejora y empleo del péndulo cicloidal, en 1656, que fueron las bases de su obra maestra *Horologium Oscillatorium* (1673).

durante la noche con un bastón, dando golpes para evitar los obstáculos y descubriendo así la forma del camino que tiene por delante, Descartes escribe: «y para hacer una comparación con esto, quisiera hacerles pensar que la luz no es otra cosa, [...] que un cierto movimiento, o una acción muy rápida y fuerte que se mueve hacia nuestros ojos a través del aire y otros cuerpos transparentes de la misma manera que el movimiento o la resistencia de los cuerpos encontrados [...] pasan a su mano por medio del palo».⁷ Con este ejemplo, Descartes sostiene que es fácil darse cuenta de que la luz actúa como el bastón que permite percibir objetos, como una acción que se propaga instantáneamente a través de un medio sin que se transporte ningún tipo de materia.

Ahora, antes de establecer la segunda analogía utilizada por Descartes, es necesario hacer un paréntesis para explicar que él consideraba que el espacio estaba completamente lleno de partículas perfectamente rígidas de diversos tamaños y formas, divididas en tres «elementos». Las partículas del «tercer elemento», o materia ordinaria, eran las más gruesas y tenían una forma arbitraria. Las del «segundo elemento», o «materia sutil», eran redondas y llenaban todo el espacio posible entre las partículas anteriores. Las del «primer elemento» eran arbitrariamente pequeñas y llenaban los intersticios restantes. En este espacio concebido de esta forma, el sol y las estrellas son acumulaciones esféricas del primer elemento, inmersos en la sutil materia del segundo elemento,⁸ a través de la cual la luz «actúa».

Para explicar esto último, Descartes usa el ejemplo de «una tina, en el momento de la vendimia llena de uvas semi-prensadas», una tina llena de uva y vino, donde el vino es análogo a la «materia muy sutil y fluida» del segundo elemento, que se extiende de las estrellas a nosotros de manera ininterrumpida. Así, el líquido llena los huecos entre las uvas, ejerciendo cierta presión sobre las paredes de la tina y se distribuye de manera uniforme. Descartes explica entonces que la acción de la luz es igual a la presión ejercida por el vino, y tiende a desplazarse en línea recta, proveniente de un cuerpo luminoso y en todas direcciones. Sin embargo, no se trata de un movimiento en sí mismo, sino de una tendencia al movimiento (*inclination au mouvement o conatus*), una tendencia transmitida a través del material que, ocupando el espacio entre nuestros ojos y la fuente de luz, actúa como medio, de la misma forma que el vino tiende a moverse hacia abajo debido a la acción ejercida por todo el conjunto del líquido. Entonces, volviendo a la visión establecida en el párrafo anterior, la luz no es más que la presión o la tendencia al movimiento que el sol y las estrellas ejercen sobre las esferas del «segundo elemento», una presión que se transmite instantáneamente y de forma rectilínea al ojo, debido a la continuidad de las esferas y a su perfecta rigidez.

Habiendo explicado esto, Descartes prosigue en *La Dioptrique* con un segundo discurso, donde se encuentra la ley de refracción, ley de los senos o ley de Snell⁹, a través de la cual se define la flexión que sufre un rayo de luz al pasar a través de la interfaz entre dos medios diferentes, que resulta estar en una proporción constante entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción:

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = k \quad 1)$$

⁷ Descartes, *The Philosophical Writings of Descartes Vol. I.: Optics*, pp. 2-3.

⁸ Descartes, *The World and Other Writings. The World*.

⁹ El principio de refracción se nombró así en honor Willebrord Snell (1591–1626), quien declaró la ley por primera vez en un manuscrito en 1621. Sin embargo, no sería publicada o conocida hasta la publicación de Descartes quien, a pesar de varias acusaciones por plagio, parece haber arribado a esta relación por su propia cuenta (Sabra, *Theories of Light*, p. 100-102).

No es necesario que analicemos aquí en detalle la derivación de la ley de Descartes, excepto para señalar que parte de la suposición contraintuitiva de que la luz aumenta en velocidad a medida que pasa de un medio óptico menos denso a uno más denso. Así, se suponía que la luz viajaría más libre y más rápidamente en el vidrio que en el agua, y en el agua que en el aire.

Aun cuando existen dudas sobre la autoría de la ley de refracción¹⁰, Descartes fue el primero en publicar la forma correcta de esta relación matemática que constituiría un importante punto de partida para la óptica de la segunda mitad del siglo XVII y, en particular, para las investigaciones de Huygens y Newton.

1.2 Hooke y Pardies.

Un estanque de agua en calma. Una roca que cae en este. Anillos, aros, ondas que se extienden en círculos concéntricos alrededor del sitio donde ha ocurrido el impacto. Este es el ejemplo con el que, desde la antigüedad, con los griegos como protagonistas, se explicaba la propagación del sonido¹¹:

«La audición tiene lugar cuando el aire entre la fuente y el receptor del sonido se transforma en vibraciones esféricas y luego se expande en ondas hasta que presiona el oído, de la misma manera que el agua en un recipiente forma ondas circulares, cuando se lanza una piedra contra él».

Esta analogía, la analogía acústica, sería utilizada posteriormente para el desarrollo de teorías ópticas del siglo XVII.¹² En el caso de las teorías ondulatorias, Huygens en particular menciona en el *Tratado de la Luz* a quienes «comenzaron a considerar las ondas de luz»¹³: Robert Hooke e Ignace Gaston Pardies, quienes emplearon esta analogía para explicar sus teorías, al igual que Huygens. Será entonces instructivo ver cómo influyeron las investigaciones de estos dos autores en el desarrollo de su teoría ondulatoria.

1.2.1 Los pulsos de Hooke

La teoría de la luz de Hooke se encuentra en su *Micrographia* (1665), más concretamente en la *Observación IX*¹⁴, donde tenía la intención de dar una explicación a los colores que se formaban en películas delgadas de material transparente, como por ejemplo, el espacio entre dos lentes presionadas una contra la otra, las burbujas de jabón o las láminas de cristal de Moscovia, un cristal «compuesto por un número infinito de escamas delgadas unidas o engendradas unas sobre otras, [...] que se puede descomponer en piezas tan extremadamente delgadas que resulta difícil percibir las a simple vista». Mientras que al observar con el microscopio podía ver que estos colores se ordenaban en forma de anillos que rodeaban las «motas o faltas blancas, los cuales eran redondos o

¹⁰ Ver nota 10.

¹¹ Diogenes Laertius (siglo III d.C.) (Darrigol, *The Analogy between Light and Sound in the History of Optics*, p. 130).

¹² *Ibíd.*, p. 118.

¹³ Huygens, *Treatise on Light*, p. 20.

¹⁴ Hooke, *Micrografía*, p. 47.

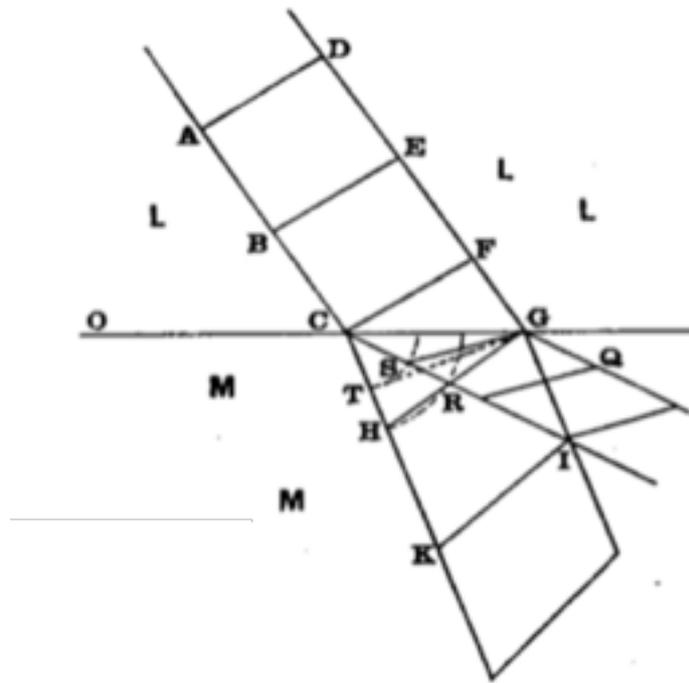


Fig. 1 Los pulsos GH y KI (después de la refracción en un medio más denso) o SG y RQ (después de la refracción en un medio menos denso), ya no son perpendiculares a los rayos ABC y DEF porque la distancia que CH viajó en el medio más denso es mayor que la distancia que FG viajó en el medio menos denso. (Ilustración tomada de Hooke, *Micrografía*, p. 57).

irregulares según la forma de la mancha que limitaban, siendo la posición de los colores exactamente la misma que la del arco iris».¹⁵

Para lograr su objetivo, se dispuso a proponer una explicación usando una teoría de la luz según la cual, los movimientos cortos y vibrantes de los objetos luminosos producen *pulsos* que se propagan¹⁶ «[...] en todas direcciones a través de un *medio homogéneo* mediante líneas *directas* o *rectas*, extendidas en todas direcciones como radios desde el centro de una esfera. [...] en un *medio homogéneo* este movimiento se propaga en todas direcciones con una *velocidad igual*, y de ahí que necesariamente todo *pulso* o *vibración* del cuerpo luminoso genere una esfera que aumentará continuamente, creciendo a la manera (aunque indefinidamente más rápido) en que las ondas o anillos de la superficie del agua se amplían en círculos cada vez mayores en torno a un punto en el que se inició el movimiento al hundirse la piedra, de lo que se sigue necesariamente que todas las partes de estas esferas que ondulan a través del *medio homogéneo* cortan a los rayos en ángulos rectos».¹⁷

Es aquí donde Hooke utiliza el concepto de frente de onda, ilustrándolo mediante la propagación de las ondas de agua, el cual describe una esfera que, en cada punto de su superficie, es perpendicular al rayo o dirección de propagación desde el centro de la perturbación.

Hooke aplica estas ideas examinando cómo se propaga ese pulso durante la refracción, para lo cual simplemente «asume» la ley de los senos de Descartes:

¹⁵ *Ibíd.* 48.

¹⁶ *Ibíd.*, pp. 55-56.

¹⁷ *Ibíd.*, p. 57.

«Y aquí, siguiendo al agudísimo y excelente filósofo Descartes, supongo que el seno del ángulo de inclinación en el primer medio es al seno de refracción en el segundo como la densidad del primero a la del segundo».¹⁸

Explicando que cuando un pulso de luz (Fig. 1) cae oblicuamente sobre la superficie de un medio más denso, adoptando también el punto de vista de Descartes, la tendencia de los pulsos se propaga más rápidamente en el segundo medio. Como resultado, el pulso se volverá oblicuo a su dirección de propagación:

«[En la Fig. 1] ACDF es un rayo físico o ABC y DEF, dos rayos matemáticos *vijando* desde un punto muy remoto de un cuerpo luminoso a través del *medio* transparente y *homogéneo* LLL, siendo DA, EB, FC pequeñas porciones de los impulsos orbitales que han de cortar, por tanto, a los rayos en ángulo recto. Estos rayos se topan con una superficie plana, NO, de un *medio* que suministra un *tránsito* más fácil a la propagación de la luz, y al caer *oblicuamente* sobre ella se refractarán en el medio MMM hacia la perpendicular a la superficie. Y puesto que este *medio* es un tercio más fácil de *atravesar* que el anterior, el punto C pulso orbital FC se moverá hasta H cuatro espacios en el mismo tiempo en que su otro extremo se mueve tres espacios hasta G, y, por tanto, el pulso refractado GH será *oblicuo* a los rayos refractados CHK y GI. Además, nada es más evidente que el ángulo GHC será agudo, y más agudo cuanto mayor sea la refracción, pues el seno de inclinación es al seno de refracción como GF a TC, la distancia entre el punto C y la perpendicular desde G a CK; es decir, como cuatro a tres. Siendo HC más largo que CF, es también más largo que T C, y por tanto el ángulo GHC es menor que el GTC. De esta manera, pues, las partes de los pulsos GH e IK se mueven torcidos o cortan a los rayos en ángulos *oblicuos*».¹⁹

Y aunque el objetivo de Hooke no era dar una explicación de la refracción, sino del origen de los colores²⁰, el veredicto de Huygens fue severo²¹ y le suscitó más críticas que aplausos. «Esto no se debe asumir sino que se debe demostrar, y se puede demostrar...», escribió Huygens, al margen de la página de su copia de la *Micrographia*, donde Hooke introdujo la ley de los senos, señalando descuidos en su terminología y sus cálculos²². A pesar de su censura, más adelante se encuentra la mención de «círculos de ondas» y dos esquemas dibujados a lápiz en la parte de atrás de la *Scheme VI* (donde originalmente se encuentra la Fig. 1), que muestran que Huygens probablemente intentó extender el enfoque del frente de onda de Hooke.²³

¹⁸ *Ibíd.* pp. 57-58.

¹⁹ *Ibíd.* p. 57.

²⁰ Los colores son producidos por la oblicuidad del pulso. El lado del pulso CHK (Fig. 1) que precede, es decir, que forma un ángulo agudo con el frente de la onda, produce azul, y la parte GI que sigue, es decir, con el ángulo obtuso, produce rojo. Esta es una teoría de dos colores, ya que todos los demás colores surgen de alteraciones del rojo y el azul, o de mezclas de rojo y azul o de sus derivados. La fuerza de cada color varía desde el borde hacia adentro, desde un rojo intenso en un borde que sombrea hasta un amarillo bajo, y en el otro borde desde un azul oscuro hasta un azul claro. El verde surge de una mezcla de amarillo y azul claro; por lo tanto, según Hooke, el verde no es un color puro como el rojo y el azul. Hooke elabora que esta teoría del color es un poco detallada, pero solo tocaré aquellos rasgos que tienen una relación directa con su concepto de rayo y frente de rayo. Hooke concluye su discusión de su teoría de la oblicuidad del color con las siguientes definiciones de rojo y azul: «que el azul es una impresión sobre la retina de un pulso de luz oblicuo y confuso, cuya parte más débil precede y la más fuerte sigue. Y que el rojo es una impresión sobre la retina de un pulso de luz oblicuo y confuso cuya parte más fuerte precede y la más débil sigue» (*Ibíd.* p. 54).

²¹ Huygens poseía una copia de la *Micrographia*, la cual recibió en marzo de 1665, dedicada a «Pour Monsieur Christian [sic] Hugesn [sic] de Zulichem» en la primera página, la cual contiene anotaciones de Huygens solo en la Observación IX. (Barth, *Huygens at Work*, p. 602).

²² *Ibíd.*, pp. 612-613.

²³ *Ibíd.*, p. 607.

Y es que, aunque las consideraciones cruciales que usaría Huygens para llegar a la construcción de su principio de propagación de onda no se encuentran en esta teoría, es mérito de Hooke el haber introducido el concepto de frente de onda.²⁴

1.2.2 Las Ondas de Pardies.

El segundo predecesor de la teoría ondulatoria de Huygens fue Ignace Gaston Pardies, jesuita y profesor en el colegio de Clermont de París quien, como Huygens menciona en el *Tratado de la Luz*, lo dejó ver una parte de su teoría ondulatoria, «que no pudo completar ya que murió poco después, [donde] se había comprometido a probar con estas ondas los efectos de la reflexión y la refracción».²⁵

Según cuenta Pardies en *La Statique (1674)*²⁶, esta teoría se publicaría en un volumen dedicado al movimiento ondulatorio, «a ejemplo de estos círculos que se forman en la superficie del agua cuando se deja caer una piedra sobre ella», explicando con esto la propagación del sonido y haciendo una conjetura sobre la propagación de la luz, así como una demostración de la ley de refracción, partiendo de esta hipótesis.²⁷

Los manuscritos de Pardies al respecto, ahora perdidos, fueron heredados a Pierre de Ango, quien decidió no publicarlos tal cual estaban y, en lugar de eso, tomó las ideas de Pardies y añadió las suyas, editándolas en *L'Optique divisée en trois livres* (1682). Esto último ha representado una gran dificultad para los historiadores, pues es difícil dilucidar qué ideas corresponden a Pardies y cuáles a Ango²⁸. Además, en opinión de Huygens, aunque el manuscrito de Pardies era muy bueno, los cambios de Ango habían estropeado claramente la obra.²⁹ Siendo sin embargo la única evidencia que tenemos de lo que pudo haber sido la teoría de Pardies, resumo aquí las ideas centrales de la misma.

La deducción de Pardies/Ango depende de dos premisas: los rayos son siempre normales a las ondas y las ondas se propagan con una velocidad definida en diferentes medios.

Consideremos las ondas esféricas que pasan por la superficie de la BED entre dos medios (Figura 2), el rayo cc es la dirección de propagación de la onda y normal a la tangente Cm, mientras que para el rayo refractado ee, la normal es la tangente Cn, para un círculo arbitrario corte BED en C y K y Cm en m.

²⁴ Sabra, *Theories of Light*, p.195.

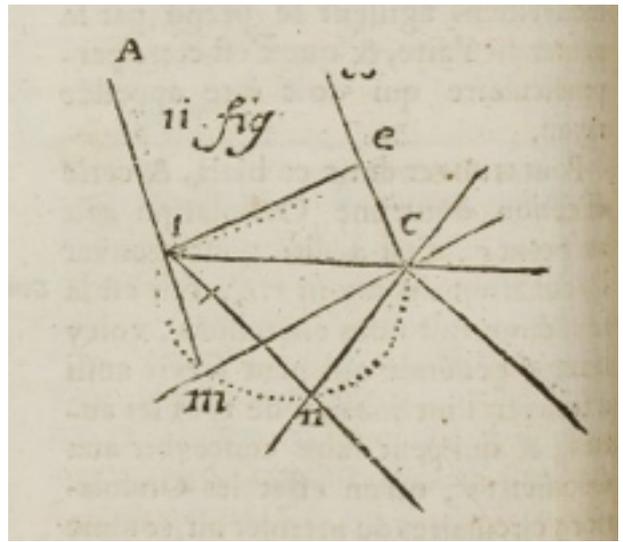
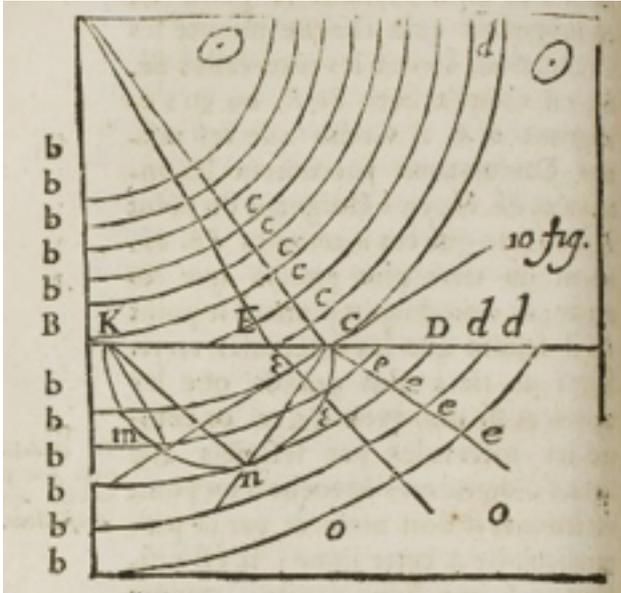
²⁵ Huygens, *Treatise on Light*, p. 20.

²⁶ Pardies, Ignace-Gaston. "La Statique, Ou La Science Des Forces Mouvantes . Par Le P. Ignace Gaston Pardies De La Compagnie De Jesus. Troisième Edition." A Paris, de l'imprimerie de Seb. Mabre-Cramoisy. hez Florentin & Pierre Delaulne, devant l'église de Sorbonne, à l'Empereur. M. DC. LXXXX. Avec privilege de Sa Majesté [sic], 1673.

²⁷ Sabra, *Theories of Light*, p. 196.

²⁸ Shapiro, *Kinematic Optics*, p. 209.

²⁹ *Ibid.*, nota 232, p. 210.



a)

b)

Fig. 2. a) En la refracción de ondas esféricas según Pardies/Ango, los rayos refractados ee y $\epsilon\epsilon$ son normales a las ondas refractadas $e\epsilon$ b) Muestra el ingreso de un rayo en una porción de la onda, con un círculo más pequeño. (Ilustraciones tomadas de Ango, *L'Optique*, p. 62 y p. 64, respectivamente).

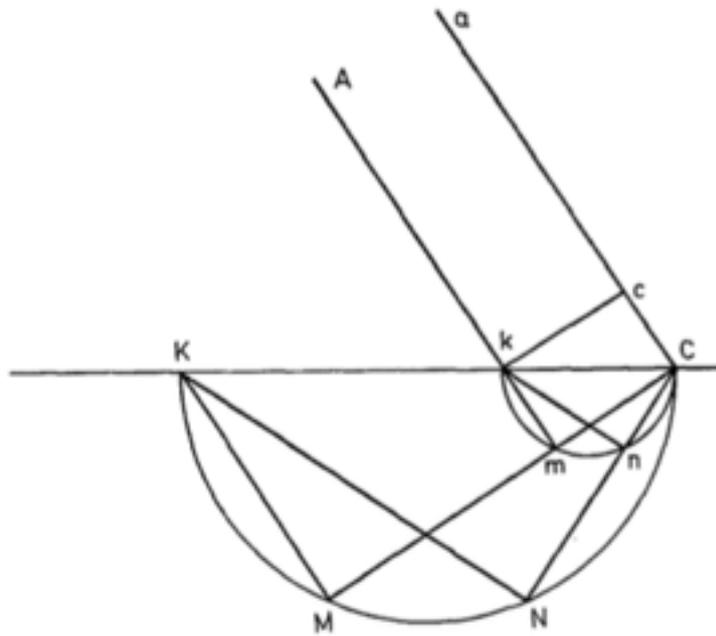


Fig. 3 Fusión de las imágenes a) y b) de la Fig. 2. (Ilustración tomada de Shapiro, *Kinematic Optics*, p. 216).

Ahora, fusionando las imágenes a) y b) de la Fig. 2, podemos ver que las longitudes KM y KN (Fig. 3)³⁰ son proporcionales a las velocidades de las ondas en los dos medios, como puede verse comparando los triángulos KMC y KNC con los dos pequeños triángulos (kmc y knc) formados por la interfaz, entonces:

$$\frac{KM}{KN} = \frac{v_1}{v_2} \quad 2)$$

donde v_1 y v_2 son las velocidades de propagación en los medios respectivos.

Ahora Cn debe ser tangente a la onda refractada y por lo tanto perpendicular a su dirección de propagación ee. Así, ee es el rayo refractado para el rayo incidente cc. Y como el ángulo Kcm es igual al ángulo de incidencia i , y que el ángulo Kcn es igual al ángulo de refracción r , por lo tanto:

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{KM}{KN} = \frac{km}{kn} = \frac{v_1}{v_2} \quad 3)$$

Aunque, en principio, Pardies/Ango proporcionan una construcción para la refracción que no parece muy diferente a la de Hooke, ya que en ambos casos el frente de onda es perpendicular a la dirección de propagación, antes de golpear la superficie refractante; y al entrar a la superficie, el frente de onda procede ahora con la velocidad del cuerpo refractante, mientras que el frente de onda que aún no entra, viaja con la velocidad del medio de incidencia. Hay, sin embargo, dos aspectos distintos al tratamiento de Hooke: Primero, Ango muestra que el frente de onda sigue siendo perpendicular a la dirección de propagación, aún después de la refracción, y segundo, considera que la velocidad de la luz es mayor en medios menos densos. Y es justamente en estos dos puntos, donde la construcción de Ango concuerda perfectamente con la teoría de Huygens, la cual empieza a tomar forma al trabajar en su obra *Projet du Contenu de la Dioptrique*.

1.3 *Projet du Contenu de la Dioptrique*

Comentarios al margen, palabras sueltas y frases incompletas constituyen el conjunto de notas de lo que conformaría el *Projet*³¹, mencionado en la introducción de este capítulo, el texto en el que Huygens estaba trabajando en 1673, un bosquejo de lo que sería un tratado de ocho capítulos que incluiría los desarrollos de su trabajo enfocado a la dióptrica, las lentes y telescopios, un capítulo sobre la naturaleza de la luz y la discusión de un fenómeno óptico que había llamado poderosamente su atención: La refracción extraordinaria del Espato de Islandia. Es gracias a este esbozo que tenemos una indicación de los problemas que ocupaban la mente de Huygens en esas primeras etapas de la formación de su teoría ondulatoria.

³⁰ Shapiro sugiere «fusionar» las imágenes a) y b) de la Fig. 2, pues considera que esto permite que la confusa derivación de Ango sea «algo más cercano a las intenciones de Pardies» (Shapiro, *Kinematic Optics*, p. 216).

³¹ Huygens, *Oeuvres Complètes. Vol. XIII*, p. 738.

El *Projet* inicia con una pequeña lista de temas a tratar y continúa con un bosquejo de lo que serían los capítulos de este y el contenido de los mismos³². Según esto, el primer capítulo haría un recorrido histórico sobre la invención y los avances del telescopio, considerando los desarrollos matemáticos que se habían llevado a cabo para entender las lentes y los fenómenos que atañen, mientras que en los capítulos del cuatro al siete expondría su propia teoría relacionada con los telescopios, desarrollada años atrás; también discutiría las lentes esféricas; y el capítulo final estaría dedicado a explicar la estructura y el funcionamiento del ojo. Pero son los capítulos dos y tres los que contienen las ideas que aquí nos interesan, así que los analizaremos más a fondo.

El capítulo dos estaría destinado al estudio de la refracción, haría un repaso histórico acerca de esta, que actuaría como introducción, donde hablaría sobre la obra de Kepler, Snell y Descartes, para después explicar la ley de la refracción, la cual «es muy cierta por experiencia». Pero Huygens no quería limitarse a aceptar el principio, quería estudiar más profundamente las causas de la refracción, «para intentar dar también esa satisfacción a la curiosidad de la mente que ama saber la razón de cada cosa. Y tener al menos las causas posibles y probables en lugar de permanecer en una completa ignorancia»³³. Para lograr este objetivo, el texto prosigue con las siguientes notas al respecto:

«Cómo la refracción es explicada por Pardies. [Luz] comparada con sonido. ondas en aire. [ondas en aire] comparadas con aquellas en el agua. el peso es la causa de estas [ondas de agua] ya que la elasticidad es la causa de las otras. transparencia sin penetración [de los rayos]. un cuerpo [o medio] capaz de movimiento sucesivo [de luz]. propagación perpendicular de los círculos [descritos por las ondas en expansión]».³⁴

El plan de Huygens se cimentaba en la herencia de las ondas de Pardies, la refracción explicada por él, la analogía acústica y de las ondas circulares en el agua. El texto también añade una mención a Hooke, en una nota al margen³⁵, «vid. micrograph. Hookij», se lee, lo que indica que Huygens no había olvidado las explicaciones de Hooke al tiempo de planear el *Projet*.³⁶

En renglones subsecuentes, Huygens daba a entender su rechazo a la explicación de la ley de los senos de Descartes, dada en *La Dioptrique*:

«dificultades contra Descartes. de dónde vendría la aceleración. [É] [Descartes] toma la luz como un *conatus movendi* [o tendencia al movimiento], consecuencia de lo cual es difícil entender la refracción como él la explica, al menos en mi opinión. [...] [La] luz se propaga en círculos y no instantáneamente, al menos en los cuerpos aquí abajo. [E]n cuanto a las estrellas, no es fácil decir que no sería instantáneo».³⁷

Puntualmente, cuestionaba la dificultad que involucraba la explicación de Descartes sobre el incremento de la velocidad, que tiene lugar cuando la luz pasa de un medio menos denso a uno más denso³⁸. Además, objeta contra la aseveración de que la luz sea una

³² Ibid.

³³ Ibid. p. 741.

³⁴ Ibid., p. 742. Las frases entre corchetes son añadidos para dar coherencia al texto.

³⁵ Los editores de *Oeuvres Complètes* indican que en el margen de estas notas se puede leer: «vid. micrograph. Hookij».

³⁶ Dijksterhuis, *Lenses and Waves*, p. 110.

³⁷ Huygens, *Oeuvres Complètes. Vol. XIII*, p. 742.

³⁸ Sabra, *Theories of Light*, p. 201.

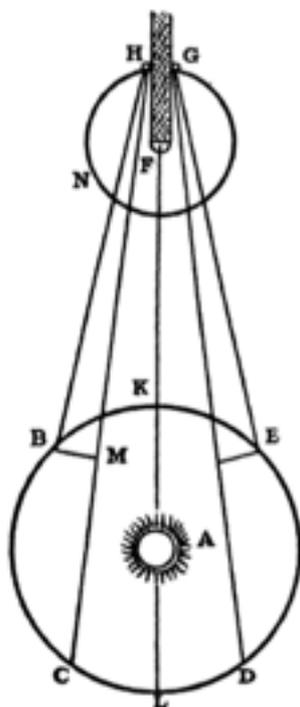


Fig. 4. El experimento de Roemer, explicado por Huygens: «Que A sea el Sol, BCDE la órbita anual de la Tierra, F, Júpiter, GN la órbita del más cercano de sus Satélites pues es éste el más apto para esta investigación que cualquiera de los otros tres, por la rapidez de su revolución. Que G sea este Satélite entrando en la Sombra de Júpiter, H el mismo Satélite emergiendo de la Sombra». Cuando la Tierra está en B, observa el eclipse a un tiempo t . Cuando la Tierra está en C (a mayor distancia de Júpiter) la aparición del satélite en H es percibida más tarde. Ocurre de manera similar cuando la tierra a llegado de E a D, «mientras se acerca a Júpiter, las inmersiones del Satélite deben ser observadas en E antes de lo que se habrían visto si la Tierra hubiera permanecido en D. Ahora bien, en cantidades de observaciones de estos Eclipses, realizadas durante diez años consecutivos, se ha encontrado que estas diferencias son muy considerables, tales como diez minutos y más; y de ellas se ha concluido que para atravesar todo el diámetro de la órbita anual KL, que es el doble de la distancia desde aquí hasta el sol, la Luz requiere aproximadamente 22 minutos de tiempo». (Ilustración tomada de Huygens, *Treatise on Light*, pp. 8-9).

tendencia al movimiento, respondiendo con su propia concepción al respecto: «la luz se propaga en círculos y no instantáneamente», en otras palabras, la luz consiste de ondas circulares que se propagan a velocidad finita. No se propaga de forma instantánea, como sostenía Descartes, al menos aquí en la Tierra, por lo que parece que Huygens adoptó la idea de que la luz tenía una velocidad finita tres años antes del experimento de Roemer (Fig. 4)³⁹, quien hizo «uso de los Eclipses que sufren los pequeños planetas que giran alrededor de Júpiter, y que a menudo entran en su sombra»⁴⁰ para determinar que la luz no se propagaba de manera instantánea.

En eso consistiría el capítulo dos, en el que la refracción sería explicada a través de una teoría ondulatoria cimentada en las ideas de Pardies y Hooke, muy lejos todavía de lo que sería finalmente su propia teoría. ¿Qué es lo que finalmente orillaría a Huygens a desarrollarla? Una «dificultad», como él mismo enunció en el tema referente al capítulo

³⁹ Roemer propuso la hipótesis de que la luz viaja a una velocidad finita en relación con las observaciones sobre los eclipses del primer satélite (el «más interno») de Júpiter (Io) que había estado realizando durante varios años con Cassini y otros miembros de la *Académie des Sciences* de París. Roemer observó que los periodos de revoluciones de este satélite alrededor de Júpiter mostraban ciertas desigualdades que se encontraron relacionadas con el movimiento orbital de la tierra: los eclipses del satélite se «retrasaban» cuando la Tierra estaba más lejos de Júpiter, y se «adelantaban» cuando la Tierra estaba en la posición contraria. Roemer atribuyó estas irregularidades al hecho de que la luz tenía que recorrer una distancia mayor en el primer caso que en el segundo y, sobre la base de esta hipótesis, calculó que la velocidad de la luz era tal que requería once minutos para recorrer una distancia igual al radio de la órbita terrestre. (M. Roemer, & I Bernard Cohen, *Roemer and the First Determination of the Velocity of Light*)

⁴⁰ Huygens, *Treatise on Light*, p. 8

tres, con apenas unas cuantas palabras más: «dificultades del cristal de Islandia. su descripción. forma. propiedades».⁴¹

El Espato de Islandia era una rareza encontrada en tierras nórdicas que exhibía propiedades fascinantes. Se trataba de «un tipo de Cristal o piedra transparente, notable por su figura y otras cualidades, pero sobre todo por sus refracciones extraordinarias»⁴² Un paralelepípedo oblicuo, con cada una de las caras formando un paralelogramo, con el que bastaba observar un objeto a través de dos caras opuestas para descubrir estas «refracciones extraordinarias»: el objeto aparecía doble. La primera explicación acerca de este fenómeno la dio Erasmus Bartholinus en 1669, que lo atribuyó al hecho de que cuando el rayo incidía sobre el cristal, este se dividía en dos rayos refractados. Uno de estos (llamado rayo ordinario) seguía las reglas usuales de la refracción, mientras que el otro (llamado rayo extraordinario) no lo hacía, es decir, un rayo que caía perpendicularmente en una de las caras del paralelogramo se dividía en el punto de incidencia en dos: uno que continuaba en la dirección normal, como era de esperarse, mientras que el otro hacía un ángulo con el primero.⁴³

Para Huygens, esta inusual propiedad del Espato de Islandia amenazaba todo su proyecto, pues no tenía una explicación plausible al respecto. «Me he visto en la necesidad de hacer esta investigación», escribiría posteriormente en el *Tratado de la Luz*, «porque las refracciones de este cristal parecían invalidar nuestras explicaciones previas de la refracción ordinaria»⁴⁴. Y es que si su explicación de la refracción fuera aceptable, no tendría por qué contradecirse por un caso particular de refracción, por exótica que fuera, debía ser consistente, como cualquier otra teoría matemática. Así que antes de publicar el *Projet*, Huygens tomó el problema de la refracción extraordinaria y se propuso resolverlo.

Para esto, Huygens realizó un primer intento de entender la refracción extraordinaria⁴⁵, el cual ha quedado registrado en textos que corresponden a los años 1672 y 1673⁴⁶: En esas páginas, Huygens realizó algunos esquemas caracterizando el fenómeno, usando rayos de luz, después prosiguió a dar las principales características del cristal⁴⁷ y, posteriormente, realizó cálculos sobre el índice de refracción del cristal⁴⁸ y una primera caracterización de los rayos, proponiendo que «el movimiento del rayo refractado dentro del cristal se compone del movimiento que tendría regularmente, y de un movimiento lateral que es igual en todo el descenso a través del cristal [...]».⁴⁹

Además, dentro de las observaciones de aquella época, hay una más que llama la atención. Huygens dirigió un rayo AB a través de dos piezas de cristal GKVH y LNM, alineadas paralelamente (Fig. 5). El rayo extraordinario BC continúa sin refractarse,

⁴¹ Huygens, *Oeuvres Complètes*. Vol. XIII, p. 739.

⁴² Huygens, *Treatise on Light*, p. 52.

⁴³ Sabra, *Theories of Light*, pp. 222-223.

⁴⁴ Huygens, *Treatise on Light*, p. 52.

⁴⁵ Dijksterhuis, *Lenses and Waves*, p. 52.

⁴⁶ Según los editores de *Oeuvres Complètes* esta pieza está tomada de Manuscrito D, p. 348-358. Y debe datar de 1672, o quizás de 1673, ya que la p. 359 está fechada en diciembre de 1672 y la p. 339 el 10 de junio de 1673. (Huygens, *Oeuvres Complètes*. Vol. XIX, p. 407).

⁴⁷ *Ibid.*, p. 142.

⁴⁸ *Refractio Chrystalli Islandicae proximè quae 5 ad 3.* (Cristal de Islandia refracción de aproximadamente 5 a 3) (Huygens, *Oeuvres Complètes*. Vol. XIX, p. 408).

⁴⁹ Huygens, *Oeuvres Complètes*. Vol. XIX, p. 412.

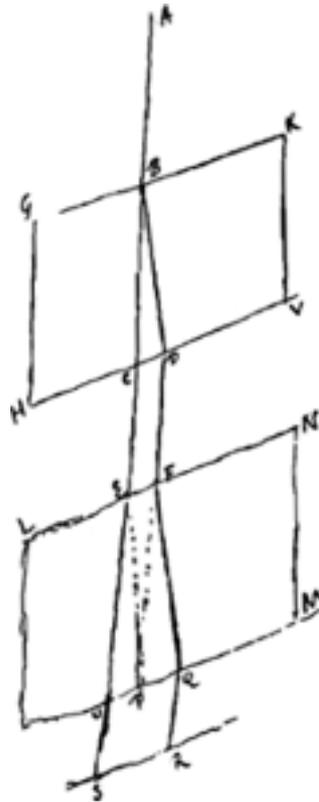


Fig. 5. Un rayo AB pasa a través de dos piezas de cristal GKVH y LNM, alineadas paralelamente. El rayo extraordinario BC continúa sin refractarse, mientras que el rayo BD se refracta ordinariamente. Al salir del cristal los rayos CE y DF se vuelven paralelos, como era esperado. Sin embargo, cuando entraron en el segundo cristal: el rayo CE no se dividió en EO y EP; ni el rayo DF en FP y FQ, como era de esperarse. En cambio, el CE continuó (sin refractarse) a lo largo de EO y OS, y el DF fue refractado (normalmente) a FQ y QR. Cuando, por otro lado, AB no era paralelo al borde del cristal, o cuando ambas piezas no estaban paralelas entre sí, los rayos se separaban por la segunda pieza. Huygens había observado entonces el efecto de polarización de la luz. (Ilustración tomada de Huygens, *Oeuvres Complètes*. Vol. XIX., p. 413).

mientras que el rayo BD se refracta ordinariamente. Al salir del cristal los rayos CE y DF se vuelven paralelos, como era esperado. Sin embargo, algo curioso sucedió cuando entraron en el segundo cristal: el rayo CE no se dividió en EO y EP; ni el rayo DF en FP y FQ, como era de esperarse. En cambio, el CE continuó (sin refractarse) a lo largo de EO y OS, y el DF fue refractado (normalmente) a FQ y QR. Cuando, por otro lado, AB no era paralelo al borde del cristal, o cuando ambas piezas no estaban paralelas entre sí, los rayos se separaban por la segunda pieza. Así, Huygens fue, con toda probabilidad, «el primero en documentar el fenómeno de la polarización de la luz».⁵⁰ Y lo dejó perplejo, intentando entonces hacer sentido al respecto, utilizando movimientos ondulatorios, escribió:

«He imaginado que en el cristal hay dos materias distintas, y que también hay dos diferentes en el aire o en el éter donde ocurre el movimiento que llamamos luz. Y que los dos movimientos de ondulación de estos dos materias del éter tienen [el] poder para mover cada uno su materia análoga en las dos que componen el cristal, y recíprocamente, que estas diferentes materias del cristal que se agitan, podrían imprimir este movimiento de luz sobre su material análogo en el éter».⁵¹

Fue este fenómeno el que le mostró a Huygens que el problema de la refracción extraordinaria no estaba realmente cerca de su solución.

⁵⁰ Dijksterhuis, *Lenses and Waves*, p. 150.

⁵¹ Huygens, *Oeuvres Complètes*. Vol. XIX, pp. 413-414.

La pregunta que Huygens había planteado en el *Projet*, la «dificultad» de la refracción extraordinaria, en su interés de justificar las leyes establecidas, le llevó a tratar de resolver el problema de forma tradicional: usando rayos de luz. Pero el problema no era tradicional, requería dar un paso más. En el próximo apartado veremos cómo Huygens dio ese paso restante, el de analizar la refracción extraordinaria en el nivel de las ondas de luz.⁵²

1.4 La Solución a las Dificultades del Espato de Islandia.

Descripción. Forma. Propiedades. Tres palabras son las que enmarcaban la intención de Huygens de hablar sobre el Espato de Islandia en el *Projet*, lo que quiere decir que si Huygens hubiera escrito el capítulo tres del mismo en 1673 se hubiera limitado a la descripción del cristal y del fenómeno de la doble refracción pues, como hemos visto, no había logrado resolver el problema. Y no sería hasta 1677, cuando Huygens lograría encontrar una explicación para este fenómeno.

La solución se encuentra justo después de una investigación sobre cáusticas, publicada en *Oeuvres Complètes*, en la sección *La Lumière*^{53, 54} Un pequeño boceto (Fig. 6) nos anticipa la aparición del principio de propagación de onda. En la imagen, todos los puntos de una onda son centros de una multitud de ondas que se extienden en todas direcciones; tangente a esas ondas está la onda propagada. Sin embargo, cabe resaltar que solo en el *Tratado de la Luz*, Huygens elaboró su principio de propagación de ondas y su aplicación al comportamiento de los rayos.



Fig. 6 Boceto que anticipa el Principio de Propagación de Ondas o Principio de Huygens, donde se observa la aparición de ondas secundarias. (Ilustración tomada de Huygens, *Oeuvres Complètes*. Vol. XIX. p. 420).

⁵² Dijksterhuis, *Lenses and Waves*, p. 158.

⁵³ Huygens, *Oeuvres Complètes*. Vol. XIX, p. 424.

⁵⁴ Dijksterhuis revisó la libreta donde Huygens realizó sus notas, donde el estudio de las cáusticas y la solución de la refracción extraordinaria tienen lugar en 11 páginas de una libreta que, en punto de vista de dicho autor forman un todo continuo. Sin embargo, dice, los editores de *Oeuvres Complètes* mezclaron material de diferentes páginas, insertando material que data de años posteriores, lo que perturba la cronología de la línea de pensamiento de Huygens. Dijksterhuis añade en la reconstrucción que él ofrece en *Lenses and Waves*, notas sobre esquemas que no aparecen en *Oeuvres Complètes*, por lo que la suya es una reconstrucción bastante completa de los acontecimientos que llevaron a la solución de la refracción extraordinaria, aquí nos limitaremos a ir hasta el momento final de su solución.

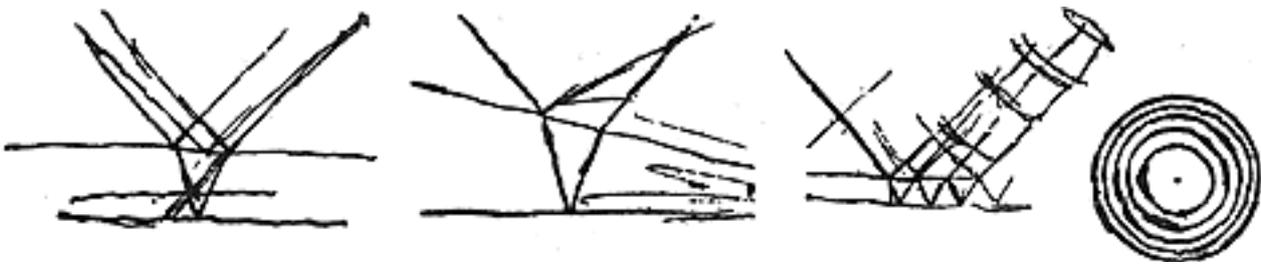


Fig. 7 Esquema de la superficie de las ondas en el caso de películas delgadas, así como los «anillos de Newton» que Huygens ya había observado antes que él (en 1665). (Ilustración tomada de Huygens, *Oeuvres Complètes*. Vol. XIX. p. 420).

Hay además otro conjunto de figuras que es pertinente mencionar ya que los editores de *Oeuvres Complètes* explican de la siguiente forma: «la superficie de las ondas, así como los “anillos de Newton” que Huygens ya había observado antes que él (en 1665)» (Fig. 7). Aunque Huygens nunca intentaría explicar este fenómeno de manera explícita.

Páginas después, siguiendo cálculos y esquemas que contienen elipses, rayos y ondas, anticipando los resultados de Huygens, encontramos una gloriosa *Eureka*:



Fig. 8. Eureka: Causa de la Refracción en el Espato de Islandia. En la esquina superior derecha se lee el eureka y una explicación sobre la figura central, donde establece que la luz forma una esfera en el aire, formando un esferoide dentro del cristal, mientras que los esquemas de bolas redondas y elípticas que se apilan unas sobre otras intentan explicar la composición del cristal. (Ilustración tomada de Huygens, *Oeuvres Complètes*. Vol. XIX. p. 427).

«Eureka. 6 de agosto 1677. La causa de la refracción extraordinaria en el cristal de Islandia»⁵⁵

Bocetos, notas y cálculos rodean una figura central (Fig. 8): una elipse oblicua dotada de abundantes trazos, círculos y párrafos explicativos cuyo orden, según el orden propuesto por los editores de *Oeuvres Complètes*, iniciaría con la figura central. El eureka, que se encuentra en la esquina superior derecha sería escrito a continuación, seguido de una descripción y explicación de la elipse, donde establece que la luz forma una esfera en el aire, formando un esferoide dentro del cristal⁵⁶ que, aunque Huygens no lo explica en detalle, la elipse implica una onda de luz, donde la onda es oblicua a su dirección de propagación.⁵⁷

Por lo tanto, aunque el eureka no anunció el descubrimiento de las ondas esféricas, que eventualmente usaría para explicar la refracción extraordinaria en el *Tratado de la Luz*, en ese momento declaró que la forma de un rayo extraordinario podía ser construido por medio de una elipse. Por lo pronto, Huygens no elaboró en detalle cómo esta construcción se ajustaba a sus ideas de propagación de ondas de luz, se limitó a reflexionar sobre la composición del cristal, con esquemas de bolas redondas y elípticas que se apilan unas sobre otras.

Huygens presentaría estas ideas en el verano de 1679 en la *Académie des Sciences* de París. Pero tendrían que pasar doce años más, antes de que Huygens publicara su teoría ondulatoria.

1.5 Creación y publicación del *Tratado de la Luz*.

«Uno puede preguntarse por qué me he demorado tanto tiempo en sacar a la luz este trabajo», escribió Huygens doce años después de la presentación del tratado en la *Académie*, en el prefacio del *Tratado de la Luz*, mencionando tres razones para justificar el retraso del mismo:

«La razón es que lo escribí con bastante descuido en el idioma en el que aparece, con la intención de traducirlo al latín, haciéndolo así para obtener una mayor atención a este. Después me propuse entregarlo junto con otro Tratado de Dióptrica, en el que explico los efectos de los telescopios y aquellas cosas que pertenecen a esa ciencia. Pero el placer de la novedad ha pasado, he aplazado de vez en cuando la ejecución de este proyecto, y no sé cuándo le daré fin, a menudo desviado por diferentes empresas o por algún nuevo estudio»⁵⁸.

La primera alusión es la indecisión relativa al lenguaje con el que quería escribir su tratado, originalmente escrito en francés (que fue como finalmente se publicó), en *Lenses and Waves*, Dijksterhuis sugiere que quizá Huygens no estaba seguro del estado de su teoría ondulatoria, ¿seguía siendo un tema matemático o había entrado a una nueva disciplina? En 1666 Huygens comenzó a escribir cada vez más en francés, con la excepción de sus trabajos en matemáticas. El uso de la lengua por parte de Huygens se corresponde con lo que parece ser un patrón general de la época, ya que a mediados del

⁵⁵ Huygens, *Oeuvres Complètes*. Vol. XIX, p. 428.

⁵⁶ *Ibíd.*, p. 427 «En el momento en que la luz forma una esfera de radio μL en el aire, forma un esferoide, congruente con PCH, dentro del cristal».

⁵⁷ Dijksterhuis, *Lenses and Waves*, pp. 169-170.

⁵⁸ Huygens, *Treatise on Light*, p. vi.

siglo XVII, la lengua vernácula había comenzado a reemplazar al latín en los escritos académicos, especialmente en Francia e Inglaterra, cuya excepción fueron los textos matemáticos, que siguieron escribiéndose en latín hasta bien entrado el siglo XIX.⁵⁹ Así, el idioma de usado en la *Académie* para los temas de física y otros era el francés.

La segunda razón alude al hecho de que estaba trabajando en un tratado sobre la dióptrica, donde la teoría de la luz era parte integral de esta, pero que entre 1672 y 1690 fueron alejándose gradualmente, su naturaleza era ahora completamente diferente, dado el carácter innovador de su teoría ondulatoria, dejando atrás la óptica geométrica utilizada para explicar las lentes y los telescopios. Conjugándose esto con la tercera y última razón para el retraso: por ser incapaz de dar fin a ese proyecto, desviado por «diferentes empresas o por algún nuevo estudio» y es que durante los años que separan la creación y la publicación de la teoría ondulatoria Huygens había enfermado (1681), su padre había muerto (1687), había heredado propiedades, títulos y las responsabilidades que acarreaban.⁶⁰ Además de otras distracciones.⁶¹

Finalmente a principios de 1690, el *Tratado de la Luz* fue publicado⁶², con el título completo de: *Traité de la Lumière, Où Sont Expliquées Les Causes de Ce Qui Luy Arrive Dans La Reflexion, Et Dans La Refraction: Et Particulièrement Dans l'Etrange Refraction Du Cristal d'Islande (Tratado de la Luz. En el cual son explicadas las causas de lo que ocurre en la Reflexión, y la Refracción. Y particularmente en la Refracción extraordinaria del Espato de Islandia)*. En la portada (Fig. 9), aparecía el título del trabajo, acompañado de las iniciales de su autor «C. H. D. Z»., Christiaan Huygens de Zeelhem.

⁵⁹ Dijksterhuis, *Lenses and Waves*, nota 61, p. 224.

⁶⁰ Hofwijck, la casa en Voorburg, y el título de «Lord of Zeelhem».

⁶¹ Entre otras cosas, en 1678 Hartsoeker y Leeuwenhoek habían despertado su interés por los microscopios y la observación microscópica. Él mismo diseñó varios microscopios simples al estilo de Leeuwenhoek e hizo algunas mejoras y adiciones técnicas. En 1680, publicó un diseño para un nivel mejorado de telescopio. Al mismo tiempo, estudió las propiedades y la naturaleza del magnetismo. De vuelta a Holanda, Huygens diseñó su planetario y continuó trabajando en su reloj de péndulo y su aplicación en el mar, reanudó su trabajo práctico con lentes y telescopios.

⁶² En conjunto con los *Discours de la Cause de la Pesanteur*, que contenía su explicación de la gravedad. (Dijksterhuis, *Lenses and Waves*, p. 224).

TRAITE
DE LA LVMIERE.

Où font expliquées

Les causes de ce qui luy arrive

Dans la REFLEXION, & dans la
REFRACTION.

Et particulièrement

Dans l'etrange REFRACTION

DV CRISTAL D'ISLANDE,

Par C. H. D. Z.

Avec un Discours de la Cause

DE LA PESANTEVR.



A L E I D E,

Chez PIERRE VANDER AA, Marchand Libraire.
M D C X C.

Fig. 9. La primera página del *Tratado de la Luz* (1690), donde las palabras «DE LA LVMIERE», «Dans la REFLEXION, & dans la», «DV CRISTAL D'ISLANDE», «DE LA PESENTEVR», y «Chez PIERRE VANDER AA, Marchand Libraire» están impresas en rojo. (Ilustración tomada de Cohen, *The Case of the Missing Author*, p. 31, de la copia de Grace K. Babson, colección de Newtoniana en la Burndy Library, Massachusetts Institute of Technology).

CAPÍTULO 2. TRATADO DE LA LUZ.

Introducción

En el prefacio del *Tratado de la Luz*, como hemos visto, Huygens inició justificando la tardanza en la publicación de su obra, dando algunos agradecimientos y, posteriormente, prosiguió asentando el método que utilizó para llegar a sus conclusiones:

«Se verán en este [trabajo] demostraciones de esos tipos que no producen una certeza tan grande como las de la Geometría, y que incluso difieren mucho de esta, ya que mientras que los Geómetras prueban sus Propuestas por Principios fijos e indiscutibles, aquí los Principios son verificados por las conclusiones que se extraen de ellos; la naturaleza de estas cosas no permite que esto se haga de otra manera».⁶³

En contraste con la metodología de la óptica geométrica tradicional, en las que propiedades de la luz son deducidas de principios establecidos como la ley de reflexión y refracción, la meta del *Tratado de la Luz* es deducir los principios mismos a través de ciertas premisas. En particular, veremos que su objetivo era dar una explicación físico-matemática de las propiedades clásicas de la luz. Huygens continuó:

«Siempre es posible alcanzar así un grado de probabilidad que muy a menudo es apenas una prueba completa. Es decir, cuando las cosas que han sido demostradas por los Principios que han sido asumidos corresponden perfectamente a los fenómenos que la experiencia ha puesto bajo observación; especialmente cuando hay un gran número de ellos, y más aún, principalmente, cuando uno puede imaginar y prever nuevos fenómenos que deberían seguir de las hipótesis que uno emplea, y cuando uno se da cuenta de que en ella el hecho corresponde a nuestra previsión».⁶⁴

La descripción de Huygens sobre su «método» nos muestra la perspicaz formulación y posterior aplicación del método hipotético-deductivo. Con esto, Huygens ha abandonado la certidumbre en las explicaciones científicas en favor de un *alto grado de probabilidad*, explicando cómo se pueden demostrar válidamente las causas a partir de sus efectos, o las hipótesis a partir de sus consecuencias.⁶⁵

Asentando así su método, se muestra optimista a creer que «aquellos que aman conocer las Causas de las cosas y que son capaces de admirar las maravillas de la Luz, encontrarán alguna satisfacción en estas diversas especulaciones al respecto»⁶⁶, dando así cierre al prefacio.

En este capítulo, se presentará un resumen del *Tratado de la Luz* en el que, en poco más de ciento veinte páginas, Huygens expone su teoría ondulatoria, dedicando un espacio a cuatro fenómenos principalmente: la propagación rectilínea de la luz, la reflexión, la refracción y la doble refracción del Espato de Islandia, utilizando el principio de propagación de onda, finalmente desarrollado en su totalidad.

⁶³ Huygens, *Treatise on Light*, p. vi.

⁶⁴ *Ibíd.*, p. vii.

⁶⁵ Shapiro, A. E. *Huygens' 'Traite De La Lumière' and Newton's 'Opticks': Pursuing and Eschewing Hypotheses*, p. 224-225.

⁶⁶ Huygens, *Treatise on Light*, p. vii.

2.1 Propagación de las Ondas de Luz.

«Es inconcebible dudar de que la luz consista en el movimiento de algún tipo de materia. [...]»⁶⁷, explica Huygens, estableciendo desde el principio lo que él cree es la naturaleza de la luz, aclarando que, la luz consiste en un movimiento en sí, no en un «transporte de materia»⁶⁸, el cual, comparando la propagación de la luz con la del sonido, se realizaría en forma de «superficies esféricas y ondas», análogas a las ondas que se forman en el agua por una perturbación en su superficie.⁶⁹ Su argumento continúa, estableciendo una característica determinante de estas ondas: su velocidad de propagación finita y constante. Huygens reproduce entonces la «ingeniosa demostración de Mr. Roemer».⁷⁰ A través de la cual deduce que la luz es 600 mil veces mayor que la del sonido (que Huygens estima en 180 toises/s⁷¹), es decir poco más de 210,000 km/s.

Con esto, Huygens puede continuar su explicación del movimiento de la luz: «Ahora el movimiento sucesivo de la luz que se conforma de esta manera, permite, como he dicho, que se propague por ondas esféricas, como el movimiento del sonido», haciendo énfasis en que, aunque son similares en este sentido «difieren en muchas otras cosas»: su generación, su medio y modo de propagación.

Mientras que el sonido es producido por la perturbación que es generada por el movimiento de la fuente en su totalidad, la luz se origina «a partir de cada punto del objeto luminoso»⁷². En cuanto al medio, el sonido se propaga a través del aire, a través de partículas que no están en contacto, excepto durante una colisión, por su parte, la luz se propaga en un éter omnipresente que accede libremente en toda la materia, que consiste de partículas en contacto.⁷³ La luz, de acuerdo con Huygens, se origina de la agitación de partículas en objetos luminosos que colisionan con las partículas del éter circulante. Estas colisiones son comunicadas en todas direcciones a través del éter, con una velocidad uniforme.⁷⁴

⁶⁷ *Ibíd.*, p 3.

⁶⁸ *Ibíd.*

⁶⁹ *Ibíd.*, p. 4.

⁷⁰ *Ibíd.*, p. 7.

⁷¹ El toise era una medida de longitud que equivalía a 1,949 m. (Boyer, *Early Estimates of the Velocity of Light*, p. 31).

⁷² *Ibíd.*, p.12.

⁷³ *Ibíd.*, p. 10.

⁷⁴ Para justificar esto, Huygens considera un número similar de esferas, hechas de una sustancia dura, colocadas en línea recta, rozándose entre ellas, «uno encuentra, al golpear con una esfera similar contra la primera de estas esferas, que el movimiento pasa como en un instante a la última de ellas, que se separa de la fila, sin que uno sea capaz de percibir que el otro se ha movido. [...] Desde donde es posible ver que el movimiento pasa con una velocidad extrema que es mayor cuanto mayor es la dureza de la sustancia de las esferas».

Con este ejemplo Huygens asienta dos cosas: que la velocidad de propagación claramente no es instantánea, sino sucesiva, «porque si el movimiento [...] no pasara sucesivamente por todas estas esferas, todas adquirirían el movimiento al mismo tiempo, y por lo tanto todas avanzarían juntas; lo cual no sucede»; y que la velocidad depende solamente del grado de elasticidad de las partículas y es independiente de la fuerza del impacto, es decir, la luz viaja a una velocidad uniforme. Aplicando esto al movimiento que produce la luz, Huygens indica que no hay impedimento alguno en estimar que «estas partículas del éter son de una sustancia que se acerca tanto a la dureza perfecta y posee una elasticidad tan rápida como se desee». (*Ibíd.* p. 15).

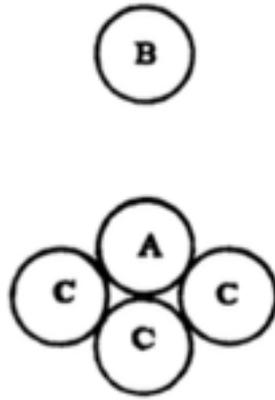


Fig. 10 Disposición del éter. (Ilustración tomada de Huygens, *Treatise on Light*, p. 15).

El éter de Huygens está formado por pequeñas partículas elásticas, que no necesariamente deben ser esféricas, pero sí del mismo tamaño.⁷⁵

Estas partículas de éter no tienen un arreglo en líneas rectas, sino más bien confuso, donde varias las esferas se tocan unas a otras (Fig. 10) y, sin embargo, esto no les impide el ir «transmitiendo su movimiento y de difundirlo siempre hacia adelante».

2.1.1 Principio de Huygens

Hasta este punto, Huygens ha elaborado una discusión sobre cómo se puede pensar que la luz consiste en ondas esféricas que se propagan a una velocidad finita y constante, ahora toca considerar «más particularmente el origen de estas ondas, y la forma en que se propagan»⁷⁶:



Fig. 11. Huygens explica la forma en que se propagan las ondas circulares que se generan desde los puntos A, B, C. (Ilustración tomada de Huygens, *Treatise on Light*, p. 17)

«[...]se deduce de lo que se ha dicho sobre la producción de Luz, que cada pequeña región de un cuerpo luminoso, como el Sol, una vela, o un carbón encendido, genera sus propias ondas de las cuales esa región es el centro. Así, en la llama de una vela (Fig. 11),

⁷⁵ Y es que, «[...] al suponer la elasticidad en la materia etérea, sus partículas tendrán la propiedad de una restitución igualmente rápida, ya sea que sean empujadas fuerte o débilmente; y así la propagación de la Luz siempre continuará con una velocidad igual». (Ibíd.).

⁷⁶ Ibíd., p. 18.

después de haber distinguido los puntos A, B, C, los círculos concéntricos escritos sobre cada uno de estos puntos representan las ondas que vienen de ellos. Y uno debe imaginar lo mismo sobre cada punto de la superficie y de la parte dentro de la llama».

Así, cada punto de una fuente luminosa produce ondas esféricas (Fig. 12), que conforme se van alejando de su origen, aunque su velocidad se mantiene, van perdiendo fuerza, de tal forma que eventualmente serán imperceptibles a la vista. Donde la luz puede ser perceptible a largas distancias porque innumerables ondas «se unen de tal manera que para los sentidos constituyen una sola onda, que por consiguiente debe tener la fuerza suficiente para hacerse sentir».⁷⁷

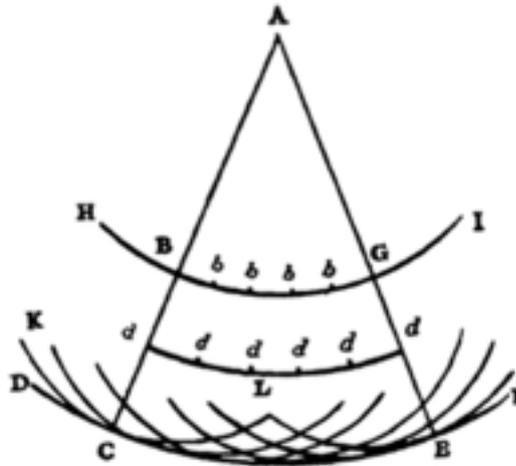


Fig. 12. El Principio de Huygens o Principio de propagación de ondas, en el que el frente de onda DCF emana desde el punto A, formado a través de frentes de ondas secundarios KCL, que emanan desde los puntos B, b, b... (Ilustración tomada de Huygens, *Treatise on Light*, p. 19).

Es entonces cuando Huygens introduce la idea de la aparición de ondas secundarias: Cada partícula afectada por un frente onda se transforma a su vez en el origen de un nuevo frente de onda:

«[...] 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».⁷⁸

Esto puede expresarse brevemente de la siguiente manera: en cualquier superficie de la onda, cada punto puede ser considerado como el centro de una onda particular o secundaria que viaja con la misma velocidad que la onda principal inicial. Huygens continúa explicando:

«Así, si el DCF es una onda que emana del punto luminoso A, que es su centro, la partícula B, una de las comprendidas dentro de la esfera DCF es una onda que emana del punto luminoso A, que es su centro, la partícula B, una de las comprendidas dentro de la

⁷⁷ *Ibíd.*

⁷⁸ *Ibíd.*, p. 19

esfera DCF habrá hecho su onda particular o parcial KCL, la cual tocará a la onda DCF en C en el mismo momento en que la onda principal que emana del punto A ha llegado al DCF; y está claro que solo la región C de la onda KCL tocará la onda DCF, es decir, la que está en la línea recta trazada a través de AB. De manera similar, las otras partículas de la esfera DCF, tales como bb, dd, etc., harán cada una su propia onda. Pero cada una de estas ondas puede ser infinitamente débil solo en comparación con la onda DCF, a cuya composición contribuyen todas las demás por la parte de su superficie que está más distante del centro A».⁷⁹

Estas observaciones contienen la contribución fundamental de Huygens a la teoría ondulatoria de la luz: el Principio de Huygens, como lo conocemos actualmente, una representación matemática de la naturaleza mecánica de la propagación de las ondas; un intermediario entre la naturaleza de la luz y las leyes de la óptica, ya que fue alrededor de este principio, que Huygens logró explicar la refracción ordinaria y extraordinaria.

Y en ningún caso menciona atributos característicos de modelos ondulatorios posteriores, como la longitud de onda, la fase o la interferencia. Huygens incluso llega a precisar que los frentes no se generan periódicamente: «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».⁸⁰

2.1.2 Propagación Rectilínea de la Luz.

Inmediatamente después de asentar su principio de propagación de onda, Huygens explica la propagación rectilínea de los rayos de luz. Para explicar la propagación rectilínea, Huygens argumentó que una onda se propaga de tal manera que, desde BG hasta CE (Fig. 12), siempre se encuentra entre las mismas líneas rectas (ABC y AGE) dibujadas desde los puntos luminosos:

«Porque aunque las ondas particulares producidas por las partículas comprendidas en el espacio CAE se extienden también fuera de este espacio, no concurren en el mismo instante a componer una onda que termine el movimiento, como lo hacen precisamente en la circunferencia CE, que es su tangente común».⁸¹

De ello se deduce que si consideramos que BG es una apertura entre los cuerpos opacos HB, GI, entonces la onda de luz que sale del punto A siempre será terminada por las líneas rectas AC, AE, pues las ondas secundarias fuera de la región CAE son «demasiado débiles para producir luz allí»⁸². Debido a que esto se aplica a cualquier porción de la onda principal, la apertura BG puede hacerse arbitrariamente pequeña, «de modo que parece que cada pequeña porción de la onda necesariamente avanza siguiendo la línea recta que viene del punto luminoso. Así podemos tomar los rayos de luz como si fueran líneas rectas»⁸³

⁷⁹ *Ibíd.*

⁸⁰ *Ibíd.*, p. 16.

⁸¹ *Ibíd.*, pp. 20-21.

⁸² Sin embargo, Shapiro muestra que la afirmación de que las ondas secundarias concurren en el mismo instante solo en su tangente común y, por lo tanto, sean perceptibles solo allí y en ningún otro lugar son incorrectas. (Shapiro, *Kinematic Optics*, p. 225).

⁸³ Huygens, *Treatise on Light*, p. 21.

paralelas a AC. Por lo tanto, se verá que la onda recta AC se ha dividido sucesivamente en todas las partes OKL, y que se ha vuelto recta en NB».⁸⁷

Con esto, Huygens argumenta que los triángulos rectángulos ACB y BNA, con un lado común AB, y sabiendo que CB=AN, entonces «se deduce que los ángulos opuestos a estos lados serán iguales, y por lo tanto también los ángulos CBA, NAB»⁸⁸:

$$\angle CBA = \angle NAB \quad 4)$$

Donde CB, perpendicular a CA, es la dirección del rayo incidente, y AN, perpendicular a BN, es la dirección del rayo reflejado. Por lo tanto:

$$\angle(i) = \angle(r) \quad 5)$$

2.3 Refracción

Huygens procedió entonces a explicar la refracción. Mientras que la reflexión es explicada gracias a la velocidad constante de la onda, antes y después del fenómeno, la refracción se explica ahora por el cambio de velocidad de las ondas que se propagan en un medio a otro.

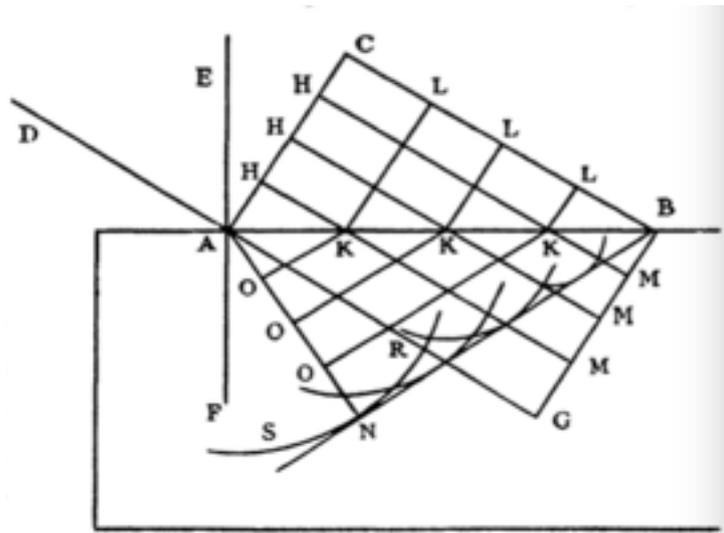


Fig. 14 Los puntos AHHHC alcanzan la superficie en puntos AKKKB sucesivamente, produciendo ondas que se extienden en todas direcciones a través del medio refractario alrededor de estos puntos. Cuando toda la onda ha alcanzado la superficie, cuando C llega a B, alrededor de A una onda se habrá propagado sobre la distancia AN. La tangente común BN de todas las ondas alrededor de los puntos de incidencia es la onda principal propagada. (Ilustración tomada de Huygens, Treatise on Light, p. 35).

Sea AC sea un frente de onda plano que llega de manera oblicua a la superficie de separación AB en A (Fig. 14). AC es perpendicular a la dirección de incidencia DA. Durante el tiempo que una onda que viaja por encima de la superficie refractante AB cubre la distancia:

⁸⁷ *Ibíd.*, p. 25.

⁸⁸ *Ibíd.*

$$v_i t = CB, \quad 6)$$

donde v_i , es la velocidad del medio arriba y t el tiempo necesario para que C llegue a B .

En el medio por debajo cubrirá una distancia menor

$$v_r t = AN, \quad 7)$$

donde v_r es la velocidad en este medio.

Siendo la proporción entre las velocidades, constante⁸⁹,

$$\frac{CB}{AN} = \frac{v_i}{v_r} = n \quad 8)$$

donde n es una constante.

Así, en el mismo tiempo que el extremo C se movería a lo largo de la onda CB , el extremo A se movería en el segundo medio a una distancia igual a $1/nCB$, es decir, en el punto A se produciría una segunda onda SNR , con un radio igual a $1/nCB$. Si se consideran los otros puntos H del frente de onda, vemos que en el mismo tiempo que el extremo C llega a B , habrán alcanzado la superficie AB y generado ondas secundarias en el segundo medio con centros K y radios iguales a $1/nLB$. Huygens explica:

«Ahora bien, todas estas circunferencias tienen como tangente común la recta BN ; es decir, la misma línea que se dibuja como tangente desde el punto B hasta la circunferencia SNR que consideramos en primer lugar. Porque es fácil ver que todas las demás circunferencias tocarán el mismo BN , desde B hasta el punto de contacto N , que es el mismo punto en el que el AN cae perpendicularmente sobre el BN ».⁹⁰

Por lo tanto, según el principio de propagación de onda, BN representa el nuevo frente de onda. Además, podemos ver cómo la onda ha progresado a BN : El frente de onda AC , una línea recta, se convierte sucesivamente en los frentes de onda LKO , hasta que vuelve a ser una línea recta en BN .

Ahora, en la misma Fig. 14, EAF , que corta el plano AB en ángulo recto en el punto A , tenemos entonces que AD marca la dirección del rayo de luz incidente, pues es perpendicular a la onda AC ; mientras que AN , perpendicular a BN , marca la dirección del rayo refractado: «ya que los rayos no son más que las líneas rectas a lo largo de las cuales avanzan las porciones de las ondas».⁹¹

⁸⁹ Huygens indica que el movimiento en el medio de refracción se produce «menos rápidamente, por un tercio, digamos», es decir, es decir, $v_i:v_r= 3:2$ (Ibíd., p. 36), pero es válido para cualquier constante n , mayor o menor a la unidad. (Sabra, *Theories of Light*, p. 217).

⁹⁰ Huygens, *Treatise on Light*, p. 37.

⁹¹ Ibíd.

Considerando AB como el radio de un círculo:

$$\text{sen } \angle BAC = CB \quad 9)$$

$$\text{sen } \angle ABN = AN \quad 10)$$

Mientras que,

$$\angle BAC = \angle DAE \quad 11)$$

ya que cada uno de ellos añadido a CAE forma un ángulo recto.

También tenemos que

$$\angle ABN = \angle NAF \quad 12)$$

ya que cada uno de ellos con BAN forma un ángulo recto.

Entonces, por 9) y 11),

$$CB = \text{sen} \angle BAC = \text{sen } \angle DAE = \text{sen}(i) \quad 13)$$

Mientras que por 10) y 12),

$$AN = \text{sen} \angle ABN = \text{sen} \angle NAF = \text{sen}(r) \quad 14)$$

Pero, por 8), 13) y 14),

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{BC}{AN} = \frac{v_i}{v_r} = n \quad 15)$$

En la deducción de Huygens, cuando el ángulo de refracción es menor que el ángulo de incidencia correspondiente, la velocidad debe haber sido disminuida por la refracción. Y puesto que la luz al pasar a un medio denso es desviada hacia lo normal, se debe concluir que la velocidad de la luz es mayor en medios menos densos.

2.4 Espato de Islandia.

2.4.1 Doble refracción

En el quinto capítulo Huygens elabora su descubrimiento del 6 de agosto de 1677. Comienza con una descripción del Espato de Islandia y sus peculiares propiedades (Fig. 15.), explicando que cuando el rayo incidente IK es perpendicular a la cara ACBD,

pasando por una pequeña apertura en K, se separa en dos rayos, uno de ellos, KL, pasa recto a través del cristal sin refractarse, mientras que el otro es refractado en un rayo KM, donde el ángulo LKM es igual $6^{\circ}40'$. De las dos refracciones, una obedece a todas las leyes de la refracción ordinaria; los otros rayos no obedecen a la ley senos de la refracción, y su «índice de refracción» no es constante. Huygens escribe:

«Reconocí al principio por estos experimentos y por algunos otros que de las dos refracciones que el rayo sufre en este Cristal, hay una que sigue las reglas ordinarias; y es a esto a lo que pertenecen los rayos KL y OQ. Es por eso que he distinguido esta refracción ordinaria de la otra; y habiéndola medido por la observación exacta, encontré que su proporción, considerada en cuanto a los Senos de los ángulos que los rayos incidentes y refractados hacen con la perpendicular, era muy precisamente la de 5 a 3».⁹²

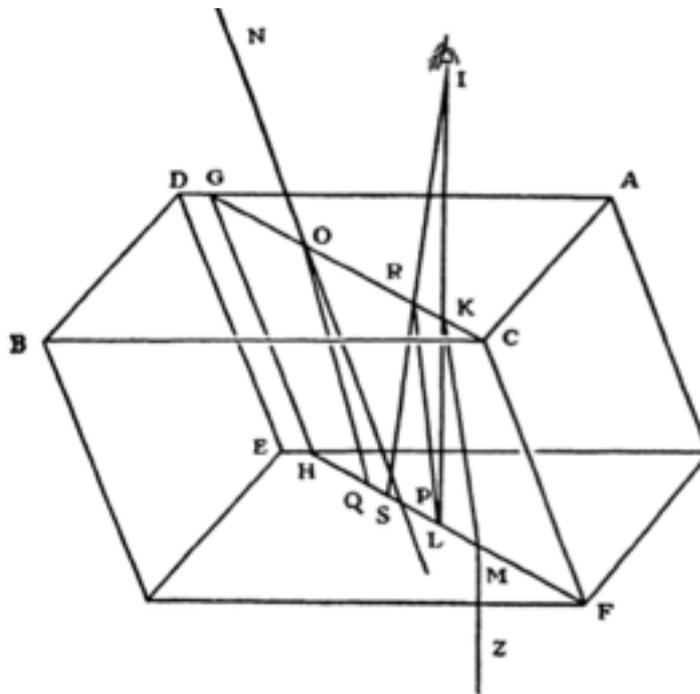


Fig. 15 Descripción gráfica de la refracción ordinaria y extraordinaria en el Espato de Islandia. (Ilustración tomada de Huygens, *Treatise on Light*, p. 55).

En este capítulo, Huygens no se limita a los cálculos matemáticos, aquí Huygens realiza observaciones, mediciones y experimentos, para comprobar y dar una explicación a las diferentes características del Espato de Islandia:

«Fue después de haber explicado la refracción de los cuerpos transparentes ordinarios por medio de las emanaciones esféricas de luz, como arriba, que retomé mi examen de la naturaleza de este Cristal, en el que previamente había sido incapaz de descubrir nada. Como había dos refracciones diferentes, concebí que también había dos emanaciones diferentes de ondas de luz [...]».⁹³

⁹² *Ibíd.*, p. 57

⁹³ *Ibíd.*, p. 61

En el caso de la luz que se refractaba de manera ordinaria la propagación ocurría de la manera usual planeada por Huygens, a través de ondas esféricas, mientras que para la refracción extraordinaria:

«[...] deseaba probar lo que las ondas elípticas, o más bien las ondas esferoidales, harían; y supuse que se extenderían indistintamente tanto en la materia etérea difundida a través del cristal como en las partículas de las que está compuesto [...]»⁹⁴

Para justificar el uso de ondas esferoidales, Huygens propuso la idea de que solo tenía que asumir que la velocidad de la luz difería en varias direcciones, por la disposición de las partículas del cristal:

«Me pareció que la disposición o disposición regular de estas partículas podría contribuir a formar ondas esferoidales (nada más se requiere para esto que el movimiento sucesivo de la luz se extienda un poco más rápidamente en una dirección que en la otra) [...]»⁹⁵.

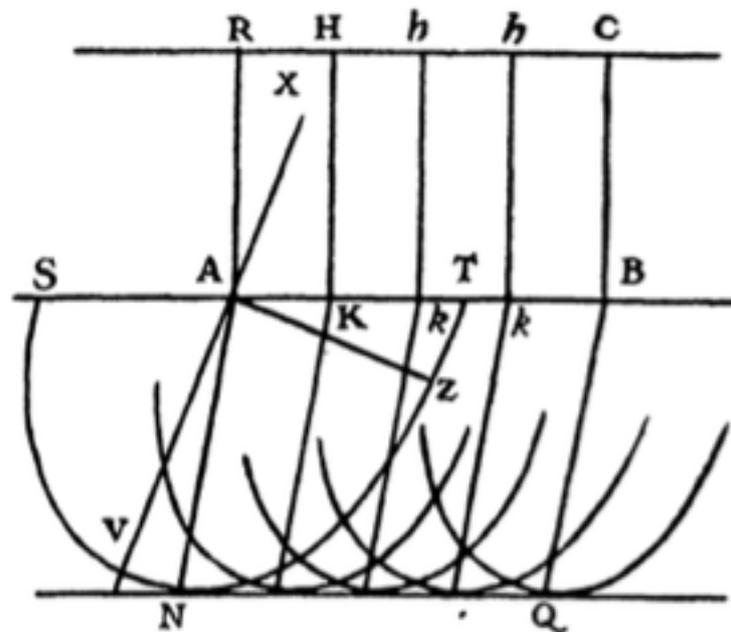


Fig. 16. Uso de ondas elipsoidales en el Principio de propagación de onda de un rayo perpendicular a la superficie. (Ilustración tomada de Huygens, *Treatise on Light*, p. 64).

Para ver si las ondas esferoidales podrían explicar la refracción irregular, Huygens consideró el caso de la refracción del rayo incidente perpendicularmente en la superficie del cristal (Fig. 16). La onda plana RHhhC incide perpendicularmente sobre la superficie del cristal que está cubierta excepto por la pequeña abertura AB, de modo que llegan a la superficie del cristal AKkkB al mismo tiempo; y luego se propagará en ondas esferoidales, que serán elipses cuando se consideren en el plano. Supongamos que las ondas esferoidales SVT se extienden alrededor de estos puntos, ya que la velocidad de propagación en la dirección AV es mayor que en la dirección AZ. Según el principio de Huygens, la tangente común NQ de estas ondas esferoidales es la onda refractada:

⁹⁴ *Ibid.*, p.62.

⁹⁵ *Ibid.*

«Y es así que he comprendido, lo que me parecía muy difícil, cómo un rayo perpendicular a una superficie podía sufrir refracción al entrar en el cuerpo transparente; viendo que la onda RC, habiendo llegado a la abertura AB, continuaba hacia adelante desde allí, extendiéndose entre los paralelos AN, BQ pero permaneciendo siempre paralela a AB, de tal manera que aquí la luz no se extiende a lo largo de líneas perpendiculares a sus ondas, como en la refracción ordinaria, sino que estas líneas cortan las ondas oblicuamente».⁹⁶

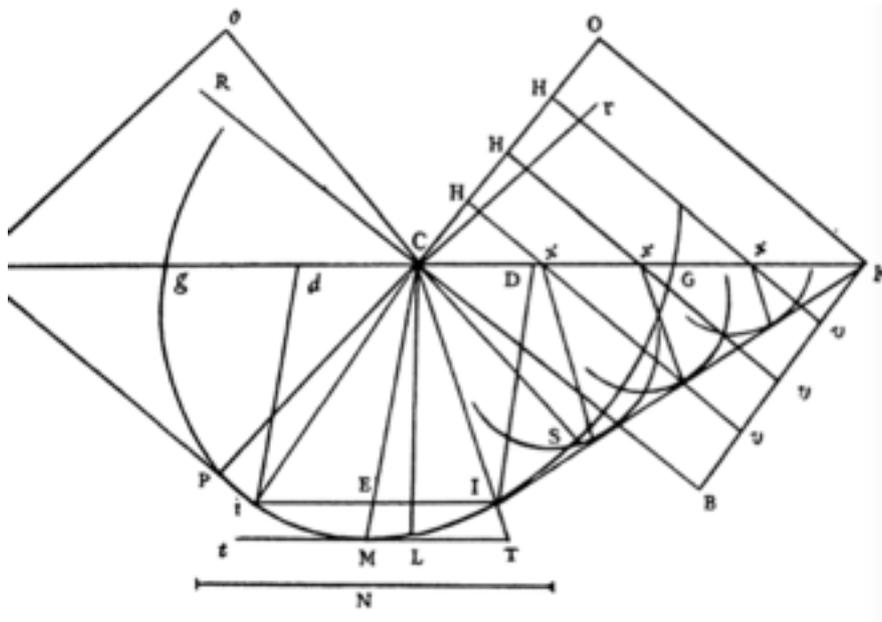


Fig. 17 Principio de Propagación de ondas elipsoidales para un rayo arbitrario. (Ilustración tomada de Huygens, *Treatise on Light*, p. 68).

Para poder explicar la refracción de un rayo arbitrario, Huygens recurre a una imagen familiar, que aparecía en sus notas de 1677 (Fig. 8), en el *Tratado de la Luz* (Fig. 17), escribe:

«Pasando ahora a la búsqueda de las refracciones que deben hacer los rayos oblicuamente incidentes, siguiendo la hipótesis de estas ondas esferoidales, vi que estas refracciones dependían de la proporción de la velocidad que hay entre el movimiento de la luz fuera del cristal en el éter y el movimiento dentro del mismo. Por ejemplo, suponiendo que esta proporción fuera tal que, mientras que la luz en el cristal hace el esferoide GSP, como acabo de decir, fuera hace una esfera de la cual el semi-diámetro es igual a la línea N [...]; entonces esta es la manera de encontrar la refracción de los rayos incidentes».⁹⁷

Exceptuando la línea N, la construcción es la misma que la del 6 de agosto de 1677 (Fig. 8): RC es incidente en la superficie CK del cristal. Para encontrar el rayo extraordinario CI, trazando CO normal a RC y OK normal a CO, con KO = N, donde N es un valor observacional⁹⁸, y trazando la tangente de K a la elipse GSP se obtiene el punto I, donde CI es el rayo refractado. El principio de propagación, utilizando ondas esferoidales, sigue

⁹⁶ *Ibíd.*, p. 65.

⁹⁷ *Ibíd.*, p. 67.

⁹⁸ «Para encontrar la longitud de la línea N, proporcional a CP, CS, CG, es a través de las observaciones de la refracción extraordinaria que ocurre en esta sección del cristal, que debe ser determinada; y encuentro de esta manera que la relación de N a GC es un poco menor que 8 a 5». (*Ibíd.* p. 66).

las mismas reglas que en el caso de la refracción ordinaria. Para cuando O llega a K, los puntos H han llegado a los puntos x de la superficie y las ondas esferoidales se han extendido en el cristal. IK es la tangente común de estas ondulaciones y por lo tanto IK es la onda propagada y CI el rayo refractado.

Con la construcción de la elipse determinada cuantitativamente, Huygens derivó varias propiedades de la refracción extraña, considerando rayos fuera de la sección principal y discutiendo la formación de imágenes a través del mismo. Finalmente, Huygens pudo concluir:

«De esta manera, he buscado en cada detalle las propiedades de la refracción extraordinaria de este cristal, para ver si cada fenómeno que se deriva de nuestra hipótesis concuerda con lo que realmente se observa. Siendo así, no es una prueba ligera de la verdad de nuestras suposiciones y principios».⁹⁹

2.4.2 Polarización

Huygens retoma cierto fenómeno, el mismo que lo desconcertó e intrigó al final de su primera investigación sobre el Espato de Islandia: la polarización, confesando que fue incapaz de explicarlo con su teoría:

«Antes de terminar el tratado sobre este Cristal, agregaré otro fenómeno maravilloso que descubrí después de haber escrito todo lo anterior. Porque aunque no he sido capaz hasta ahora de encontrar su causa, no deseo por ello dejar de describirla, para dar oportunidad a otros de investigarla.»¹⁰⁰

Huygens explica entonces las observaciones realizadas, para «dar oportunidad a otros» de investigar el fenómeno. Y prosigue a dar una idea de lo que podría ser la composición del Espato de Islandia, concluyendo así su capítulo correspondiente a la doble refracción.

Como podemos ver, Huygens se dedicó a explicar una parte muy estrecha de la óptica y, consciente del limitado alcance del *Tratado de la Luz*, aunque no tenía ninguna pretensión de que fuera una teoría integral de la luz, escribió:

«Espero [...] que haya algunos que al seguir estos inicios se adentren mucho más en esta cuestión de lo que yo he podido hacer, ya que el tema debe estar lejos de agotarse. Esto se desprende de los pasajes que he indicado dónde dejo ciertas dificultades sin haberlas resuelto, y más aún de asuntos que no he tocado en absoluto, como los Cuerpos Luminosos de diversa índole, y todo lo que concierne a los Colores; en los cuales nadie hasta ahora puede jactarse de haber tenido éxito. Finalmente, queda mucho más por investigar en cuanto a la naturaleza de la Luz que no pretendo haber revelado, y deberé mucho a cambio a aquel que sea capaz de complementar lo que aquí me falta en conocimiento».¹⁰¹

Huygens tampoco consideró la difracción, ni los fenómenos de interferencia. Dejaría esa investigación a las generaciones siguientes, que serían las que finalmente condujeron al triunfo de la teoría ondulatoria de la luz en el siglo XIX.

⁹⁹ *Ibíd.*, p. 88.

¹⁰⁰ *Ibíd.*, p. 92.

¹⁰¹ *Ibíd.*, p. vii.

2.5 Recepción del *Tratado de la Luz*.

Después de su publicación, el *Tratado de la Luz* fue recibido con el aplauso de varios hombres, entre su publicación en 1690 y 1691, donde destacan los nombres de Philippe de la Hire¹⁰², Fatio de Duillier, Denis Papin y Gottfried Leibniz, quienes concentraron su admiración y opiniones alrededor de su tratamiento de la doble refracción del Espato de Islandia.

De la Hire dijo, por ejemplo que esa parte de su *Tratado*, era «una obra maestra de la física y las matemáticas» y que era incapaz de «dejar de admirar el giro que ha tomado para explicar fenómenos tan extraordinarios».¹⁰³

Por su parte, Fatio admiraba la «abundancia y exactitud de las cosas»¹⁰⁴ que Huygens proponía.

Papin expresó: «He leído y releído sus dos tratados¹⁰⁵, y por mucho que pueda juzgar, no podemos llevar estos asuntos más allá de lo que usted los ha tratado»¹⁰⁶. Aunque planteó el haber encontrado algunas dificultades respecto al mecanismo de propagación en el Espato de Islandia y su composición, terminó concluyendo que, «su manera de encontrar las figuras que sirven para la reflexión y la refracción me pareció muy conveniente».¹⁰⁷

Finalmente, Leibniz, quien mostró más entusiasmo que ningún otro, escribió:

«Su uso de las ondas para explicar los efectos de la luz me sorprendió. Nada es más afortunado que la facilidad con la que esta línea que toca todas las ondas particulares y compone la onda general satisface las leyes de reflexión y refracción establecidas por el experimento. Pero cuando vi que se utiliza la suposición de ondas esféricas con la misma facilidad para resolver los fenómenos de la doble refracción en el cristal de Islandia, pasé de la estima a la admiración».¹⁰⁸

Aunque pareciera esto una cálida bienvenida para el principio de propagación de onda, lo cierto es que esta pequeña lista agota prácticamente los nombres de aquellos que aceptaron la teoría de ondulatoria de Huygens durante los siglos XVII y XVIII,¹⁰⁹ razón por la cual el *Tratado de la Luz* cayó muy pronto en el olvido. El alcance de la teoría era limitado, la omisión de una teoría del color fue un inconveniente contra la *Óptica* de Newton; mientras que la doble refracción (el fenómeno que fundó la teoría de Huygens) fue prácticamente ignorado durante el siglo XVIII, en el que apenas algunos estudiantes

¹⁰² De la Hire, como miembro de la Royal Academy of Sciences estuvo presente en las sesiones cuando Huygens leyó el texto de su *Tratado* en 1679, teniendo la oportunidad de estudiarlo después de su publicación, quien sobre la explicación de la doble refracción de Huygens. (Shapiro, *Kinematic Optics*, p. 245).

¹⁰³ Carta de Ph. de la Hire a Christiaan Huygens, 17 de Enero de 1691, *Oeuvres Complètes*. Vol. IX, p. 5-6.

¹⁰⁴ Carta de Fatio de Duillier a Christiaan Huygens, 6 de Marzo de 1690. (Ibíd., p. 381).

¹⁰⁵ Aquí se refiere también a *Discours de la cause de la pesanteur*, que fue publicado de forma conjunta con el *Tratado de la Luz*.

¹⁰⁶ Carta de Papin a Christiaan Huygens, 6 de Diciembre de 1690, *Oeuvres Complètes*. Vol. IX, p. 559-560.

¹⁰⁷ Ibíd.

¹⁰⁸ Carta de Leibniz a Christiaan Huygens. Octubre 1690. (Ibíd., p. 522).

¹⁰⁹ Shapiro, *Kinematic Optics*, p. 246.

de cristalografía consultaron el *Tratado de la Luz*, pero solamente por su descripción del cristal.¹¹⁰

La investigación de la refracción extraordinaria se retomaría hacia finales de aquel siglo, con las investigaciones de René-Just Haüy en 1788; y principios del siglo XIX, de William Hyde Wollaston en 1802, seguido de Étienne-Louis Malus en 1808, quien confirmaría la ley de la doble refracción de Huygens, permitiendo así que el *Tratado de la Luz* regresara poco a poco de las cenizas y retomara el lugar que le correspondía dentro del estudio de la óptica.¹¹¹

¹¹⁰ La investigación de Haüy, la más importante desde Huygens, fue publicada en *Mémoire sur la double réfraction du spath d'Islande* (1788), donde encontró que sus observaciones estaban en desacuerdo con las de Newton, mucho más cercanas a las de Huygens. (Buchwald, *Experimental Investigations of Double Refraction from Huygens to Malus*, p. 335).

¹¹¹ Shapiro, *Kinematic Optics*, p. 257.

CAPÍTULO 3. NEWTON

Introducción.

La naturaleza de la materia, el espacio, el tiempo, el movimiento, la visión, la luz y los colores son algunos de los temas que fascinaban a Isaac Newton desde que era un joven estudiante en el Trinity College en Cambridge, algo que quedó plasmado en una de sus libretas de aquella época, en un apartado titulado: *Quaestiones Quaedam Philosophicae* (1664-1665). He ahí sus inicios, las preguntas que lo fascinaban. Sus principales influencias y referencias, derivadas de la lectura crítica de autores como Descartes y Charleton. Y el anuncio de muchos de los problemas a los que dedicaría su vida: En materia de luz, haría preguntas sobre su naturaleza, sobre la refracción y los colores; y realizaría sus primeros experimentos con prismas.

Hasta ese momento, la luz era solo una fuente de preguntas, las respuestas llegarían después a través de experimentos, matemáticas y nuevas preguntas que quedarían manifiestas en diversos escritos y publicaciones previas a la *Óptica*, entre ellas: las *Optical Lectures* (1670-1672), *New theory about light and colours* (1672), *Discourse of observations* (1675) y *An Hypothesis explaining the Properties of Light* (1675), donde concentraría diversos resultados y conclusiones, discutiendo a profundidad temas como la reflexión y la refracción de la luz, el color, la composición de la luz: su teoría sobre la diferente refrangibilidad, la heterogeneidad de la luz blanca, su explicación para la formación de los colores en películas delgadas y la razón de su periodicidad.

En este capítulo, se discutirán cada una de estas fases de la teoría de la luz de Newton. Desde las *Quaestiones*, hasta la publicación de la *Óptica*, pasando por sus experimentos con prismas y películas delgadas, sus *Optical Lectures*, las disputas acontecidas por las ideas expuestas en su *New theory of light and colors*. Su *Hypothesis explaining the Properties of Light*. Y, finalmente, los años que transcurrirían para terminar de construir la *Óptica*.

3.1 *Quaestiones Quaedam Philosophicae*.

Su libreta tiene un encuadernado café, carcomido por el paso del tiempo. En la primera página se puede leer en letra manuscrita: «Isaac Newton/ Trin: Coll Cant/ 1661».¹¹² Pasando las páginas, se encuentran folios llenos de una escritura clara y regular, notas en griego, latín e inglés, folios en blanco; y así hasta llegar al título de *Quaestiones Quaedam Philosophicae*, compuestas por cuarenta y cinco encabezados, un conjunto de argumentos, notas, observaciones y experimentos derivados de las lecturas de Newton, escritas entre 1664 y 1665.¹¹³ En ellas hay apuntes correspondientes a lecturas de autores como René Descartes, Walter Charleton, Galileo Galilei, Robert Boyle, Thomas Hobbes, Kenelm Digby, Joseph Glanville, Henry More¹¹⁴. Pero, en particular, las entradas

¹¹² Newton, *MS Add.3996*, p. 1r.

¹¹³ Westfall, *The Foundations of Newton's Philosophy of Nature*, p 173.

¹¹⁴ Westfall, *Isaac Newton: Una Vida*, pp. 42-43.

relacionadas con el color y la luz resuenan principalmente Descartes, Charleton y Boyle.
115

La esencia de las *Quaestiones*, como su nombre lo indica, era interrogativa, porque Newton no se dedicaba a registrar pasivamente el resultado de dichas lecturas y encontró, por ejemplo, razones para rechazar que la luz era una forma de presión, elaborada por Descartes:

«La luz no puede producirse por presión, ya que entonces veríamos por la noche tan bien o mejor que durante el día. Veríamos una luz brillante por encima de nosotros porque somos presionados hacia abajo [...] No podría haber refracción ya que la misma materia no puede ejercer presión en dos direcciones. Un pequeño cuerpo interpuesto no nos impediría ver [...]».¹¹⁶

Mientras tanto, sobre las ideas de Charleton y Boyle, en el apartado acerca del color, Newton escribió:

«Los colores surgen de las sombras entremezcladas con la luz, o de reflejos más fuertes y débiles, o de partes del cuerpo mezcladas con la luz y transportadas por esta».¹¹⁷

Un apunte derivado de sus lecturas de la *Physiologia Epicuro-Gassendo Charltonia or, A fabrick of science natural, upon the hypothesis of atoms founded by Epicurus repaired [by] Petrus Gassendus(1654)* de Walter Charleton¹¹⁸, obra en la que, como anticipa el título, contenía muchas de las ideas de la filosofía atomista de Gassendi¹¹⁹. Por esta razón, autores como Hall (1993), piensan que, aunque Newton terminaría rechazando muchas de las teorías de la luz y colores de Charleton, este libro tuvo una influencia profunda en él, pues «o bien le dio a Newton su apego de por vida a la filosofía atomista o bien lo confirmó».¹²⁰

En ese mismo apartado (sobre el color), al cerrar sus notas, encontramos la referencia a otro autor, Robert Boyle: «No surgirá ningún color de la mezcla de blanco y negro puros»¹²¹, escribe Newton, una idea que proviene de la obra *Experiments and Considerations Touching Colours* (1664), donde Boyle había dejado manifiesto que un programa de experimentos especialmente diseñado y controlado, podía usarse para probar, explorar y extender un conjunto de ideas teóricas.¹²² No es entonces una sorpresa el hecho de que estas primeras notas de Newton sobre la luz y el color fueran

¹¹⁵ Guerlac, Henry. *Can We Date Newton's Early Optical Experiments?*, p. 75.

¹¹⁶ Newton, *MS Add.3996*, p.103v.

¹¹⁷ *Ibíd*, 105v.

¹¹⁸ Hall, *All Was Light: An Introduction to Newton's Opticks*.

¹¹⁹ En su obra *Physica*, Gassendi definía la luz de la siguiente forma:

«Parece que la luz en un cuerpo luminoso no es más que diminutos corpúsculos que, configurados en cierta configuración, luego se transfieren desde este cuerpo con una velocidad extrema y son recibidos por el órgano de visión, son capaces de mover este órgano y crear la sensación llamada vision».

Gassendi también definió los rayos como la trayectoria rectilínea de los corpúsculos, explicó la reflexión y la refracción por analogía con el movimiento de una bola en el borde entre dos medios porosos con cantidades desiguales de poros, los colores como una mezcla aristotélica de luz y sombra. (Darrigol, *A History of Optics: From Greek Antiquity to the Nineteenth Century*).

¹²⁰ Hall, *All Was Light*.

¹²¹ Guerlac. *Can We Date Newton's Early Optical Experiments?*, p. 76.

¹²² Hall, *All Was Light*.

acompañadas por una serie de experimentos, probablemente llevados a cabo a finales de 1665.¹²³

En la página 122 de esta libreta¹²⁴ encontramos un esquema, indicaciones y observaciones del experimento que estaba llevando a cabo (fig. 18). Como material, no necesitó más que la luz del día, un prisma y una superficie dividida en dos segmentos rectangulares. Uno pintado de negro y otro de blanco, para empezar. Después otros pares de colores (azul y blanco, negro y azul, rojo y negro, entre otros). Newton tomó un prisma y entonces observó los segmentos de colores a través de este. En su libreta registró el resultado, tabulando los colores obtenidos («si *abcd* es blanco y *cdsr* negro, entonces *eodc* es rojo. Si *abcd* es negro y *edsr* blanco, entonces *eodc* es azul»¹²⁵, etc.) y anotando la siguiente observación al final de la página:

«Cuanto más uniformemente los *glóbulos* mueven los nervios ópticos, tanto más el cuerpo parece estar coloreado de rojo, amarillo, azul, gris y verde, pero cuanto más variadamente se mueven, tanto más el cuerpo se ve blanco, negro o gris».¹²⁶

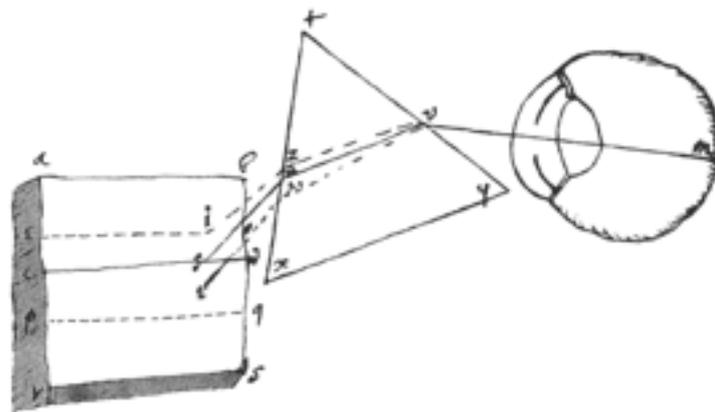


Fig. 18 Primer experimento con prismas de Newton. Observando a través del prisma la superficie *absr*, dividida en dos segmentos de colores *abcd* y *bcsr*, Newton obtiene diferentes colores en las secciones *eodc* y *cdpq* (Ilustración tomada de *The Newton Project, Quæstiones quædam Philosophiæ*: <http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/THEM00092>).

Con esto, podemos ver que Newton estaba interpretando lo observado haciendo uso de la creencia de que los rayos de luz estaban compuestos por glóbulos o cuerpos que viajaban desde la fuente, hasta el ojo. Además, Newton le asignaba a estos glóbulos, una cierta velocidad, dependiendo del color, como anota en la página siguiente, «los rayos que se mueven lentamente se refractan más que los rápidos»¹²⁷, donde los rayos «lentos» son los rayos azules o púrpuras y los «rápidos» son rojos o amarillos; por lo

¹²³ Las fechas estimadas para esta son: 1664 y final de 1665 (Hall, *Sir Isaac Newton's Note-Book, 1661-65*, p. 246); o finales de 1665, principios de 1666 (Guerlac, *Can We Date Newton's Early Optical Experiments?*, p. 76).

¹²⁴ Newton, *MS Add.3996*, p. 122r.

¹²⁵ *Ibíd.*

¹²⁶ *Ibíd.* La letra cursiva es mía.

¹²⁷ *Ibíd.*, p. 122v.

tanto, el factor modificado por la refracción era la velocidad de los rayos (o glóbulos), siendo esta *diferente* en cada color producido durante la misma:

«Que los rayos que hacen el azul se refractan más que los rayos que hacen el rojo parece de este experimento Si una mitad de la superficie [...] es azul y la otra roja y un cuerpo de color o negro se coloca detrás de ella, entonces mirando a la superficie a través de un prisma, una mitad de la superficie aparecerá más arriba que la otra y no ambas en una línea directa, debido a refracciones desiguales en los dos colores diferentes».¹²⁸

Aunque aquí no hay aún una referencia directa de lo que sería su teoría de las diferentes refrangibilidades, la importancia de este simple experimento difícilmente puede ser sobre enfatizada, pues no solo aparece (aunque modificado), en la *Óptica* (Prop. I, Exp. 1 y 2), sino que se trata del primer experimento documentado que Newton realizó utilizando prismas. Y es que es ampliamente conocido que el prisma se convirtió en el instrumento con el cual Newton diseccionaba la luz, transformándolo en un instrumento científico a través del cual obtenía resultados teóricos, revelando el poder del trabajo experimental realizado con una potente imaginación y controlado por una lógica rigurosa. Newton contaba sin duda con una mente dispuesta a ver a través y más allá del prisma.

3.2 De colores y Películas Delgadas.

Hay una segunda libreta que es conveniente revisar: Su libreta de experimentos de 1669 a 1693, donde se alojaron notas sobre óptica, piedras preciosas, colores, temperaturas, sales, medicina, alquimia y otros temas¹²⁹. En la página dos se encuentra la sección *Of Colours*, relativa a sus experimentos con prismas y películas delgadas. Iniciando con una serie de observaciones sobre los efectos mostrados por plantas, lentes e infusiones de *lignum nephriticum*, que mostraban diferentes colores al reflejar y transmitir la luz. Al dar vuelta a la página, encontramos el primer experimento con prismas, donde describe una variante del experimento de su primera libreta¹³⁰; así como el experimento que utilizará posteriormente para iniciar su artículo *New theory of light and colors* (1672)¹³¹ y, páginas después, se encuentra una anticipación temprana del que sería su *experimentum crucis*, en ese mismo artículo, de los cuales hablaremos más adelante.¹³²

Es en esta libreta donde se encuentra el estudio de Newton sobre los colores en películas delgadas. Como vimos en el capítulo 1, sección 1.2, Hooke había realizado un estudio sobre las películas delgadas, gracias al cual había conjeturado que los colores que aparecían lo hacían de forma periódica, sin embargo, había sido incapaz de medir el grosor de esas películas delgadas para poder demostrarlo, por lo que al final la Obs. IX de *Micrografía* escribió:

¹²⁸ *Ibíd.*, p. 122v.

¹²⁹ Newton, *MS Add 3975*.

¹³⁰ Guerlac, Henry. *Can We Date Newton's Early Optical Experiments?* p. 77.

¹³¹ Cuidadosamente ilustrado con un esquema que se encuentra más adelante, (Fig. 23), mostrando «un prisma,[...] en una cámara oscura en la que el sol brillaba solo a través de un pequeño agujero redondo. Y colocándolo cerca del agujero k de tal manera que los rayos, siendo igualmente refractados en (n y h) su entrada y salida, arrojen colores rstv en la pared opuesta. Los colores deberían formar un círculo redondo si todos los rayos estuvieran refractados por igual, pero su forma era oblonga y terminada en los lados de los mismos r & s con líneas rectas». (Newton, *MS Add 3975*, p. 2v).

¹³² Aquí, Newton escribió: «Refractando los rayos a través de un prisma en una cámara oscura [...] Y sosteniendo otro prisma a unos 5 o 6 yardas del primero para refractar los rayos de nuevo encontré primero que los rayos azules sufrían una mayor refracción por el segundo prisma que los rojos. Y en segundo lugar, que los rayos puramente rojos refractados por el segundo prisma no hacían otros colores sino rojo y los puramente azules no otros colores sino azules». (Newton, *MS Add 3975*, p. 7v).

«Una cosa que parece de la mayor importancia en esta hipótesis es determinar el máximo y mínimo grosor necesario para estos efectos, lo cual, aunque no he dejado de intentarlo, con todo, estas placas coloreadas son tan extremadamente delgadas y tan imperfecto nuestro microscopio, que hasta ahora no he tenido éxito[...]». ¹³³

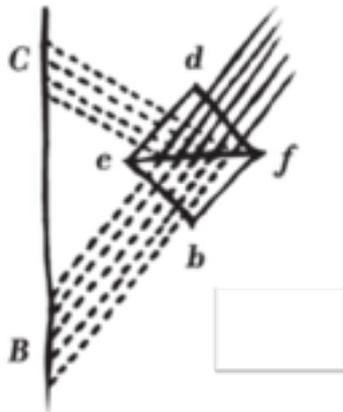


Fig. 19 Observación de películas Delgadas. Newton colocó las caras de dos prismas juntas y observó estrías de colores formadas entre ellos. (Ilustración tomada de *The Newton Project, Quæstiones quædam Philosophiæ*: <http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/THEM00092>).

Quedó en Newton completar esta tarea. El primer experimento de Newton, relativo a las películas delgadas se dio al colocar dos prismas de vidrio juntos, para formar un paralelepípedo (Fig 19), el sol pasaba a través de un agujero en su cámara oscura y caía en el sitio donde los dos prismas se tocaban, es en esa superficie donde Newton observó estrías de colores interrumpidas por intervalos oscuros hacían su aparición, cuyo grosor cambiaba conforme variaba la presión ejercida sobre los prismas.

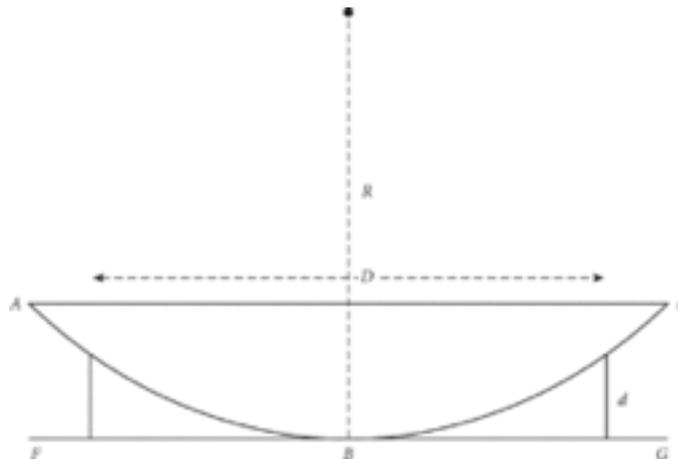


Fig. 20 Método utilizado por Newton para determinar el grosor de una película delgada formada entre una lente esférica y un plano. (Ilustración tomada de Shapiro, *Newton's Optical Experiments and Theories*, p. 11)

¹³³ Hooke, *Micrografía*, p. 67.

Fue entonces cuando Newton fue más allá que Hooke y, presionando «una lente de vidrio esférica»¹³⁴ (ABC), Fig. 20, sobre una placa de vidrio plana (FGB), «para que aparezca dicho punto con los círculos de colores»¹³⁵, es decir, un conjunto de círculos concéntricos de colores (ahora conocidos como «anillos de Newton»): Los círculos forman una secuencia alternada de anillos de colores brillantes y oscuros, y su centro común, el punto de contacto B, es un punto oscuro. Conociendo entonces la distancia focal de la lente convexa y, por lo tanto, su radio de curvatura, Newton fue capaz de calcular el grosor del espacio de aire entre las dos lentes asociadas en cualquier anillo particular, es decir, el grosor necesario para que los colores aparecieran.¹³⁶

Ahora, la periodicidad aparente descubierta por Hooke podía ser fácilmente demostrada por Newton, pues al conocer el grosor de los anillos formados (midiendo el diámetro de círculos brillantes y oscuros sucesivos), descubrió que existía en una progresión aritmética, en múltiplos integrales del grosor del primer anillo, esto es, como 1, 2, 3, 4, 5, 6 (Fig. 21):

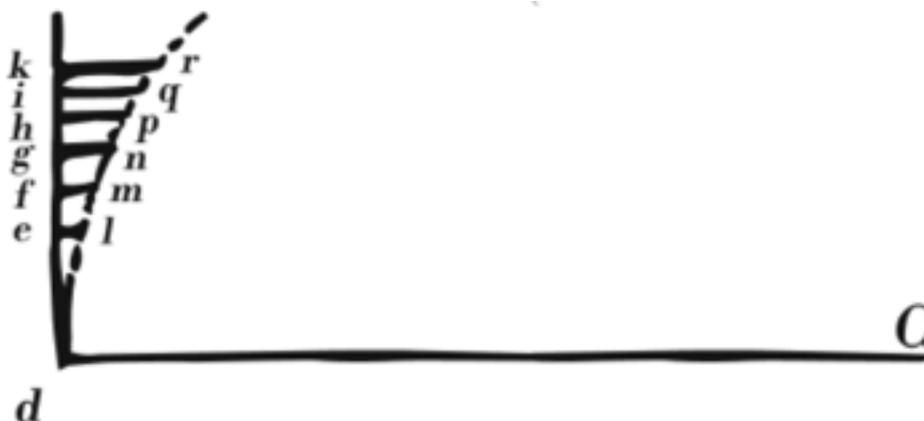


Fig. 21 Diversos grosores formados entre la lente y el plano, donde «cd= el radio de curvatura del vidrio; efgihk el círculo de colores; y el= fm/2= gn/3= hp/5=iq/5= kr/6= el espesor del aire» (Ilustración tomada de *The Newton Project, Quæstiones quædam Philosophiæ*: <http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/THEM00092>).

«Los círculos más anchos son los más cercanos al centro y por lo tanto más estrechos y más estrechos [...] aumentan en número a medida que el aire entre ellos lo hace en grosor. (Sea cd= el radio de curvatura de la lente; efgihk el círculo de colores; y el= fm/2= gn/3= hp/5=iq/5= kr/6= el espesor del aire)».¹³⁷

Newton procedió entonces a calcular que «el grosor del aire para un círculo era de 1/64000 pulgadas, o 0,000015625. [que es el espacio de un pulso del medio vibrante.]»¹³⁸

¹³⁴ Newton, *MS Add 3975*, 6r.

¹³⁵ *Ibíd.*

¹³⁶ Si el diámetro de los círculos coloreados se indica con D, el espesor de la película de aire que produce ese círculo con d, y el radio de la lente con R, entonces $d = D^2/8R$. La fórmula aparece en *Elementos de Euclides*, III, p. 36. (Shapiro, *Newton's Optical Experiments and Theories*, p. 11).

¹³⁷ El texto en paréntesis está originalmente escrito en latín: *Sit cd = radio curvatis vitri; efgihk circuli colorum; & el = fm/2 = gn/3 = hp/4 = iq/5 = kr/6 = crassitie æris.* (Newton, *MS Add 3975*, p. 9)

¹³⁸ Corchetes del autor. Newton, *MS Add 3975*, p. 6v.

Sus resultados, aunque cuantitativamente contaban con un margen de error considerable, como señaló más tarde¹³⁹, fueron suficientes para demostrar que la aparición de los colores era un fenómeno periódico.¹⁴⁰ Además, la observación de Newton entre corchetes muestra que al comienzo de su investigación estaba utilizando el concepto de un «medio vibrante» para explicar la periodicidad de los anillos, con la noción de un pulso hipotético como la causa física de la regularidad, un concepto que después sería formulado explícitamente en *An Hypothesis explaining the Properties of Light* (1675), compuesta para acompañar *Discourse of Observations*, donde publicaría los resultados de sus investigaciones sobre los anillos formados en las películas delgadas. Pero antes de que eso ocurriera, es conveniente hablar de otro episodio en la vida académica del joven Newton quien, el 29 de octubre de 1669, se convirtió en el *Lucasian Professor of Mathematis* en la Universidad de Cambridge, eligiendo sus estudios de óptica como el tema de sus primeras conferencias.¹⁴¹

3.3 Optical Lectures

Poco o nada tendríamos de referencia de lo que Newton enseñó en la Universidad de Cambridge entre 1670 y 1672¹⁴², si hubiéramos confiado en el testimonio de sus alumnos, ya que no es posible rastrear alguno.¹⁴³ Por fortuna, era deber del profesor depositar 8 conferencias al año en la biblioteca de la universidad.

Y aún así. No podemos estar seguros de las palabras que Newton leyó a sus alumnos. El set oficial de conferencias depositado en la biblioteca de la universidad por Newton en persona, en 1674 y que fueron impresas posteriormente en 1679, contienen 31 conferencias, mientras un set más pequeño de solo 18 conferencias se quedó entre los papeles de Newton.¹⁴⁴ Ambas versiones de las conferencias de *Óptica* de Newton fueron compiladas por Shapiro (1984), la primera versión es un borrador que conocemos como sus *Lectiones Opticae* (Newton, *MS Add. 4002*) y una versión más larga, la versión publicada, llamada *Opticae, Pars 1a/2a*. Para no tener que distinguir entre una y otra, se refiere a ellas de manera colectiva como las *Optical Lectures*.

Aunque, según Hall (1993)¹⁴⁵, no se ha realizado una comparación exhaustiva entre la *Óptica* y las *Optical Lectures* (y no encontré nada que se le asemejara en épocas recientes), en este trabajo, la importancia de realizar un pequeño análisis no radica en el contenido de estas obras, sino en las diferencias del tono entre ambas, un modo de estudiar la evolución de los estudios de óptica de Newton. ¿Cuál es la relación entre este

¹³⁹ Newton añadió una nota posterior, diciendo: «midiéndolo ya que más exactamente encuentro $1/83000 = a$ dicho grosor» (Ibíd).

¹⁴⁰ Satisfecho con este resultado fundamental, Newton lo dejó de lado hasta 1671, cuando retomó su investigación sobre películas delgadas en *Of ye coloured circles twixt two contiguous glasses*, un manuscrito descubierto por Westfall.

En él, Newton se basa claramente en una concepción corpuscular de la luz para describir sus observaciones y, sin embargo, la dificultad de explicar el fenómeno de los anillos periódicos es que desafían el uso de una teoría corpuscular de la luz. (Westfall, *Isaac Newton's Coloured Circles Twixt Two Contiguous Glasses*. p.181-96).

¹⁴¹ Westfall, *Isaac Newton: Una Vida*, p. 260.

¹⁴² Shapiro, *Optical Papers*, p. 16.

¹⁴³ Según el testimonio de Humphrey Newton, quien sirvió a Newton como amanuense durante cinco años, en torno a 1680, en Cambridge: «Cuando Newton impartía sus conferencias, recordaba, eran tan pocos los que iban a escucharle, y menos aún lo que le entendían que, a menudo, a falta de oyentes, leía a las paredes». Es posible que esa misma situación reinara durante los primeros años como profesor de Newton, quien mantuvo la cátedra Lucasiana por un periodo de treinta años. (Westfall, *Isaac Newton: Una Vida*, p. 261).

¹⁴⁴ *The Optical Papers of Isaac Newton*. p. xv.

¹⁴⁵ Hall, *All Was Light*.

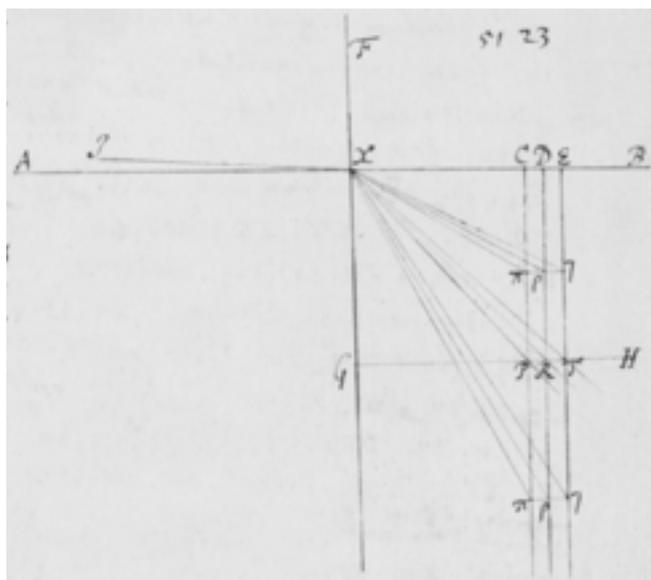


Fig. 22 Representación geométrica de la ley de dispersión de Newton. La línea IX representa un rayo de luz de son que incide sobre el medio AXB, donde XP, XR y XT son sus rayos refractados (violeta, verde y rojo respectivamente). Una vez que se fijan los parámetro del modelo, XC, XD y XE, las refracciones XR, XP y XT en cualquier otro medio están determinadas por medio de su índice de refracción. (Ilustración tomada de *The Newton Project, Lectiones Opticae*: <http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00306>).

trabajo y un libro escrito poco más de 20 años después? Solo de manera general, se puede decir que el Libro I de la *Óptica* fue derivado de estas conferencias, pues aunque el terreno cubierto es el mismo, los argumentos y la exposición son muy distintos, como Shapiro comenta: «aunque los elementos esenciales de la teoría del color y sus experimentos de apoyo son sustancialmente los mismos en las dos obras, la estructura de la teoría en sí y sus demostraciones difieren de muchas maneras fundamentales»¹⁴⁶. En las *Optical Lectures* el uso de las matemáticas es mucho más extenso que en la *Óptica*, las conferencias 4 a 15¹⁴⁷ están dedicadas a la óptica geométrica, fundadas en la ley de los senos de Descartes, una sección que reaparece de manera simplificada y comprimida de manera muy esquemática en las primeras veinte páginas de la *Óptica*¹⁴⁸.

En cuanto a su escritura, los dos textos tienen aún menos en común, Newton rediseñó su material completamente, las *Optical Lectures* fueron escritas cuando gran parte de su trabajo experimental estaba aún fresco en su mente y su exposición de los mismos lo refleja, la *Óptica* por otro lado, es producto de años de reflexión, donde ha refinado sus conceptos y descubierto nuevos fenómenos en el camino. Sus conferencias están lejos de estar pulidas, refinadas y desarrolladas como la *Óptica*, pero representan el primer intento de crear una nueva ciencia, una ciencia matemática para el color.¹⁴⁹

Un plan que nunca fue más que eso, un plan, cuya fundación estaba apoyada en la ley de los senos de Descartes¹⁵⁰. Asumiendo la ley de los senos como válida para cada color por separado, describió la variación del índice de refracción cada color, es decir, la dispersión (fig. 22).

¹⁴⁶ Shapiro, *The Optical Papers of Isaac Newton*, p. 23.

¹⁴⁷ Esto en el texto impreso. En el manuscrito, corresponden a las conferencias 9 a 18.

¹⁴⁸ Newton, *Opticks*, 4th ed.

¹⁴⁹ Shapiro, *Experiment and Mathematics in Newton's Theory of Color*, p. 38.

¹⁵⁰ Shapiro, *Newton's Optics and Atomism*, p. 298.

Las *Optical Lectures* son entonces un punto de inflexión, compuestas por un discurso en óptica geométrica¹⁵¹, donde el tratamiento de la luz es matemático, dejando de lado las causas de los fenómenos. Sería entonces hasta la publicación de *New Theory of Light and Colors*, cuando se obtendrían las primeras explicaciones.

3.4 Nueva Teoría de la Luz y los Colores

«Habiendo oscurecido mi cámara y hecho un agujero en mi ventana, para dejar pasar una conveniente cantidad de luz de sol, coloqué mi prisma en la entrada, para que se reflejara en la pared opuesta»¹⁵², escribió Newton en su carta al secretario de la Royal Society, Henry Oldenburg, con fecha del 6 de febrero de 1671-2, para informarle sus

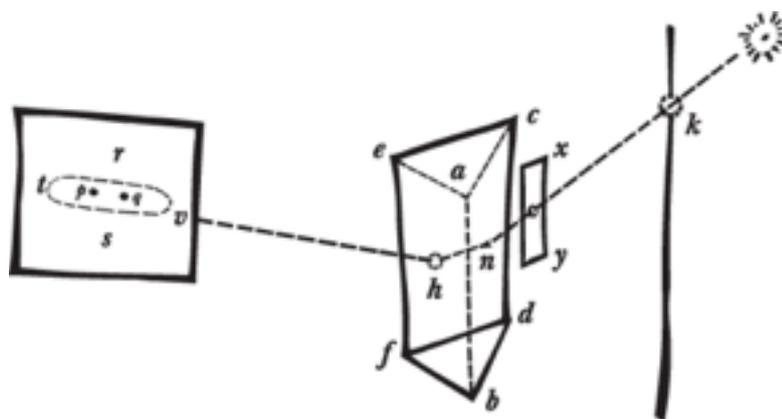


Fig. 23. Newton realiza un experimento en cámara oscura. A través de un agujero k, la luz del sol pasa a través del prisma caedbf, reportando que se forma una figura oblonga rts. (Ilustración obtenida de Portsmouth Collection Add. MS. 3975: <http://webapp1.dlib.indiana.edu/newton/mss/norm/ALCH00110;jsessionid=E91D38D6706C17C88E87106C99760A9B>).

descubrimientos en su *New Theory of Light and Colors*, esta carta fue leída ante la Royal Society (en ausencia de Newton) el 8 de febrero e impresa posteriormente en el no. 80 de las *Philosophical Transactions* el 19 de febrero de 1671/2.¹⁵³

Newton continúa el relato de aquel experimento (Fig. 23):

«Al principio fue una diversión muy agradable, ver los colores vivos e intensos que se producían; pero después de un tiempo de aplicarme para considerarlos más circunspectivamente, me sorprendió verlos en forma *oblonga*; lo cual, según las leyes recibidas de refracción, esperaba que hubiera sido circular.¹⁵⁴»¹⁵⁵

¹⁵¹ Dijksterhuis, *Once Snell Breaks Down*, p. 176.

¹⁵² Newton, MS Add. 3075-76. Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters*, pp. 47-48.

¹⁵³ Sabra, *Theories of Light: From Descartes to Newton*, p. 234.

¹⁵⁴ Newton, MS Add. 3076. Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters*, p. 48.

¹⁵⁵ La dispersión de la luz a través de un prisma había sido observada mucho antes que Newton y se habían propuesto varias explicaciones para los colores producidos, siendo estas basadas en el color en sí mismo, razón por la cual pasaron por alto el problema que llamó la atención de Newton. Descartes, por ejemplo, se conformó con atribuir los colores prismáticos a la rotación de los «glóbulos etéreos»; la relación entre la velocidad de rotación y la velocidad de los glóbulos en la dirección de propagación determinaba el color. Alternativamente, Hooke explicó el mismo fenómeno por la oblicuidad del pulso etéreo a la dirección de propagación: la manera en que este pulso oblicuo golpea el ojo determina el color. (Sabra, *Theories of Light*, p.241).

Ante la «sorpresa» generada por este descubrimiento, siguiendo esta narrativa tersa, pulida y artificial reconstrucción de sus experimentos, Newton prosigue a realizar una serie de posibles explicaciones para este singular acontecimiento, persuadiendo al lector a descartar todas ellas, invitándolo a descubrir a su lado la mejor explicación posible a este. Newton describe entonces la realización de un experimento, el *experimentum crucis*, cuyo arreglo (fig. 24) consistía de dos prismas en una cámara oscura, el primero colocado cerca del agujero de una ventana F, por donde entraba luz de sol S; los rayos refractados por este prisma ABC pasaban entonces a través de una pequeña apertura en un tablero DE colocado cerca del prisma, mientras que, a una distancia de 12 pies, colocó un segundo prisma *abc*, detrás de otro tablero *de*, en el cual un pequeño agujero *g* dejaba pasar un poco de la luz incidente para alcanzar dicho prisma. Montado el experimento, Newton tomó el primer prisma y lo giró «lentamente de un lado a otro alrededor de su eje, hasta el punto de hacer que las diversas partes de la imagen, fundidas sobre el segundo tablero, pasen sucesivamente a través del agujero que hay en él, para que pueda observar a qué lugares de la pared las refractaría el segundo prisma».¹⁵⁶

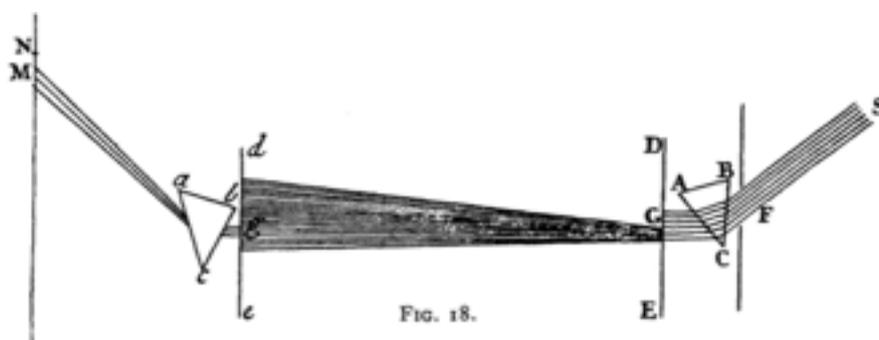


Fig. 24. Descripción gráfica del *Experimentum Crucis*. (Ilustración tomada de Newton, *Opticks* 4th edition, p. 47).

Newton encontró que cada vez que un rayo en particular pasa a través de un prisma, se refracta exactamente en el mismo grado en el segundo prisma. Por ejemplo, la luz que se refracta a 15 grados en el primer prisma también se refracta a 15 grados en el segundo prisma. Newton afirma que esto demuestra que la refrangibilidad es una propiedad original de la luz, no un efecto del prisma:

«Y así la verdadera causa de la longitud de esa imagen no fue detectada para ser otra, entonces que la luz consistía en rayos de diferente refrangibilidad, lo que, sin respeto a una diferencia en su incidencia, fueron, de acuerdo a sus grados de refrangibilidad, transmitidos a través de diversas partes del muro».¹⁵⁷

Es aquí donde aparece su primera conclusión sobre la «heterogeneidad» de la luz: «la luz es una *mezcla heterogénea de rayos de diferente refrangibilidad*».¹⁵⁸ Aunque, sin elaborarla más a fondo, pues después hace comentarios sobre las lentes y los telescopios, para luego asentar su teoría del color. Newton no examina esto a detalle en su carta, en lugar de eso, realiza una discusión sobre telescopios, con argumentos sobre las diferencias de magnitud entre la aberración cromática, comparada con la aberración

¹⁵⁶ Newton, MS Add. 3078. Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters*, p. 50.

¹⁵⁷ Newton, MS Add. 3079. Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters*, p. 51.

¹⁵⁸ *Ibíd.*

esférica, como una imperfección en las lentes. Después retoma la conclusión de su *experimentum crucis* y escribe sobre el color.

Su «doctrina del color» comprende algunas de las siguientes proposiciones¹⁵⁹, estableciendo que los colores «no son cualidades de la luz, [...] sino propiedades originales e innatas», donde los rayos menos refrangibles «están dispuestos para exhibir un color rojo», al contrarios de los rayos más refrangibles, «que están dispuestos para exhibir un color violeta» o azul. La alteración de los colores tendrá lugar cuando distintos tipos de rayos se mezclen entre ellos, y dichos componentes reaparecerán cuando los rayos se separen por refracción, así hay dos tipos de colores: «El original y simple, [y] el otro compuesto de estos»¹⁶⁰. Donde el blanco tenía la «más sorprendente, y maravillosa composición», pues requería de todos los colores primarios, «mezclados en una proporción adecuada».¹⁶¹ Y como el blanco es el color usual de la luz, Newton agrega, por lo tanto, que esta es: «un agregado confuso de rayos dotado con toda clase de colores».

En resumen, como cada tipo de rayo tiene un grado diferente de refrangibilidad la producción de colores a partir de luz blanca por el prisma se entendía de la siguiente manera: Los rayos que originalmente estaban dotados de color son simplemente «dispersados» por el prisma de acuerdo con sus diversos grados de refrangibilidad y, por consiguiente, se distinguen los colores primarios.

Fue esta interpretación de la constitución de la luz blanca y el papel que Newton asignó al prisma en la producción de colores lo que ocupó la mayor y más importante parte de la controversia entre Newton y los críticos de su teoría. Hooke, Pardies y Huygens.

3.4.1 La Crítica de Hooke

Hooke, quien estuvo presente durante la lectura de la carta de Newton, fue el primero en responder a la misma a través de un documento ahora conocido como sus *Considerations*¹⁶², escribiendo:

«He leído con detenimiento el discurso del Sr. Newton [...] y me he sentido complacido con la delicadeza y curiosidad de sus observaciones. Pero aunque estoy totalmente de acuerdo con él respecto a la veracidad de lo que alega, habiendo hallado que es así tras muchos centenares de pruebas, sin embargo en lo que a esta hipótesis para salvar el fenómeno de los colores se refiere, debo confesar que no veo todavía ningún argumento innegable que me convenza de su exactitud. [...] Sin embargo, siempre que pienso en mi hipótesis (que no tomé sin antes probarla con algunos cientos de experimentos), me alegraría mucho encontrarme con un *experimentum crucis* del Sr. Newton, que me divorciara de esta. Pero no es eso, que él llama así, lo que logrará dicha hazaña; porque

¹⁵⁹ Newton, MS Add. 3081. *Ibíd.*, p. 53.

¹⁶⁰ Los colores originales o primarios son rojo, amarillo, verde, azul, violeta-púrpura, naranja, índigo. (MS Add. 3082. *Ibíd.*, p. 54).

¹⁶¹ Para ilustrar el último punto, Newton describió un experimento en el que los rayos de la luz del sol convergían después de haberse dispersado, y de ese modo se producía una luz blanca como la luz proveniente directamente del sol.

¹⁶² Estando presente en la reunión de la Royal Society, cuando la carta de Newton fue leída, le fue pedido por la Sociedad que formulara lo que ahora es conocido como sus *Considerations* (1672), sobre *New theory of light and colors* n, la cual leyó ante la Sociedad apenas siete días después de que la carta de Newton fuera entregada, el 15 de febrero de 1671/2. publicadas en el no. 88 , 18 de nov de 1672 (Sabra, *Theories of Light*, p. 251).

el mismo fenómeno será resuelto por mi hipótesis, así como por la suya, sin ningún tipo de dificultad o tensión [...]»¹⁶³

A través de estos extractos podemos ver que, en general, la actitud de Hooke hacia la teoría de Newton era la siguiente: estaba «dispuesto» a conceder los resultados experimentales informados por Newton, pero no podía aceptar la «hipótesis» que este último había propuesto para explicarlos; además, expresó su creencia de que todos los experimentos de Newton, incluido el *experimentus crucis*, podrían explicarse igualmente por su propia hipótesis sobre la naturaleza de la luz y los colores. Hooke aprobó los experimentos de Newton como para sugerir que los conocía a todos por adelantado, no obstante, rechazó la heterogeneidad de la luz blanca y la hipótesis corpuscular:

«Pero conceda su primera proposición, que la luz es un cuerpo, y que tantos colores como grados de lo que pueda haber, tantos tipos de cuerpos puede haber, todos los que se juntan se hacen blancos; y conceda, además, que todos los cuerpos luminosos están compuestos de tales sustancias condensadas, y que mientras brillan, envían continuamente una cantidad indefinida de los mismos, todas las formas en órbita, que en un momento del tiempo se dispersan al máximo y a límites indefinidos del universo [...] concediendo esto, supongo que no habrá gran dificultad para demostrar todo el resto de su curiosa teoría: aunque, en mi opinión, todos los cuerpos de colores del mundo compuestos juntos no deberían formar un cuerpo blanco».¹⁶⁴

En su respuesta a las *Considerations* de Hooke, Newton negó que la naturaleza corpuscular de la luz fuera parte de su doctrina:

«Es verdad que desde mi teoría argumento la corporeidad de la luz, pero lo hago sin ningún tipo de positividad absoluta, como la palabra tal vez insinúa, y la convierto en una consecuencia muy plausible de la Doctrina, y no en una suposición fundamental, ni como en una parte de ella».

La doctrina de los colores, mantenía Newton, estaba contenida en las proposiciones experimentales. A continuación, indicó que la misma doctrina podía explicarse en cierta medida por otras hipótesis:

«Si hubiera tenido la intención de alguna Hipótesis [como la de la corporeidad de la luz], debería haberla explicado en alguna parte. Pero yo sabía que las propiedades que declaré de la luz eran en alguna medida capaces de ser explicadas no solo por eso, sino por muchas otras hipótesis Mecánicas»¹⁶⁵

3.4.2 Las Dificultades de Pardies

Por su parte, el padre Pardies, cuyo tono era más austero y amable que el de Hooke, se dirigió a Newton, hablando de su «muy ingeniosa hipótesis de la luz y los colores»¹⁶⁶ en términos más cordiales, diciendo que le parecía «muy extraordinario», que en esta se veía a la luz blanca como un agregado de un número «casi infinito de rayos originalmente

¹⁶³ Hooke, *Considerations upon Mr. NEWTON'S discourse on light and colours*. Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters*, p. 110.

¹⁶⁴ Hooke, *Considerations upon Mr. NEWTON'S discourse on light and colours*. (Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters*, p. 110).

¹⁶⁵ Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents*.

¹⁶⁶ Carta de 9 de abril, 1672, Pardies a Newton. No. 84, p. 4087 (Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents*, p 86)

dotados de diferentes colores y diferentes grados de refrangibilidad», pero sin embargo, le causaba preocupación ya que, «esta hipótesis extraordinaria que [...] invierte la base misma de la dióptrica y hace inútil la práctica hasta ahora conocida, se basa enteramente en el experimento del prisma [...]»¹⁶⁷.

En su respuesta, Newton explica sus experimentos a Pardies, para justificar sus conclusiones, invitándolo a realizar el *experimentum crucis* y añadiendo que: «si no le gusta la manera en que he realizado este asunto [...] es fácil idear otras maneras», como él mismo ha intentado con otros métodos; finalizando su carta con una nota. «No me extraña que el Reverendo Padre llame a mi teoría una hipótesis, ya que no estaba familiarizado con ella. Pero mi diseño es muy diferente, pues parece contener solo ciertas propiedades de la luz que, ahora descubiertas, creo que son fáciles de probar, y que si no las hubiera considerado verdaderas, preferiría que fueran rechazadas como especulaciones vanas y vacías, en vez de ser reconocidas como hipótesis».¹⁶⁸

Este pasaje es de especial importancia porque contiene la primera reacción pública de Newton a la aplicación de la palabra «hipótesis», donde realiza la distinción entre una hipótesis, una conjetura que puede ser en el mejor de los casos probable; y la verdad, una propiedad de las proposiciones que se derivan directamente de los experimentos. Esto quedó aún más claro en el siguiente pasaje de su respuesta a la segunda carta de Pardies; que es una de las declaraciones más largas e importantes que Newton hizo sobre las hipótesis:

«[...] el mejor y más seguro método de filosofar parece ser, primero preguntarse diligentemente acerca de las propiedades de las cosas, y establecer esas propiedades por medio de experimentos. Porque las hipótesis deben estar supeditadas solo a la explicación de las propiedades de las cosas, pero no deben ser asumidas para determinarlas; a menos que proporcionen experimentos. [...] Si cualquiera ofrece conjeturas acerca de la verdad de las cosas desde la mera posibilidad de una hipótesis, yo no veo cómo algo certero pueda ser determinado en la ciencia, ya que uno siempre puede pensar otras y otras hipótesis que parecerían establecer nuevas dificultades. De lo que yo juzgo que uno debería abstenerse de considerar hipótesis».¹⁶⁹

Con esto, Newton nos dice que el experimento debe preceder a las hipótesis, es decir, primero hay que establecer las propiedades físicas y luego tratar de explicarlas. Para Newton, las hipótesis podrían ser útiles, por ejemplo, cuando sugieren experimentos adicionales. Así, comparar varias hipótesis, no puede conducir a la certeza, ya que no se puede tener la seguridad de que se dispone de todas las hipótesis posibles, por lo que siempre existe la posibilidad de construir otra que sea mejor que la aceptada con anterioridad. En resumen, Newton piensa que las hipótesis son aceptables, incluso útiles, para dos propósitos: Para ilustrar la teoría y sugerir experimentos.

3.4.3 La Respuesta de Huygens

La crítica de Huygens no fue compuesta, sino hasta el enero de 1673, ya que sus primeras cartas, enviadas en abril de 1672, omitían su opinión sobre la teoría de la diferente refrangibilidad de Newton, dedicándose a expresar elogios y dudas referentes a

¹⁶⁷ *Ibíd.*

¹⁶⁸ *Ibíd.*, p. 90: Carta de 13 de abril de 1672, Respuesta de Newton a Pardies. No. 84, p. 4091.

¹⁶⁹ Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents*, p 106: Respuesta de Newton. No. 85, p. 5014,

los temas relacionados con el telescopio y las lentes (algo en lo que Huygens estaba trabajando en esa época). Las objeciones de Huygens le reprochó a Newton que introdujera un espectro continuo de colores simples, ya que consideraba que dos colores básicos (amarillo y azul) deberían ser suficientes para generar todos los demás colores.

Sin embargo, la carta de enero de 1673, mostraba un drástico cambio de actitud hacia la teoría de Newton. No solo demostró haber considerado las afirmaciones sobre la naturaleza de la luz y los colores, sino que también las sometió a una crítica seria. Además, el tono de sus comentarios se hizo más agudo. En su opinión, Newton complicó innecesariamente las cosas:

«[...]no veo por qué Monsieur Newton no se contenta con los dos colores amarillo y azul, porque será mucho más fácil encontrar alguna hipótesis por movimiento que explique estas dos diferencias, que por tantas diversidades como hay de otros colores. *Y hasta que no haya encontrado esta hipótesis no nos habrá enseñado en qué consiste la naturaleza y la diversidad de los colores, sino solo este accidente (que ciertamente es muy considerable) de su diferente refrangibilidad.* En cuanto a la composición del Blanco hecha por todos los Colores juntos, es posible que el Amarillo y el Azul¹⁷⁰ también sean suficientes para ello...». ¹⁷¹

En su respuesta a Huygens, Newton escribió:

«Si el Sr. Huygens quiere concluir algo, debe mostrar cómo se puede producir el blanco a partir de dos colores no mezclados; cuando lo haya hecho, le diré además por qué no puede concluir nada de eso». ¹⁷²

Lo que Newton quiso decir con esta frase fue que un blanco compuesto de dos colores primarios, si se pudiera producir, no tendría las mismas propiedades que la luz blanca proveniente del sol, ya que en el análisis de la luz del sol, se obtienen todos los colores del espectro. A Huygens no le convenció el argumento y, considerando que la respuesta de Newton era poco razonable e incluso algo ofensiva, respondió: «viendo que mantiene su opinión con tanto ardor, esto me priva del apetito de discutir». ¹⁷³

Aunque Newton respondió una última vez, para invitarlo a comparar algunos cálculos, Huygens no volvió a responder. ¹⁷⁴

3.4.4 Tres Críticos

Las objeciones de Hooke, Pardies y Huygens exhibieron el mismo patrón. A su entender, Newton proponía una visión corpuscular de la luz, según la cual, Newton deducía el resto de su doctrina. Los tres se refirieron a la teoría de Newton como una hipótesis, lo que implica que los experimentos podrían ser interpretados de otras maneras. Siendo ellos mismos inclinados hacia una visión según la cual la luz consistía en la transmisión del movimiento a través de un medio más que en el transporte de un cuerpo, o bien

¹⁷⁰ En su opinión, la luz blanca también puede producirse mezclando solo el amarillo y el azul.

¹⁷¹ Carta de Huygens a Newton. MS Add. 6086. La cursiva es mía. (Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents*, p 136).

¹⁷² Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents*, p 137: Respuesta de Newton a Huygens. MS Add. 6087.

¹⁷³ *Ibíd.*, p. 147: MS add 6112.

¹⁷⁴ Dijksterhuis, *Lenses and Waves*, p. 88-91.

propusieron hipótesis alternativas (Hooke y Pardies), o bien expresaron reservas con respecto a la teoría newtoniana (Huygens). Y, al mismo tiempo, sus propuestas no mostraron una apreciación suficiente de los hallazgos experimentales de Newton.

La estrategia de Newton ante la oposición encontrada fue negar que la visión corpuscular fuera una parte esencial de su teoría, tratando de convencer a sus críticos, en particular a Hooke, de que su propia hipótesis ondulatoria no se oponía en absoluto a su doctrina fundamental de la heterogeneidad original de la luz, aconsejando que se investigaran las propiedades de la luz independientemente de cualquier punto de vista sobre la naturaleza de esta, por último, afirmó que no era necesario en absoluto explicar su doctrina de los colores mediante ninguna hipótesis sobre la naturaleza de la luz; que su doctrina, que se basaba suficiente y firmemente en los experimentos, era absolutamente infalible.

Para Newton, las disputas no solo generaron resentimientos y enemistad, sino que también coartaron la libertad de perseguir sus propios intereses, debido a las frecuentes interrupciones que le generó la correspondencia suscitada después de la publicación de su artículo. Por lo que un año más tarde, el 23 de junio de 1673, escribió a Oldenburg que:

«Debo, como antes, significarles que no pretendo ser más solícito en asuntos de Filosofía. Por lo tanto, espero que no se sienta mal si usted y yo [nos abstenemos de] hacer algo más de su tipo, o más bien que me favorezca en mi determinación, previniendo en la medida de lo posible cualquier objeción u otras cartas filosóficas que puedan interesarme»¹⁷⁵.

3.5 Hipótesis sobre la luz.

Es momento de volver a las películas delgadas, su periodicidad y la búsqueda de una explicación. Como fue mencionado anteriormente, la *Hypothesis explaining the Properties of Light* fue compuesta para acompañar al *Discourse of Observations*, enviados a la Royal Society en 1675. El *Discourse*, donde redactaba las observaciones y resultados obtenidos durante sus experimentos con películas delgadas fue transcrito con mínimas alteraciones a la *Óptica* para formar la mayor parte del Libro II,¹⁷⁶ razón por la cual no se tratará durante este capítulo. *Hypothesis* tenía un tono y contenidos muy distintos al *Discourse*, que contaba con experimentos para sostener sus argumentos, mientras que por su parte, *Hypothesis* contenía ideas que no podían ser demostradas siguiendo observaciones, pero que podían contribuir a la comprensión y sugerir nuevas vías de investigación, encaminadas a explicar las observaciones planteadas en *Discourse*, es decir, tenía como objetivo plantear una serie de ideas que sugerían la naturaleza de la luz y cómo esta podía explicar los anillos formados en películas delgadas.¹⁷⁷

Con esto en mente, en *Hypothesis*, Newton describe la existencia de un éter, un «medio de la misma constitución del aire, pero menos denso, sutil y más fuertemente elástico»¹⁷⁸,

¹⁷⁵ Newton, *The Correspondence of Isaac Newton*, p. 291.

¹⁷⁶ Las dos primeras partes del Libro II de la *Óptica* y las seis primeras proposiciones de la Parte 3, con un total de 69 páginas impresas, siguen al *Discourse* casi palabra por palabra, posteriormente, Newton agregó nuevo material, y cambió la numeración; pero la esencia y la mayor parte de los detalles en los dos textos es la misma. Algunos de estos detalles incluyen, por ejemplo, la reelaboración de los números de la tabla donde da los espesores de las películas de diversos materiales en los que se ven anillos de colores. (Hall, *All Was Light: An Introduction to Newton's Opticks*.)

¹⁷⁷ Aames, *The Development of Newton's Theory of Fits*, p. 6.

¹⁷⁸ *Hypothesis explaining the Properties of Light*. Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents*, p 180.

que penetra los poros de los cuerpos, un «medio vibrante como el aire; [...] [donde] las vibraciones son mucho más rápidas y minúsculas»¹⁷⁹. Son estas vibraciones las que utilizará Newton para dar una explicación a los anillos periódicos. Pero antes, Newton remarca que la luz «no es éter, ni su movimiento vibratorio, sino algo de un tipo diferente propagado desde cuerpos brillantes». Sin ceñirse a exponer una hipótesis definitiva al respecto, Newton explica que la luz bien puede consistir en «multitudes de inimaginables corpúsculos pequeños y rápidos de varios tamaños, [...] cualquier impulso o movimiento de cualquier otro medio o un espíritu etéreo difundido a través del cuerpo principal de la otra». Newton prefiere, dadas las consecuencias de publicaciones anteriores, mantener su hipótesis de manera general, dejando al lector hacer su propia conjetura, haciendo la aclaración de que: «cualquier cosa que sea la luz, supongo, consiste en rayos que difieren unos de otros [...] Y además, supongo que es diferente de las vibraciones del éter»¹⁸⁰, donde tanto el éter como la luz, actúan uno sobre otro mutuamente.

Usando todas estas suposiciones, Newton es capaz de proveer una explicación al fenómeno de los anillos formados en películas delgadas. Para ilustrarlo hace uso de una analogía acústica o de ondas en el agua que ya conocemos: así como una piedra golpea la superficie del agua, causando vibraciones en la superficie de ella, los rayos de luz que llegan a la superficie de éter en la superficie de un cuerpo, causan vibraciones en el éter que se propagan en todas direcciones:

«Y para explicar esto, supongo, que los rayos, cuando inciden en la superficie rígida y resistente, [...] causan vibraciones en ella, como lo hacen las piedras arrojadas al agua en su superficie; y que estas vibraciones se propagan por todas partes tanto en los medios menos densos como en los más densos».¹⁸¹

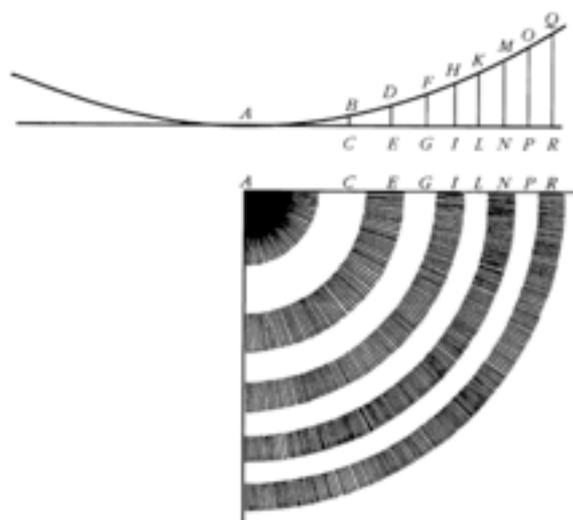


Fig. 25. Aquí, ARQ es la película delgada formada entre la lente ABQ y la placa ACR. BC, DE, FG, etc. el espesor de la película delgada. (Ilustración tomada de Shapiro, *Fits, Passions, and Paroxysms*, p. 80).

¹⁷⁹ *Ibíd.*, p. 181.

¹⁸⁰ *Hypothesis explaining the Properties of Light*. Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents*, p. 187.

¹⁸¹ *Ibíd.*, p. 188.

Además, estas vibraciones en el éter, supone Newton, deben viajar a una velocidad mayor a la de la luz a través del medio. Siendo así, como las vibraciones tienen un movimiento similar a un pulso, esto que hace que el medio se expanda y contraiga alternativamente. Cuando el rayo de luz se aproxima a una superficie refractante a medida que el medio se expande, pasará fácilmente a través de la superficie y, por lo tanto, se transmitirá al medio adyacente. Sin embargo, si el rayo se acerca a la superficie a medida que el medio se contrae, el rayo no puede pasar a través de ella. Y así, en lugar de ser transmitido, se refleja.

Sea a ARQ (Fig. 25) una película delgada de aire formada entre la lente ABQ y la placa plana ACR. Y donde los anillos son vistos desde arriba de la lente. En BC, la luz se encontrará con la parte comprimida de la primera «onda etérea» adelantada, siendo reflejada en C, por lo que se verá un anillo brillante; en el doble de grosor, DE, se encontrará con una onda etérea expandida, de tal forma en E, la luz será transmitida, y veremos un anillo oscuro; en el triple de grosor BC, es decir FG, se encontrará la parte comprimida de una onda etérea y, por lo tanto, la luz será reflejada. Y así sucesivamente. El intervalo entre cada vibración u onda, es decir, una compresión y expansión completa (la «longitud de onda») es llamado por Newton *bigness* o espesor de una vibración.¹⁸²

Entonces, si un rayo de luz es reflejado o transmitido a una distancia dada del centro de los anillos es determinado por si el espesor de la película a esa distancia es un múltiplo par o impar del intervalo de media vibración del éter (es decir, la distancia necesaria para que el éter pase de un estado comprimido a un estado expandido, o de un estado expandido a un estado comprimido). Así, la luz se refleja en múltiplos de 1, 3, 5, 7, etc. del intervalo, y se transmite en múltiplos de 2, 4, 6, 8, etc. en una progresión aritmética, consistente con las observaciones de Newton.

Para cerrar esta carta, Newton hizo mención de otro extraño fenómeno: «una extraña desviación de la luz, causada en su paso cerca del borde de una navaja de afeitar, un cuchillo u otro cuerpo abierto en una habitación oscura; los rayos, que pasan muy cerca del borde, se desvían en todos los ángulos hacia la sombra del cuchillo».¹⁸³

Newton se refiere al fenómeno de la difracción, descubierto por Francesco Grimaldi, un profesor de matemáticas en el Jesuit College en Bologna y que fue descrito en su trabajo *Physico-mathesis de lumine* (1666), donde aunque sus experimentos fueron llevados a cabo hábilmente, fue incapaz de aportar nada sustancial a su teoría.¹⁸⁴

Hasta entonces, Newton había explicado los patrones de interferencia formados en películas delgadas usando ondas en el éter, teoría que modificaría en la *Óptica*; y había mencionado apenas su interés por tratar el fenómeno de la difracción. Pero por el momento, no explicó nada más al respecto.

3.6 Creación y Publicación de la *Óptica*.

Normalmente, somos testigos sencillamente de la obra terminada y desconocemos lo que ocurrió durante su proceso de creación. En este caso es posible saberlo, estudiando y analizando las cartas intercambiadas, los diferentes borradores, las notas sueltas. En el

¹⁸² Más tarde, en la *Óptica*, este sería el intervalo de los accesos de fácil reflexión y transmisión.

¹⁸³ *Hypothesis explaining the Properties of Light*. Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents*, p. 198.

¹⁸⁴ Cajori, *A History of Physics in Its Elementary Branches Including the Evolution of Physical Laboratories*, p. 199.

artículo *Twenty-Nine Years in the Making: Newton's Opticks* (2008), Alan E. Shapiro ofrece un relato exhaustivo donde analiza las diferentes etapas de aquella idea que acabó consumándose con la publicación de la *Óptica*. Al existir tal proeza de artículo, mi deber aquí es hacer un resumen de dicho proceso, que inició probablemente en el año 1675, aunque dejaría reposar la idea en su cajón unos años más. Serían dos sus periodos principales de composición: en 1687 (y quizá principios de 1688) y 1691/2. Y el momento en el que el libro solo tomó su forma final hasta 1703.¹⁸⁵ 29 años desde el nacimiento de la idea. 16 años para ir dándole forma al proyecto. Ambos largos periodos para integrar un libro.¹⁸⁶

La idea inicial ocurrió quizás en el invierno de 1675. Esto lo sabemos gracias a una carta (fecha con el 25 de enero de aquel año), dirigida a la *Royal Society*, negando su permiso para publicar el *Discourse* y la *Hypothesis*:

«Creo que será mejor suspender la impresión de los mismos por un tiempo porque tengo la idea de escribir otro conjunto de Observaciones para determinar la manera en que se producen los colores por medio del Prisma, el cual, si es que es realizado, debe precederlo [aquel que] ahora está en sus manos, y será mejor que se incorpore a él».¹⁸⁷

Al planear una discusión sobre «la manera en que se producen los colores por medio del Prisma», el tema que corresponde al Libro I de la *Óptica*, seguido del *Discourse*, Shapiro considera que «ya que Newton siguió esencialmente el plan de 1676 cuando empezó a escribir la *Óptica* en 1687, podemos datar legítimamente el origen de la *Óptica* en el invierno de 1675-76».¹⁸⁸ Pero, como él mismo reconoce, la *Óptica* también difiere de este plan original, ya que contiene nueva información que se fue añadiendo en el periodo de los 29 años que tardó en publicar el libro como tal, como por ejemplo, los colores de las placas gruesas, la difracción, y las *Queries*¹⁸⁹.

Así, durante la primera etapa de elaboración, entre 1687 y 1688, escribió un primer borrador para el Libro I de la *Óptica*, llamándolo *Fundamentum Opticae*, boceto que Newton terminó descartando, pues al iniciar la revisión del mismo decidió cambiar el idioma de escritura al inglés (una circunstancia afortunada, como veremos más adelante). En la obra publicada esto forma las dos partes que conforman el Libro I¹⁹⁰. Newton añadió entonces los axiomas y definiciones al principio de la Parte I, que le dan la apariencia de ser una obra más matemática de lo que es, ya que Newton apenas les usa en el texto.

Después dejó de lado su libro durante tres años, hasta 1691, donde tuvo lugar la segunda fase de escritura de la *Óptica*. Newton realizó la composición del Libro II, con muy pocos cambios en el texto correspondiente al manuscrito del *Discourse* de 1675. Es esta etapa la que involucró el último gran periodo de investigaciones experimentales en óptica por parte de Newton, donde realizó sus experimentos sobre la difracción y el descubrimiento

¹⁸⁵ Hall, *All was light*.

¹⁸⁶ En el artículo *Twenty-Nine Years in the Making: Newton's Opticks* de Alan Shapiro, se encuentra todo el proceso. Aquí haremos un pequeño resumen.

¹⁸⁷ Carta de Isaac Newton a Henry Oldenburg, fecha 25 de Enero 1675/6, Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents*, p. 280.

¹⁸⁸ Shapiro, *Twenty-Nine Years in the Making: Newton's Opticks*, p. 425.

¹⁸⁹ Es importante mencionar que, de acuerdo a las investigaciones de Shapiro, aunque el libro impreso de la *Óptica* esta compuesto por Libro I (Parte I y II), Libro II (Parte I a IV) y Libro III Parte I. El plan original contemplaba la Parte I (Libro I) compondría un Libro 1, la Parte II (Libro I) sería un Libro 2. El Libro II impreso, era llamado Libro 3, mientras que el Libro III, era llamado el Libro 4. (Ibid.).

¹⁹⁰ La primera etapa completada en la composición del Libro I consistió en el Libro I, Parte I, Objetos. 1-6 y Libro I, Parte II, Propositiones 1-6. El único material verdaderamente nuevo era el círculo de colores de Part. II, Prop. 6. (Ibid.).

de un fenómeno completamente nuevo: anillos de colores producidos en una placa gruesa transparente. Así, con casi 50 años de edad, Newton llevó a cabo su última gran investigación experimental, que culminó en el Libro II, Parte IV de la *Óptica*.¹⁹¹

Durante la segunda mitad de 1691, Newton inició una serie de revisiones, una especialmente delicada, pues como había expuesto en la *Hypothesis*, las películas delgadas tenían como explicación las ondas etéreas, mientras que para las placas gruesas había ideado la explicación de vibraciones corpusculares.¹⁹² Ambas explicaciones contradecían el objetivo de su *Óptica*, la cual pretendía «no explicar las propiedades de la luz mediante hipótesis, sino proponerlas y probarlas mediante la razón y experimentos». Es en este estadio donde Newton formuló su teoría de sus accesos de fácil reflexión y transmisión o *fits of easy reflection and easy transmission* (que veremos más adelante).

La *Óptica* casi estaba lista. Casi. Newton era incapaz de concluir la parte que correspondía a la difracción, incapaz de encontrar un modelo que lograra explicarla,¹⁹³ siendo muy probablemente, una de las principales razones por las que la publicación de la *Óptica* se retrasó doce años más.¹⁹⁴ Y es que incompleta como estaba, deseaba «evitar disputas sobre estos asuntos, hasta ahora he retrasado la impresión, y aún seguiría retrasada, si la insistencia de los amigos no hubiera prevalecido sobre mí».¹⁹⁵

De hecho, según el relato tradicional, Newton retrasó la publicación de la *Óptica* hasta después de la muerte de Hooke, en marzo de 1703. Sostendremos, sin embargo, que la razón principal del retraso era que el trabajo se hallaba incompleto.¹⁹⁶

Así, este libro inició con una idea. Esta idea se transformó en un plan que luego se pospuso, los años pasaban, años que revelan un largo y complejo desarrollo que implicó no solo cambios de opinión respecto al idioma, varios manuscritos inacabados y corregidos; además de la adición de material nuevo, a través de nuevos experimentos y el recuento de otros que habían ocurrido tiempo atrás. Un trabajo que persuadido por «la insistencia de los amigos», aún sabiéndolo incompleto, decidió publicar, no sin antes añadir: «solo algunas *Queries* [cuestiones o interrogantes], con el fin de que otros puedan hacer una búsqueda más profunda». El carácter inacabado de la *Óptica* es aún más notorio en el hecho de que las Cuestiones fueron aumentando con el tiempo, en la primera edición inglesa (1704), eran 16 cuestiones; en la primera edición latina (1706) agregó siete más, llegando a 23. En la segunda edición inglesa (1717), agregó otras ocho, numerándolas de la 17 a la 24, convirtiéndose las que eran de la 17 a la 23 (de la edición latina) en las cuestiones que van de la 25 a la 31. Las siguientes ediciones, la segunda edición latina (1719) y la tercera inglesa (1721) no agregó ninguna nueva cuestión.¹⁹⁷

En la portada (Fig. 26) podemos leer *Opticks: or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflexions and Colours of Light*, con tres palabras resaltadas en rojo: *Opticks, Light,*

¹⁹¹ Shapiro, *Huygens' 'Traite De La Lumière' and Newton's 'Opticks': Pursuing and Eschewing Hypotheses*, pp. 238-239.

¹⁹² Shapiro, *Twenty-Nine Years in the Making: Newton's Opticks*, p. 430.

¹⁹³ Los manuscritos relacionados con la *Óptica* nos permiten identificar la causa del problema de Newton. Había desarrollado un modelo de difracción que suponía que los trayectos de las franjas eran idénticos o coincidían con los trayectos rectilíneos de los rayos que los producían, pero luego llevó a cabo un experimento que refutó de forma concluyente esta suposición.

¹⁹⁴ Shapiro, *Twenty-Nine Years in the Making: Newton's Opticks*, p. 433.

¹⁹⁵ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. iii.

¹⁹⁶ Shapiro, *Twenty-Nine Years in the Making: Newton's Opticks*, p. 435.

¹⁹⁷ Marquina, *La Tradición de Investigación Newtoniana*, p. 47, nota 187.

Curvilinear Figures. La portada no muestra el nombre del autor¹⁹⁸, aunque eso no significa que desee esconderlo al lector, no tenía caso hacerlo, quienes habían leído sus trabajos previos en óptica reconocerían las ideas que había utilizado en escritos anteriores, mientras que el prefacio les indicaba la identidad de *I. N.*¹⁹⁹ Con estas características, la *Óptica* fue finalmente presentada a la *Royal Society* el 16 de febrero de 1704.

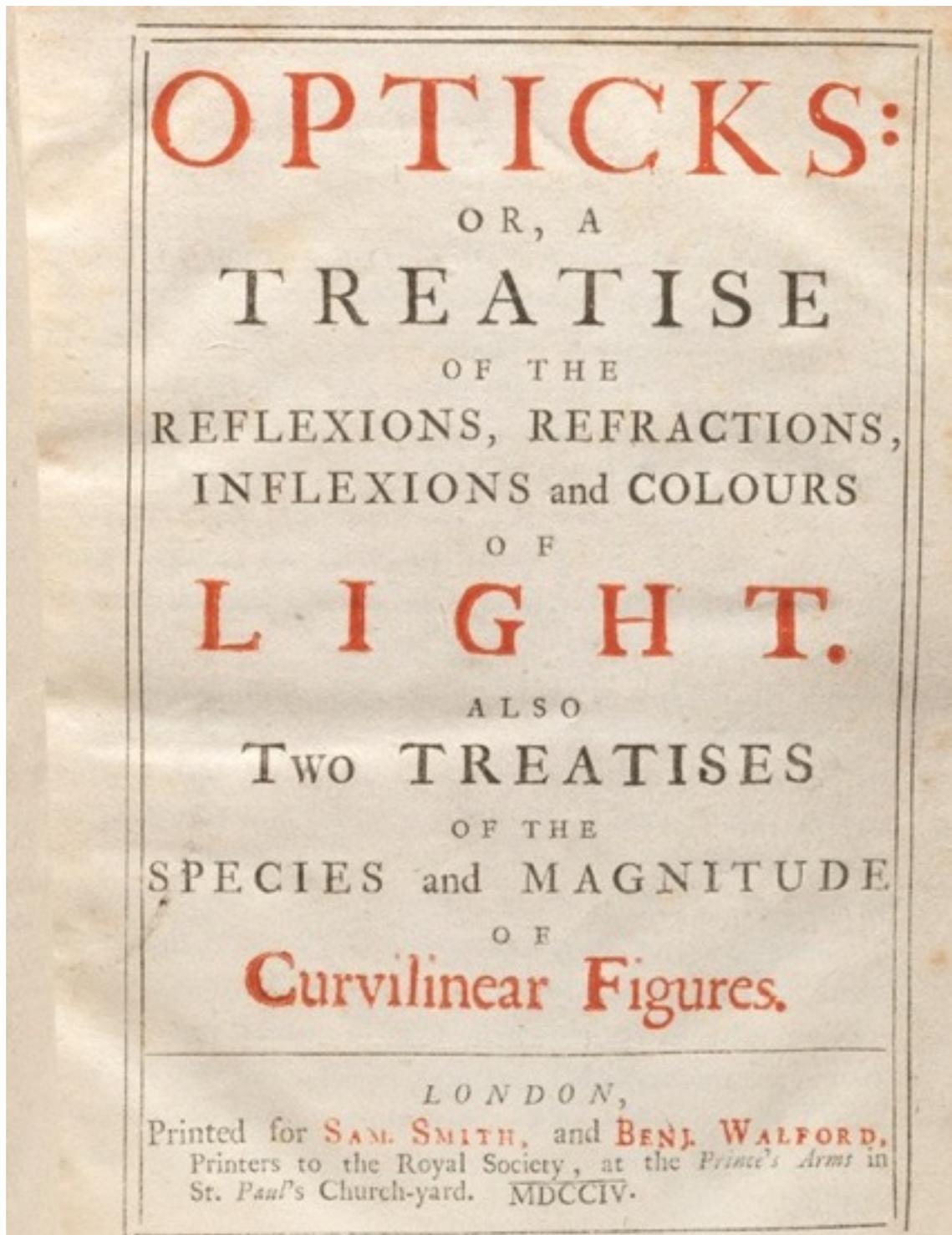


Fig. 26. Portada de la *Óptica* (1704) de Newton. Las palabras *Opticks*, *Light*, *curvilinear figures*, *Sam Smith* and *Benj Walford* están impresas en rojo. (Ilustración tomada de Cohen, *Missing Author*, p. 16: De la copia en Grace K. Babson collection of Newtoniana in the Burndy Libray, Massachussetss Institute of Technology).

¹⁹⁸ Sin embargo, apunta Cohen, existe al menos una copia de la *Óptica* de 1704, con el nombre del autor en la portada (Cohen, *The Case of the Missing Author*).

¹⁹⁹ Cohen, *The Case of the Missing Author*. p. 15.

CAPÍTULO 4. ÓPTICA

Introducción

Agradecimientos, razones para el retraso de su publicación y con la intención de «comunicar lo que he intentado, y dejar el resto a otros para que lo investiguen»²⁰⁰, caracterizan el *advertisement* escrito por Newton para su *Óptica*, cuyo diseño «no es explicar las propiedades de la Luz por hipótesis, sino proponerlas y demostrarlas por Razón y Experimentos», una simple y directa declaración de intenciones por parte de Newton.

Más adelante en la *Óptica*, Newton reafirma su compromiso con esta filosofía experimental, mediante su método de análisis-síntesis:

«Este análisis consiste en hacer experimentos y observaciones, y en extraer conclusiones generales a partir de ellos por inducción, y en no admitir objeciones contra las conclusiones, al menos en la medida en que sean tomadas de los experimentos o de otras verdades ciertas. Pues las hipótesis no deben considerarse en la filosofía experimental».²⁰¹ Mientras el análisis posibilita el pasar de «los efectos a las causas y de estas causas particulares a las más generales, hasta que el argumento termina en la más general»²⁰², una vez completado este, Newton procede al método de composición o síntesis, como él lo llama, que «consiste en suponer las causas descubiertas y establecidas como principios y en explicar con ellos los fenómenos, procediendo a partir de ellas y demostrando las explicaciones».²⁰³

Así, el método de análisis consiste en descubrir las causas que originan los fenómenos desde su observación. Mientras que la síntesis «devuelve» el proceso y busca demostrar que tales causas, efectivamente, originan los fenómenos que se quieren explicar y otros.

Sin más preámbulo, procederé a explicar el contenido y objetivo de este capítulo que consiste de un resumen de la *Óptica*, que está dividida en tres libros: El Libro I, en dos partes, cubre su teoría de la diferente refrangibilidad (Parte I), y la teoría de la luz blanca y los colores (parte II). El libro dos consta de cuatro partes, sobre los fenómenos ópticos producidos en películas delgadas y películas gruesas. El libro III, Parte 1, que considera de manera breve el fenómeno de la difracción, que Newton llamó inflexión y termina con una serie de *Queries*, donde nos concentraremos en aquellas donde discute la naturaleza corpuscular de la luz, su crítica a la teoría ondulatoria y su propuesta de solución a la doble refracción del Espato de Islandia.

4.1 Libro I. Diferente refrangibilidad y Color.

4.1.1 Definiciones y Axiomas.

Newton abre su *Óptica* con ocho definiciones y ocho axiomas, una parte matemática que parece más bien una excepción al contenido general de la obra, que consta en su mayor parte de experimentos y observaciones.

²⁰⁰ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. cxxii.

²⁰¹ *Ibíd.*, p. 404.

²⁰² *Ibíd.*, p. 404.

²⁰³ *Ibíd.*, p. 405.

En las primeras seis definiciones, Newton expone su concepción de los rayos de luz («Entiendo [por los rayos] las Partes más pequeñas, [...] porque es manifiesto que la Luz consiste en Partes»²⁰⁴), la reflexibilidad («su Disposición a ser reflejada [...] de nuevo en el mismo Medio desde cualquier otro Medio sobre cuya Superficie ha caído»²⁰⁵), la refrangibilidad («su Disposición para ser refractada o desviada de su Camino al pasar de un cuerpo transparente o Medio a otro»²⁰⁶), además de la definición de los ángulos de refracción y reflexión.

Prosigue con las definiciones VII y VIII, que asocian la uniformidad de la refrangibilidad y el color con los términos descriptivos como «simple, homogéneo y similar», mientras que la diversidad de la refrangibilidad y el color entre los rayos se asocia con las palabras «compuesto, heterogéneo y disímil», haciendo eco de su artículo *New Theory*, sobre la luz homogénea y heterogénea.

Los ocho axiomas que siguen dan «la suma de lo que se ha tratado hasta ahora en óptica»²⁰⁷, es decir, óptica geométrica. Por lo que en esta parte, Newton explica la formación de imágenes, nombra la ley de reflexión en el axioma II, «El Ángulo de Reflexión es igual al Ángulo de Incidencia»²⁰⁸ y explica ley de refracción en el axioma V²⁰⁹: «El seno de incidencia se encuentra con precisión o muy cerca de una determinada relación con el seno de refracción».²¹⁰

Todo lo expresado en estos Axiomas había sido tratado más a fondo en las *Optical Lectures*. Está claro que Newton estaba ansioso por embarcarse rápidamente al propósito principal de su libro, dar forma a una nueva manera de explicar la óptica, basada en experimentos, sin verse retrasado por los detalles geométricos que no son esenciales para el estudio de las interacciones de la luz y la materia en sus principales manifestaciones, los colores.

4.1.2 Diferentes grados de refrangibilidad.

«La luz que difiere en color, difiere también en grados de refrangibilidad»²¹¹, indica la primera proposición de Newton, en la que se dispone a dar forma a su teoría de la diferente refrangibilidad a través de «pruebas por experimentos».²¹² En contraste con el artículo de 1672, donde Newton utilizaba un discurso en forma de relato para describir sus experimentos y observaciones, aquí se limita a explicar cada paso con precisión.

Y aún así, los dos primeros experimentos nos hacen recordar sus orígenes, pues hacen eco de aquél experimento redactado en sus *Quaestiones*: «un papel rígido oblongo y negro», dividido a la mitad en partes iguales, «una de estas partes la pinté con un color rojo y la otra con un azul [...] Este papel lo vi a través de un prisma de vidrio macizo,

²⁰⁴ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 1.

²⁰⁵ *Ibíd.*, p. 2.

²⁰⁶ *Ibíd.* p. 3.

²⁰⁷ *Ibíd.*, pp. 20-21.

²⁰⁸ *Ibíd.*, p. 5.

²⁰⁹ Aunque Newton simplemente explica la ley de refracción en este axioma, la retomará nuevamente en la proposición 6 (Libro I, Parte I).

²¹⁰ *Ibíd.*

²¹¹ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 20.

²¹² *Ibíd.*

cuyos dos lados a través de los cuales la Luz pasaba al Ojo eran planos y bien pulidos, y contenía un Ángulo de unos sesenta grados; al que llamo el Ángulo refractante del Prisma». ²¹³ Gracias a este experimento, fue que Newton concluyó que «[...] en ambos casos la Luz que viene de la mitad azul del Papel a través del Prisma al Ojo, sufre en circunstancias similares una Refracción mayor que la Luz que viene de la mitad roja, y por consiguiente es más refractante» ²¹⁴.

La proposición 2 está concatenada con la proposición anterior: «La Luz del Sol consiste en Rayos de diferente Refrangibilidad» ²¹⁵, iniciando la prueba de esta con un experimento (Experimento 3):

«En una cámara muy oscura, en un agujero redondo [...] en una ventana, coloqué un Prisma de Vidrio, por el cual el Rayo de la Luz del sol, que entró en ese agujero [...]». ²¹⁶

Un inicio que nos recuerda a *New Theory*, pero aquí Newton hace un mejor trabajo al informar al lector sobre la importancia de muchos detalles, primero, se asegura de que el prisma esté en la posición de desviación mínima (girando el prisma hasta el punto en que el espectro se detiene y luego invierte su movimiento), posteriormente describe la forma y las dimensiones de la imagen, observando que si el prisma se gira en diferentes posiciones, la imagen puede hacerse más larga o más corta, explica las ventajas de la posición de desviación mínima, describe las dimensiones que resultan con prismas que tienen ángulos de refracción ligeramente diferentes (64, 62½, 63½ grados) y también con un prisma de agua. En el Experimento 5 Newton agrega un segundo prisma inmediatamente después del primero e incluso nos dice que «algunas veces, puse un tercer prisma tras el segundo y aún un cuarto tras el tercero» ²¹⁷, lo cual muestra como va enriqueciendo las pruebas experimentales. El experimento 6 marca la reaparición del *experimentum crucis*, que se une a la demostración de Newton, quien, habiendo aprendido con qué facilidad podía ser malinterpretado, dio descripciones detalladas de numerosos experimentos, contruidos todos con la finalidad de demostrar que la luz solar (y nótese que aquí Newton ya no se refiere a la luz blanca en general, simplemente a la luz solar) es una «mezcla heterogénea de rayos, unos de los cuales son más refrangibles que los otros». ²¹⁸

Como podemos ver Newton avanza de manera cautelosa, construyendo experimentos a partir de los anteriores para completar la demostración de las proposiciones generales, lo que es aún más evidente en su siguiente proposición (Proposición 3), donde Newton ni siquiera debe hacer experimentos nuevos, se limita a citar experimentos de la prueba de la proposición anterior: «Esto es manifiesto por los noveno y décimo experimentos». ²¹⁹

Así, la estructura de la *Óptica* invita al lector a una actividad cooperativa, sino experimental («un Novato podría intentarlos fácilmente» ²²⁰), al menos mental, diseñada

²¹³ *Ibíd.*

²¹⁴ *Ibíd.*, p. 21.

²¹⁵ *Ibíd.*, p. 26.

²¹⁶ *Ibíd.*

²¹⁷ *Ibíd.*, p. 19.

²¹⁸ *Ibíd.*, p. 63.

²¹⁹ *Ibíd.*

²²⁰ *Ibíd.*, p. 25.

para llevar al lector a un destino: comprender y aceptar la teoría de los diferentes grados de refrangibilidad de la luz, llegando a «la verdad» a través de una serie de experimentos.

4.1.3 Prueba de la Ley de Refracción.

En la proposición 6, Newton retoma la ley de los senos de la refracción, explicada en el quinto axioma, la cual ha sido encontrada exacta por «los últimos escritores en óptica»²²¹, sin embargo, ellos «al no entender la diferente Refrangibilidad de los Rayos, los concibieron todos para ser refractados de acuerdo a una y la misma Proporción, [...]; de modo que de sus medidas podemos concluir solamente que los Rayos que tienen un grado medio de Refrangibilidad [...]. Por lo tanto, ahora debemos demostrar que las Proporciones similares dadas obtienen en todo el resto. Es muy razonable que así sea, siendo la Naturaleza siempre conforme a sí misma; pero se desea una Prueba experimental».²²²

Newton realiza entonces un experimento cuyo objetivo es demostrar que la ley de los senos es válida para todos y cada uno de los rayos de colores de forma separada, sin embargo, esta «prueba experimental»²²³ se transforma en una prueba matemática, cuando al final del experimento, Newton escribe:

«[...] en este Experimento se obtienen las Proporciones de las Tangentes de las Refracciones, de donde se derivan las Proporciones de los Senos, que son iguales, en la medida en que son observados los Espectros y usando algún Razonamiento matemático, se podría estimar. Porque no hice un cálculo preciso. Así que entonces la Proposición es verdadera en cada Rayo aparte, hasta donde aparece por Experimento. Y que esto es exactamente cierto, puede ser demostrado en esta Suposición. *Que los Cuerpos refractan la Luz actuando sobre sus Rayos en Líneas perpendiculares a sus Superficies*».²²⁴

Para realizar esta demostración, Newton indica que va a descomponer «el Movimiento de cada Rayo en dos Movimientos, el uno perpendicular a la Superficie refractante, el otro paralelo a ella»²²⁵. Para el movimiento perpendicular, establece la siguiente Proposición (para la cual no realiza demostración alguna):

«Si cualquier Movimiento o cosa en movimiento incidiera con cualquier velocidad en cualquier espacio amplio y delgado terminado a ambos lados por dos Planos paralelos, y en su paso a través de ese espacio se instara perpendicularmente hacia el Plano más lejano por cualquier fuerza que a determinadas distancias del Plano sea de cantidades determinadas; la velocidad perpendicular de ese Movimiento o Cosa, al salir de ese espacio, será siempre igual a la Raíz cuadrada de la suma del cuadrado de la velocidad perpendicular de ese Movimiento o Cosa en su Incidencia sobre ese espacio; y del cuadrado de la velocidad perpendicular que ese Movimiento o Cosa tendría al Emerger, si en su Incidencia su velocidad perpendicular fuera infinitamente pequeña.

²²¹ *Ibíd.*, p. 76.

²²² *Ibíd.*

²²³ Lohne ha levantado objeciones sobre la realización del experimento, considerando que el diagrama que usa «es erróneo» y que «Pocas veces una ley física ha sido "demostrada" por experimentos tan inexactos y por deducciones tan defectuosas». Sin embargo, destaca que no desea «lanzar sospechas sobre el resto de los experimentos del prisma de Newton. Normalmente era muy meticuloso y preciso, y entre sus pocos "viajes" he seleccionado aquí el peor». (Lohne, *Newton's "Proof" of the Sine Law and His Mathematical Principles of Colors*, p. 391).

²²⁴ La cursiva es de Newton (*Ibíd.*, p. 79).

²²⁵ *Ibíd.*

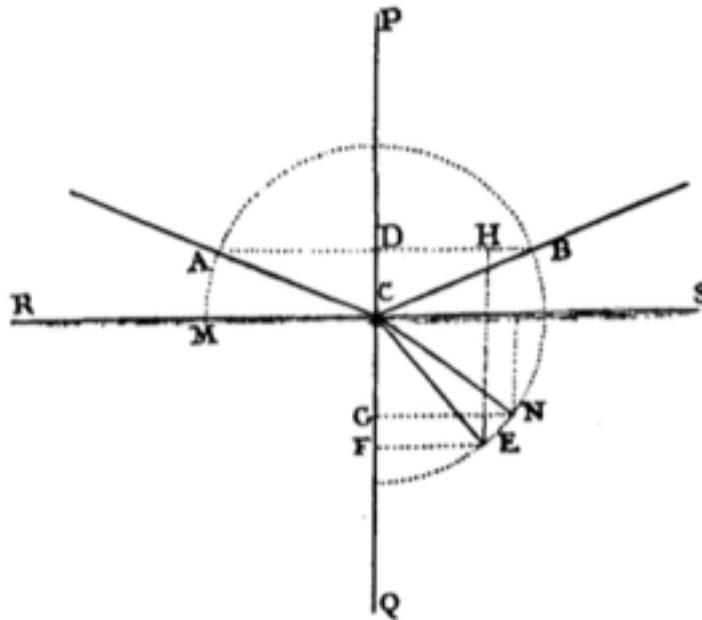


Fig. 27. Diagrama para demostrar la Ley de los Senos de la Refracción. MC y AC son dos rayos incidentes a la superficie RS, mientras que CN y CE son dos rayos refractados. (Ilustración tomada de Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 6).

Y la misma Proposición se aplica a cualquier Movimiento o Cosa perpendicularmente retardada en su paso por ese espacio, si en vez de la suma de los dos Cuadrados tomas su diferencia». Newton continúa:

«Supón ahora que un Rayo que cae oblicuamente en la línea MC [en la Fig. 27.] es refractado en C por el plano RS en la Línea CN, y es necesario encontrar la línea CE en la que se refractará cualquier otro rayo AC; sea MC, AD, los Senos de Incidencia de dos Rayos, y NG, EF, los Senos de Refracción, Y que los movimientos iguales de los Rayos incidentes sean representados por las Líneas iguales MC y AC, donde el Movimiento MC es considerado paralelo al plano refractante. El otro Movimiento AC se descompone en dos movimientos AD y DC, donde AD es paralelo y DC es perpendicular a la Superficie refractante. De igual manera, que los Movimientos de los Rayos emergentes sean distinguidos en dos, de los cuales, los [movimientos] perpendiculares son [...]»²²⁶:

$$\frac{AD}{EF} = CF \quad 16)$$

$$\frac{MC}{NG} = CG \quad 17)$$

²²⁶ Newton, *Opticks 4th ed.*, pp. 80-81.

Por lo tanto, explica Newton, si la velocidad perpendicular del rayo CN es 16), entonces la velocidad perpendicular de otro rayo emergente CE es 17)²²⁷. Usando entonces la proposición anterior²²⁸, tenemos que:

$$\frac{AD}{EF}CF = \sqrt{CD^2 + \frac{MC^2}{NG^2}CG^2} \quad 18)$$

Entonces,

$$\frac{AD^2}{EF^2}CD^2 = CD^2 + \frac{MC^2}{NG^2}CG^2 \quad 19)$$

Pero,

$$AD^2 = MC^2 - CD^2 \quad 20)$$

Entonces sumando cada término 20) en 19),

$$AD^2 + \frac{AD^2}{EF^2}CD^2 = CD^2 + \frac{MC^2}{NG^2}CG^2 + MC^2 - CD^2 \quad 21)$$

De ahí obtenemos:

$$\frac{(EF^2)(AD^2) + (AD^2)(CF^2)}{EF^2} = \frac{(NG^2)(MC^2) + (MC^2)(CG^2)}{NG^2} \quad 22)$$

Y luego tenemos:

$$\frac{AD^2}{EF^2}(EF^2 + CF^2) = \frac{MC^2}{NG^2}(NG^2 + CG^2) \quad 23)$$

Pero, observemos que:

$$EF^2 + CF^2 = NG^2 + CG^2 \quad 24)$$

²²⁷ Newton utiliza un círculo, donde cualquier línea del semicírculo inferior tiene que ser multiplicada por el factor de escala si se busca su verdadera magnitud. El factor de escala de un círculo A, con respecto a un círculo B viene dado por r_A/r_B .

²²⁸ La ecuación que Newton establece en el pasaje anterior es $v_2 = u_2 + f$, donde v_2 es la velocidad final (es decir, la velocidad al emerger del plano más lejano), u la velocidad inicial (es decir, la velocidad perpendicular de la velocidad en la incidencia del primer plano) y f una constante que puede encontrarse cuando u es infinitamente pequeña, esto es casi cercana a cero. por lo que $v_2 = f$, donde v sería la velocidad del rayo refractado. Así, el cuadrado de $(MC/GN)CG$ se añadirá al cuadrado de la componente vertical de cualquier rayo incidente en la superficie del círculo superior, y la raíz resultante de la suma será la nueva componente vertical en la mitad inferior.

Entonces,

$$\frac{AD^2}{EF^2} = \frac{MC^2}{NG^2} \quad 25)$$

Por lo tanto,

$$\frac{AD}{EF} = \frac{MC}{NG} \quad 26)$$

«Donde AD, el Seno de Incidencia, es a EF el Seno de Refracción, como MC a NG, es decir, en un radio dado»²²⁹, concluye Newton.

Es decir:

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = n, \quad 27)$$

donde n es una constante.

Notemos además que, aunque Newton no deduce esto en términos de velocidades, podemos obtener esto considerando que «Y si la fuerza del Plano refractante comienza a actuar sobre los Rayos [...] ese Movimiento del Rayo que es paralelo al Plano refractante no sufrirá ninguna alteración por esa fuerza; y ese Movimiento que es perpendicular a él será alterado de acuerdo con la regla de la Proposición anterior»²³⁰, esto es que la fuerza refractante actúa solamente en la dirección normal a la superficie, podemos escribir:

$$v_i \text{sen}(i) = v_r \text{sen}(r) \quad 28)$$

donde $v_i \text{sen}(i)$ es la componente horizontal del rayo incidente y $v_r \text{sen}(r)$ es la componente horizontal del rayo refractado, por lo tanto;

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{v_r}{v_i} \quad 29)$$

Y concluye diciendo:

«Y esta Demostración siendo general, sin determinar qué es la Luz, o por qué tipo de fuerza se refracta, o asumiendo algo más allá de que el Cuerpo refractante actúa sobre los Rayos en Líneas perpendiculares a su Superficie; lo tomo como un Argumento muy convincente de la plena verdad de esta Proposición. Entonces, si la proporción de los

²²⁹ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 81.

²³⁰ *Ibíd.*

Senos de Incidencia y Refracción de cualquier tipo de Rayos se encuentra en un solo caso, se da en todos los casos [...]»²³¹

Aquí Newton asegura, como hace en repetidas ocasiones durante el desarrollo de la *Óptica*, que esta demostración no requiere de ninguna hipótesis adicional sobre la naturaleza de la luz, sin embargo, Bechler (1973) señala que Newton eligió utilizar un círculo (Fig. 27) como diagrama para «oscurecer» el hecho de que MC/NG iguala el radio de velocidades V_i/V_r , por lo que la hipótesis a nivel de entidades no observables está implícita. De esta manera, Newton podría referirse a los componentes de los rayos sin referirse explícitamente a las velocidades.²³²

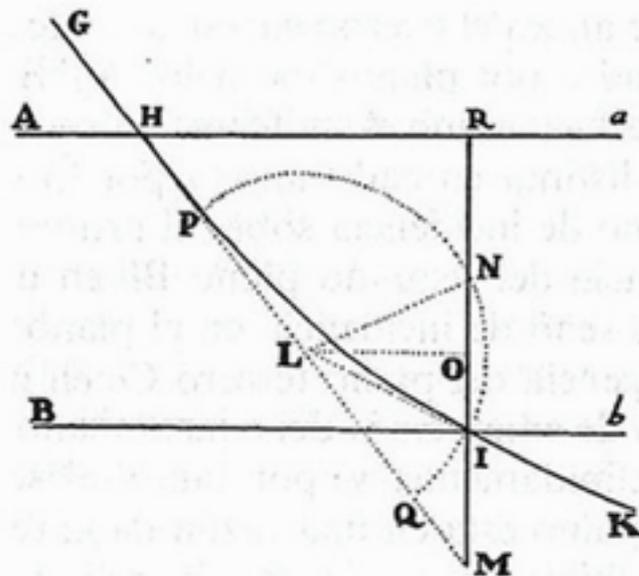


Fig. 28. Newton considera una situación en la que una partícula en movimiento pasa a través de una región entre dos superficies paralelas Ab y Bb . Cuando la partícula llega al primer plano, se supone que es «atraída o impulsada» por una fuerza perpendicular cuya acción es la misma a igual distancia de cualquiera de los dos planos. La influencia de esta fuerza no se extiende fuera de la región terminada y la partícula no es perturbada en ningún punto de su viaje por ninguna otra fuerza, por lo que la fuerza actuante es constante. La componente de partículas de la velocidad incidente y el movimiento acelerado o retardado en la dirección perpendicular, la partícula emergerá a través del segundo plano tangencialmente al elemento de la parábola en ese plano. Newton demuestra que los ángulos de incidencia QMI y refracción MIK obedecen a la ley de Snell. Newton, *Principios Matemáticos De La Filosofía Natural*, p. 1377).

Por otro lado, historiadores como Shapiro (2017)²³³ y Sabra (1981)²³⁴ mencionan, que la prueba de la proposición 94 de los Principia, Libro I, sección 14 sirvió como base para la demostración de la *Óptica*:

«Si dos medios semejantes se hallasen separados entre sí por un espacio delimitado a ambos lados por planos paralelos y un cuerpo al pasar por este espacio es atraído o impelido perpendicularmente hacia uno u otro medio sin ser ni agitado ni impedido por ninguna otra fuerza, y la atracción fuese la misma en todas partes a distancias iguales de

²³¹ Newton, *Opticks 4th ed.*, pp. 81-82

²³² Bechler, *Newton's Search for a Mechanistic Model of Colour Dispersion*, p. 30

²³³ Shapiro, *Newton's Optical Experiments and Theories*, p. 9

²³⁴ Sabra, *Theories of Light*, p. 303

uno y otro plano tomadas hacia la misma parte del mismo: digo que el seno de incidencia en uno u otro plano estará respecto al seno de emergencia del otro plano en una razón dada».²³⁵

Donde además señala una la analogía entre el movimiento de estos cuerpos y la luz:

«Las reflexiones y refracciones de la luz no difieren mucho de estas atracciones, al efectuarse aquéllas según una razón dada de las secantes, como descubrió Snell, y, por consiguiente, según una razón dada de los senos, como explicó Descartes».²³⁶

Por lo tanto, aunque Newton intentaba proponer una prueba estrictamente matemática de la ley de refracción, al final no pudo eliminar todos los rastros que mostraban que, a un nivel implícito, su demostración se basaba en la suposición de que la luz consiste en *corpúsculos*.

Habiendo realizado esta prueba de la Ley de Refracción, Newton está por cerrar la primera parte del Libro I de la *Óptica*, no sin antes dedicar las proposiciones VI a VIII al telescopio reflectante.

Y con una agenda para la ciencia de la luz mucho más amplia de lo que apenas indica la primera parte, Newton se dispone a resolver el problema que ha desconcertado a muchas de las mentes que le precedieron: El problema del color.

4.1.4 Libro I. Parte 2: Color

El color y sus propiedades, la dispersión de la luz y la formación de arcoíris son los temas que Newton estudia en esta parte. La teoría del color de Newton inicia caracterizando los rayos de luz como entes no coloreados en sí mismos, en los que hay «un cierto Poder y Disposición para despertar una Sensación de tal o cual Color. [...] la luz y los rayos de luz no pueden ser llamados coloreados; no tienen color sino una tendencia a producir color cuando iluminan objetos visibles. Hay una disposición en los rayos para producir colores»²³⁷

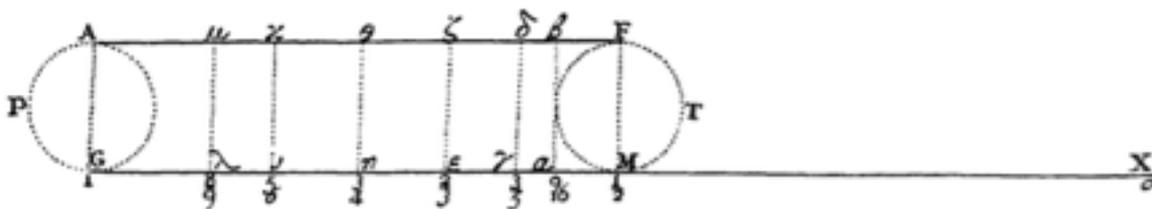


Fig. 29. El espectro de luz, dividido de acuerdo a una escala musical, son intervalos sucesivos, GX, λX, ιX, ηX, εX, γX, αX, MX, proporcionales entre sí, como los números, 1, 8/9, 5/6, 3/4, 2/3, 3/5, 9/16, 1/2, que corresponden a los colores rojo, naranja, amarillo, verde, azul, índigo y violeta, respectivamente. (Ilustración tomada de Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 127).

²³⁵ Newton, *Principios Matemáticos De La Filosofía Natural*, p. 1377.

²³⁶ *Ibíd.*, p. 1391.

²³⁷ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 124.

Habiendo establecido lo anterior, Newton ahora recurre a una determinación más precisa y matemática del color, trazando líneas para separar los diferentes campos de color en el espectro (Fig. 29), llega a la conclusión de que los colores están dispuestos de la misma manera que los tonos en la escala musical, es decir, las líneas que separan dos colores diferentes tienen distancias ajustadas de acuerdo a las proporciones de las notas correspondientes:

«GX, λX, ιX, ηX, εX, γX, αX, MX, proporcionales entre sí, como los números, 1, 8/9, 5/6, 3/4, 2/3, 3/5, 9/16, 1/2, y así para representar los Acordes de la Llave, y de un Tono, un tercer Menor, un cuarto, un quinto, un sexto Mayor, un séptimo, y un octavo sobre esa Llave: Y los intervalos Mα, αγ, γε, εη, ηι, ιλ, y λG, serán los espacios que ocuparán los distintos Colores (rojo, naranja, amarillo, verde, azul, índigo, violeta)»²³⁸.

La analogía entre los colores y la armonía musical dotó a Newton de una lógica conveniente que le permitía elegir fracciones precisas para los límites de los colores.

Después de terminar su relato de esta analogía musical, Newton llegó a una conclusión más general, a través de dos teoremas: el primero implicaba que para dos colores sobre a y b, existía una relación entre los índices de refracción que se respetaba para cualesquiera dos interfaces; el segundo teorema proporcionaba la relación que existe entre los índices de refracción de tres diferentes interfaces²³⁹. Con esto, Newton dejaba establecidas las bases para una nueva forma matemática para tratar de manera exhaustiva los fenómenos del color:

«Y estos Teoremas siendo admitidos en las *Óptica*, habría suficiente espacio para manejar esa Ciencia de una manera nueva; no solo enseñando aquellas cosas que tienden a la perfección de la Visión, sino también determinando matemáticamente todo tipo de Fenómenos del Color que podrían ser producidos por las Refracciones. Para hacer esto, no hay nada más necesario que descubrir las Separaciones de los Rayos heterogéneos, y sus diversas Mezclas y Proporciones en cada Mezcla».²⁴⁰

4.1.5 Mezcla de colores.

Tras el análisis del color, Newton retoma su síntesis, creando un dispositivo para calcular qué colores resultarán cuando se mezclen rayos de diferentes tipos. Por ejemplo, el amarillo y el rojo «prismáticos» pueden combinarse para formar un naranja; y la adición de luz blanca a un color simple o compuesto no hace más que diluirlo y todos los rayos de color del espectro son necesarios para la formación de la luz blanca natural.

El dispositivo de Newton consistía en un círculo dividido en arcos proporcionales a los intervalos de las notas sucesivas de su división musical del espectro (fig. 30):

«La Circunferencia DEFGABCD, que representa toda la Serie de Colores [del espectro], de modo que de D a E sean todos los grados de rojo, en E el Color medio entre rojo y naranja, de E a F todos los grados de naranja, en F la media entre naranja y amarillo, de F a G todos los grados de amarillo, y así sucesivamente. Que p sea el Centro de Gravedad del Arco DE, y q, r, s, t, u, x, los Centros de Gravedad de los Arcos EF, FG, GA, AB, BC, y CD respectivamente, y sobre esos Centros de Gravedad que se describan

²³⁸ *Ibíd.*, pp. 126-127.

²³⁹ *Ibíd.*, p. 130.

²⁴⁰ *Ibíd.*, p. 135.

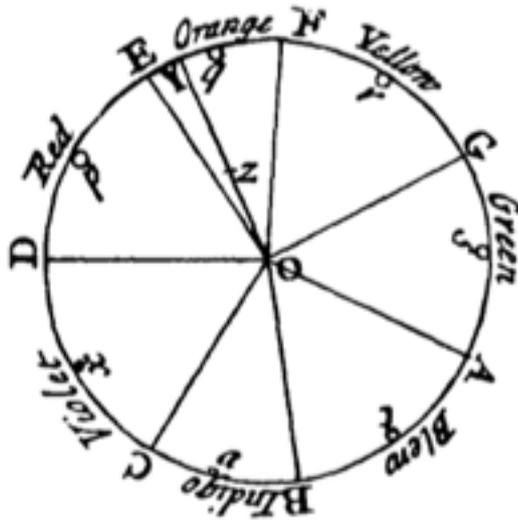


Fig. 30. Círculo Cromático de Newton. El círculo ADF con centro en O y radio OD, describe está dividido en siete partes (DE, EF, FG, GA, AB, BC, CD), donde cada una corresponde a un color en específico y todos sus grados de color (por ejemplo, el fragmento DE contiene todos los «grados» de rojo), mientras que los puntos D, E, F, etc, corresponden a las transiciones de colores decir, en el punto D, habría un color entre Violeta y Rojo. (Ilustración tomada de Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 155).

Círculos proporcionales al Número de Rayos de cada Color en la Mezcla dada; es decir, el Círculo p proporcional al Número de los Rayos que producen de rojo en la Mezcla, el Círculo q proporcional al Número de los Rayos que producen el naranja en la Mezcla, y así sucesivamente».²⁴¹

Luego marcó el centro de gravedad, z, de estos discos y el radio OY que los atraviesa. El punto Y en el círculo da el color resultante. La relación Oz/OY da la «amplitud o intensidad»²⁴² del color, así, en el centro del círculo (O) se halla el blanco y en cada rayo que se une al centro con un color espectral, sobre la circunferencia, van los distintos tonos del color, en gradación desde el blanco (saturación nula) hasta el color espectral (saturación máxima):

«[...] si Y cae en el medio entre F y G, el color compuesto será el mejor amarillo, si Y está en el medio hacia F o G, el color compuesto será amarillo, rayando hacia naranja o verde. Si Z cae sobre la Circunferencia, el Color será intenso y florido en el Grado más alto; si Y cae en el medio entre F y G, el color compuesto será el mejor amarillo, si Y está en el medio hacia F o G, el color compuesto será amarillo, rayando hacia naranja o verde. Si Z cae sobre la Circunferencia, el Color será intenso y florido en el Grado más alto si cae a mitad de camino entre la Circunferencia y el Centro, no será más que la mitad de intenso, es decir, será un Color como el que se haría diluyendo el amarillo más intenso con una cantidad igual de blancura [...]».

Sobre el círculo, advertía Newton, que no era más que una regla que concebía «lo suficientemente precisa para la práctica, aunque no matemáticamente exacta».²⁴³

²⁴¹ *Ibíd.*, pp. 154-155.

²⁴² *Ibíd.*, p. 156.

²⁴³ *Ibíd.*, p. 158.

Era entonces una regla empírica, lo suficientemente buena para la práctica, no así para otros fines, para determinar los colores producidos por cualquier mezcla de colores simples, un dispositivo de cálculo.

Finalmente, Newton cierra el Libro I con la explicación de la formación del arcoíris que, en esencia, es una función del índice de refracción del agua y la forma circular o globular de la gota, explicados por Newton en términos de la refracción y la reflexión interna de la gota. Al proporcionar una teoría de múltiples índices de refracción, uno para cada tipo diferente de rayo de luz, Newton fue capaz de proporcionar un único principio que explicaba tanto la forma como los colores del arcoíris.

4.2 Libro 2: Películas Delgadas y *Fits*

4.2.1 Películas Delgadas

En el Libro II, Newton publicó su estudio sobre las películas delgadas, compartido originalmente en *Discourse of Observations*, con muy pocas modificaciones²⁴⁴. Como en sus primeros experimentos al respecto, Newton unió dos lados de un par de prismas «que por casualidad eran un poco convexos»²⁴⁵, para que «pudieran tocarse entre sí en algún lugar»²⁴⁶, después, girando estos prismas, para que el ángulo de visión se vuelva más oblicuo, Newton explica la aparición de estrías de colores (Fig. 31):

«Estos arcos en su primera aparición eran de color violeta y azul, y entre ellos había arcos de círculos blancos, que actualmente, continuando con el "Movimiento de los Prismas", se volvieron un poco teñidos de rojo y amarillo en sus extremidades interiores, y en sus extremidades exteriores el azul era adyacente. De modo que el orden de estos Colores desde la mancha central oscura, era en ese momento blanco, azul, violeta; negro, rojo, naranja, amarillo, blanco, azul, violeta, &c. Pero el amarillo y el rojo eran mucho más tenues que el azul y el violeta. El Movimiento de los Prismas sobre su Eje continuó, estos Colores se fueron contrayendo más y más, encogiéndose hacia la blancura a ambos lados, hasta que se desvanecieron totalmente en él».

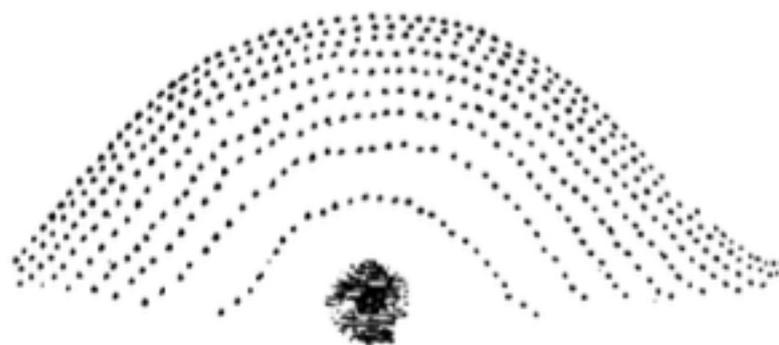


Fig. 31 Observación de estrías de colores en una película delgada formada entre la cara de dos prismas convexos. (Ilustración tomada de Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 195).

²⁴⁴ Ver nota 174 de este trabajo.

²⁴⁵ *Ibíd.*, p. 194.

²⁴⁶ *Ibíd.*

Después de reportar cuántas sucesiones de anillos de colores pudo producir y cómo mejorar las circunstancias de la observación, Newton intercambió prismas por lentes y, utilizando el método desarrollado en *Of Colours*²⁴⁷, para producir anillos concéntricos, pudo «determinar el intervalo de los vidrios o el espesor del aire interyacente, por el cual se produjo el color»²⁴⁸ y, al medir el diámetro de los anillos, Newton encontró una relación entre ellos en forma de una progresión aritmética.

Newton prosiguió sus observaciones utilizando luz monocromática, iluminando las lentes en un cuarto oscuro con los colores generados por un prisma, uno tras otro, notó que los anillos eran más nítidos y más numerosos que cuando se usaba luz blanca²⁴⁹. Los anillos más grandes estaban formados por luz roja, los más pequeños por el violeta²⁵⁰. En cada uno de estos casos, el fenómeno consistía simplemente en una serie de anillos oscuros y brillantes alternados, en los que la mancha oscura del centro y los anillos brillantes mostraban el mismo color con el que se iluminaban las lentes. Por lo tanto, era evidente que los anillos de colores formados cuando se utilizaba la luz blanca, eran el efecto combinado de un número indefinido de anillos monocromáticos. Newton observó que cuando las lentes se veían desde el lado de la fuente de iluminación, los anillos brillantes indicaban los lugares donde se reflejaba la luz, mientras que los oscuros indicaban los lugares donde se transmitía. Por lo que la luz era transmitida en el punto de contacto (de ahí el punto negro), reflejada en el lugar donde apareció el primer anillo brillante, transmitida de nuevo en el siguiente anillo oscuro, y así sucesivamente. Además, cuando se veía los colores formados por debajo, es decir, por transmisión, los anillos eran exactamente complementarios a los percibidos por reflexión y el punto central parecía brillante:

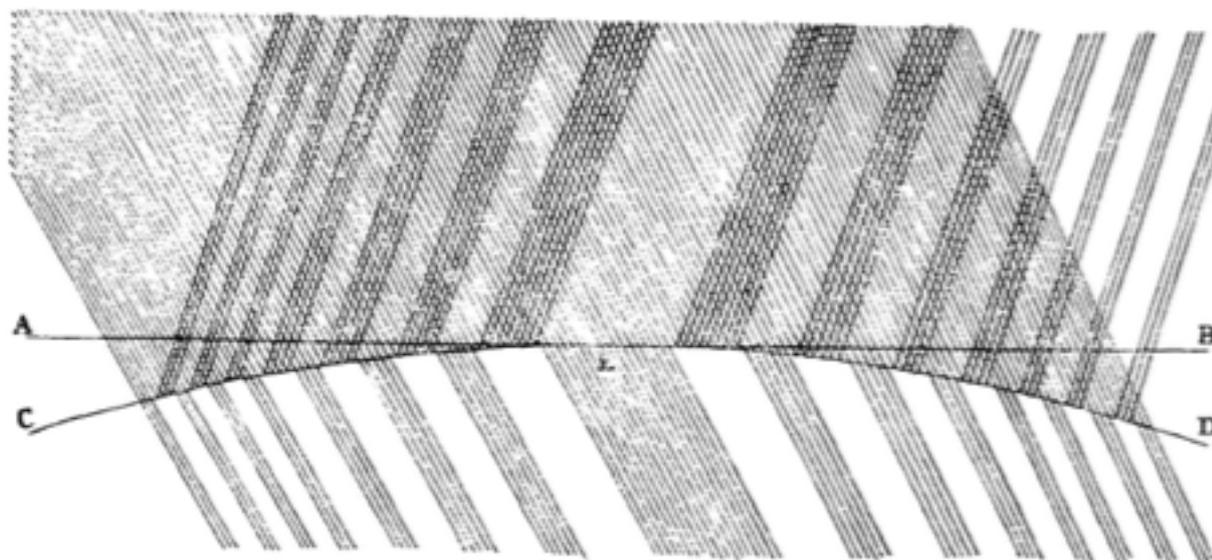


Fig. 32 Reflexión y transmisión de colores en una película delgada, para explicar el fenómeno de los anillos de colores.(Ilustración tomada de Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 213).

²⁴⁷ Parte de la investigación de la segunda libreta que examinamos en el Cap. 3, sección 3.2 de este trabajo.

²⁴⁸ *Ibíd.*, p. 201.

²⁴⁹ Observaciones 12 y 13 (*Ibíd.*, pp. 208-210).

²⁵⁰ *Ibíd.*, p. 211.

«Y de ahí se manifiesta el origen de estos Anillos; a saber, Que el Aire entre las Lentes, según su diverso espesor, se dispone en algunos lugares para reflejar, y en otros para transmitir la Luz de cualquier Color (como se puede ver representada en la [Fig. 32]) y en el mismo lugar para reflejar la de un Color donde transmite la de otro».²⁵¹

En las dos primeras partes del Libro II, Newton ha demostrado no solo que los colores formados en las películas delgadas pueden medirse, cuantificarse y predecirse, sino que también nos muestra que existe una íntima conexión entre las dimensiones de las películas delgadas y los rayos que se reflejan o transmiten.

Con esto, al finalizar estas dos secciones, Newton aún tienen que responder a varias preguntas, ¿cómo se explica la periodicidad de los colores formados? ¿Y qué relación tiene con la reflexión y la transmisión de los rayos de luz?

Newton deja por un momento estas preguntas pendientes, para explicar primero «los Colores permanentes de los Cuerpos naturales, y la Analogía entre ellos y los Colores de las Películas Delgadas transparentes». En este apartado, no es la luz el objeto de estudio, sino la herramienta que ayuda a descifrar la estructura de la superficie de los cuerpos.

El color en los cuerpos, sugiere Newton, está determinado por la constitución de sus superficies, por la reflexión selectiva de la luz con los «corpúsculos superficiales», intrínsecamente transparentes que la componen y que se adquieren color de la misma forma en que las películas delgadas, «de la multitud de reflexiones causadas en sus partes internas»²⁵², por lo que Newton comienza proporcionando una manera fácil de concebir los cuerpos macroscópicos como si estuvieran formados por películas delgadas:

«Las partes transparentes de los Cuerpos, de acuerdo a sus diferentes tamaños, reflejan los Rayos de un Color, y transmiten los de otro, sobre la misma base de que las Placas delgadas o Burbujas reflejan o transmiten esos Rayos. [...]

Porque si una Película Delgada, que siendo de un grosor uniforme, aparece por todas partes de un mismo color, debe ser cortado en Hilos, o roto en Fragmentos, del mismo grosor que la Película; no veo ninguna razón por la cual cada Hilo o Fragmento no deba mantener su Color y, por consiguiente, por qué un montón de esos Hilos o Fragmentos no debería constituir una Masa o Polvo del mismo Color, que la Película exhibía antes de que fuera rota. Y las partes de todos los Cuerpos naturales que son como tantos Fragmentos de una Placa, deben en los mismos terrenos exhibir los mismos Colores».²⁵³

Es decir, si un sólido uniforme y delgado se dividiera en un gran número de piezas pequeñas, esto no debería cambiar en absoluto los colores de la placa delgada que uno ve.

Así, Newton puede incluso determinar el tamaño de las «partes componentes de los cuerpos»²⁵⁴, a partir de sus colores. Por ejemplo, el verde de un cuerpo natural podría tener corpúsculos superficiales tienen un diámetro de 0.01625 pulgadas²⁵⁵. Incluso, Newton añade de manera optimista que:

²⁵¹ *Ibíd.*, pp. 212-214.

²⁵² *Ibíd.*, p. 246.

²⁵³ *Ibíd.*, pp. 251-252.

²⁵⁴ *Ibíd.*, p. 255.

²⁵⁵ *Ibíd.*

«No es imposible que los microscopios puedan ser mejorados en gran medida para el descubrimiento de las Partículas de los Cuerpos de los que dependen sus Colores, si es que no han llegado ya en alguna medida a ese grado de perfección».²⁵⁶

Newton cierra el apartado dedicado al color de los cuerpos con un anuncio, retomando las preguntas pendientes, sobre la producción de los anillos de colores en películas delgadas:

«He explicado hasta ahora el poder de los Cuerpos para reflejar y refractar, y mostrado, que las finas Películas, Fibras y Partículas transparentes, de acuerdo a sus varios espesores y densidades, reflejan varios tipos de Rayos, y por lo tanto aparecen de varios Colores; y por consiguiente nada más es requerido para producir todos los Colores de los Cuerpos naturales, que los varios tamaños y densidades de sus Partículas transparentes. Pero de dónde es que estas Placas, Fibras y Partículas, de acuerdo a sus varios espesores y densidades, reflejan varios tipos de Rayos, no he explicado todavía. Para dar una idea de este asunto, y dar paso a la comprensión de la siguiente parte de este Libro, concluiré esta parte con unas cuantas Proposiciones más. Los que precedieron respetan la naturaleza de los Cuerpos, esta es la naturaleza de la Luz: Porque ambos deben ser entendidos, antes de que la razón de sus Acciones el uno sobre el otro pueda ser conocida».

Y, antes de dar tales explicaciones, Newton se dispone a dar primero una explicación sobre la velocidad de la luz.

4.2.2 Accesos de Fácil Reflexión y Fácil Transmisión.

«La luz se propaga desde los Cuerpos luminosos en el tiempo, y pasa alrededor de siete u ocho minutos de una hora en pasar del Sol a la Tierra», escribe Newton en la Proposición 11 (Libro II, Parte III), un aproximado de poco más de 241,400 km/s²⁵⁷ y explica que esto ya ha sido observado por otros, empezando por Roemer, «por medio de los Eclipses de los Satélites de Júpiter»²⁵⁸.

Esta Proposición, actúa como preludeo para explicar por qué los rayos son reflejados o refractados por algunos intervalos pero no por otros en las películas delgadas. En las nueve proposiciones que siguen, Newton expone su teoría de la causa de los colores de las películas delgadas, una teoría que, para algunos autores resulta «altamente especulativa y quizá no del todo consistente»²⁵⁹, «austera y prístina»²⁶⁰, una «noción más económica [que las ondas etéreas]»²⁶¹, y que «será considerada como uno de los mejores especímenes de generalización»²⁶²

²⁵⁶ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 261.

²⁵⁷ El estimado de 7 u 8 minutos, tomando la distancia del sol para ser cerca de 70,000,000.000 de millas, concluyó que la velocidad de la luz era 700.000 veces mayor que la del sonido, que colocó a 1.140 pies ingleses por «segundo minuto de tiempo». Esto resultaría en una velocidad de algo más de 150.000 millas por segundo. (Boyer, *Early Estimates of the Velocity of Light*, p. 33).

²⁵⁸ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 277.

²⁵⁹ Sepper, *Newton's Optical Writings*, p. 140.

²⁶⁰ Walsh, *Newton's Scaffolding: The Instrumental Roles of His Optical Hypotheses*, p. 20.

²⁶¹ Darrigol, *A History of Optics*, p. 436.

²⁶² Brewster, *Optics*, 1830, p. 477. (Shapiro. *Fits, Passions, and Paroxysms*, p. 136).

Especulativa, abstracta, austera, notable, son algunos de los adjetivos que se han usado para describir a la teoría de los «accesos de fácil reflexión y transmisión», *fits of easy reflection and easy transmission*²⁶³, que Newton introduce con la siguiente proposición:

«Cada Rayo de Luz en su paso a través de cualquier Superficie refractante es puesto en una cierta Disposición o Estado transitorio, que en el progreso del Rayo retorna a intervalos iguales, y dispone el Rayo en cada retorno para ser fácilmente transmitido a través de la siguiente Superficie refractante, y entre los retornos para ser fácilmente reflejado por él».²⁶⁴

Es decir, asumiendo que el rayo ha sido transmitido por una superficie refractante, siempre estará dispuesto alternativamente para ser fácilmente transmitido o fácilmente reflejado por una segunda superficie, a intervalos iguales entre cada dos disposiciones. Newton define el concepto de accesos o *fits* de la siguiente manera:

«Los retornos de la disposición de cualquier Rayo a ser reflejado los llamaré sus accesos de fácil Reflexión, y los de disposición a ser transmitidos sus Accesos de fácil Transmisión, y el espacio que pasa entre cada retorno y el siguiente retorno, el Intervalo de sus Accesos».²⁶⁵

Invocando la noción de «intervalo» de los accesos, en lugar del intervalo de las vibraciones etéreas. Para establecer la periodicidad de los accesos, es decir, que estos siempre retornan a intervalos iguales, recurre, tal como esperamos, a sus observaciones de los anillos de Newton. Estos muestran que «un mismo tipo de rayos [...] se refleja y transmite alternativamente para muchas sucesiones en consecuencia, a medida que el espesor de la placa aumenta en la progresión aritmética de los números, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, &c [...]»²⁶⁶. Newton hace una siguiente afirmación, diciendo que los accesos se encuentran permanentemente impresos a los rayos, es decir, que la luz ya posee accesos incluso antes de encontrar una superficie refractaria y probablemente los posee cuando son emitidos por una fuente luminosa.

Newton ha sido cuidadoso al enfatizar que los accesos son solamente «disposiciones», además, también tuvo la delicadeza de no decir prácticamente nada acerca de su naturaleza u origen:

«¿Qué clase de acción o disposición es esta? ¿Si consiste en un movimiento circulatorio o vibratorio del rayo, o del medio, o de otra cosa? No lo investigo aquí».²⁶⁷

²⁶³ Newton tomó el término *fit* del uso médico que tenía en la época. Los *fits* describían ataques de una enfermedad recurrente, especialmente de fiebre intermitente, como ocurre en el caso de la malaria. La malaria era entonces una enfermedad común en su natal Inglaterra. Thomas Willis, en su *De feribus*, describió la naturaleza de la fiebre intermitente en los siguientes términos:

«Tiene ciertas remisiones, o tiempos o intermisiones; que todo *fit* comienza con frío o temblores, en su mayor parte, y termina en sudor; que las adhesiones o la llegada de los *fits*, resultan en un periodo fijo, y ciertos intervalos de tiempo, que un reloj no es más exacto».

Estos *fits* comparten características comunes con los *fits of easy reflection and transmission*: los *fits* van alternando entre dos fases opuestas, frío y calor, además, son periódicos. (Ibíd., p. 180).

²⁶⁴ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 278.

²⁶⁵ Ibíd., p. 281.

²⁶⁶ Ibíd., p. 278.

²⁶⁷ Ibíd., p. 280.

Sin embargo, Newton sí proporciona una «ayuda» para que pueda concebirse una idea de lo que puede ser la naturaleza periódica de los accesos, sugiriendo que:

«[...] como piedras al caer sobre el agua ponen el agua en un movimiento ondulante, [...] las vibraciones así excitadas [...] se mueven más rápido que los rayos para alcanzarlos; y que cuando cualquier rayo está en esa parte de la vibración que conspira con su movimiento, fácilmente entra a través de una superficie refractante, pero cuando está en la parte opuesta de la vibración que impide su movimiento, es fácilmente reflejado; y, en consecuencia, que cada rayo es dispuesto sucesivamente a ser reflejado, o fácilmente transmitido, por cada vibración que lo sobrepasa».²⁶⁸

Al retomar de manera explícita el concepto de medio vibratorio como una hipótesis, queda respaldado el argumento de que Newton abandonó las ondas etéreas precisamente por su naturaleza hipotética, algo que se supone no tenía cabida en la *Óptica*, entonces aunque de manera formal, Newton consideraba que las vibraciones eran connaturales del rayo en sí. Entonces, quizá, para entender mejor la naturaleza de los accesos es mejor compararla con las ondas etéreas que planteó en *Hypothesis*, donde las expansiones corresponden a accesos de fácil transmisión, mientras que las compresiones corresponden a los accesos de fácil reflexión.

Newton insistía, sin embargo que «ya sea que esta Hipótesis sea verdadera o falsa, no lo considero aquí. Me contento con el descubrimiento de que los rayos de luz, por una u otra causa, están dispuestos a ser reflejados o refractados por muchas vicisitudes».²⁶⁹

Esto podría bien suscitar la pregunta: ¿Fue la teoría de los accesos una simple abstracción? Y la respuesta sería que no, diversos estudios han mostrado que la teoría permite una descripción cuantitativa precisa de las películas delgadas y las placas gruesas. De hecho, la teoría no tuvo rival alguno hasta comienzos del siglo XIX.²⁷⁰

4.3 Libro III. Parte 1: Difracción (Inflexión)

Newton dedicó el tercer y último libro de la *Óptica* a relatar algunas de las observaciones que había hecho relativas a la difracción o, como él la llama, inflexión. Para iniciar, Newton recapitula la investigación de Grimaldi, quien «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 continuaran por los Cuerpos en Línea recta, y que estas Sombras tienen tres Franjas, Bandas o Rangos de Luz de color paralelos adyacentes a ellas».²⁷¹

Procediendo entonces a explicar sus propias observaciones al respecto. Inicia diciendo:

«En un pedazo de plomo, hice un pequeño agujero con un alfiler [...]. A través de este Agujero dejé entrar en mi Cámara oscura un rayo de Luz del Sol, y encontré que las Sombras de Cabellos, Hilos, Alfileres, Paja, y demás sustancias delgadas, colocadas en

²⁶⁸ *Ibíd.*

²⁶⁹ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 280,

²⁷⁰ Shapiro, *Huygens' 'Traite De La Lumière' and Newton's 'Opticks': Pursuing and Eschewing Hypotheses*, p. 241.

²⁷¹ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 317.

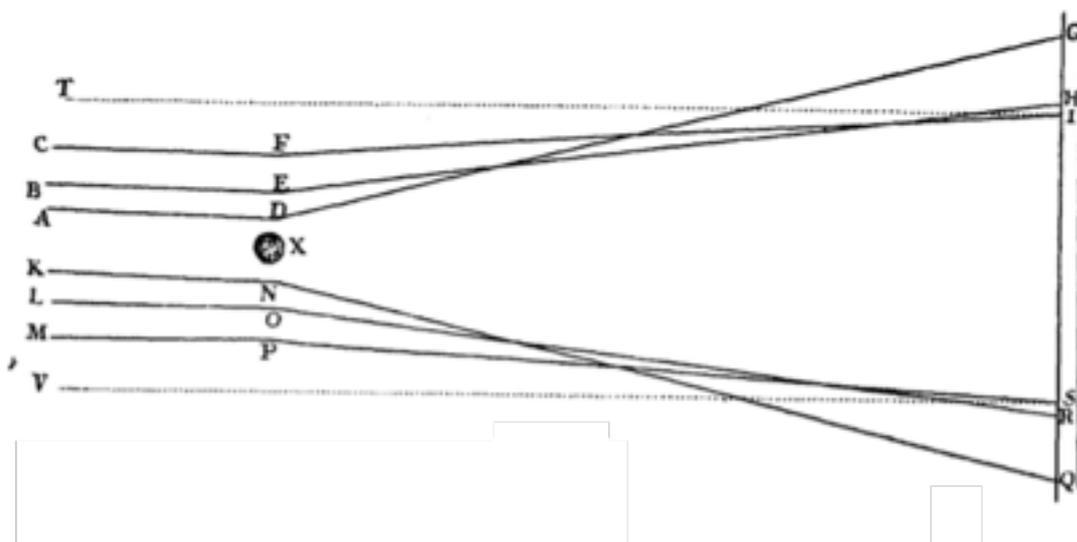


Fig. 33 Difracción/Inflexión de la luz por un cabello, de acuerdo con Newton. X representa la parte media del cabello; ADG, BEH, CFI, son tres rayos pasando por lado del cabello a diversas distancias, y KNQ, LOR, MPS, otros tres rayos que pasan por el otro lado del cabello. D, E, F, and N, O, P, son los lugares donde los rayos se «doblan» al pasar a un lado del cabello. El rayo CFG es menos difractado que el rayo ADG, el cual está más cerca del cabello. (Ilustración tomada de Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 321).

este rayo de Luz, eran considerablemente más amplias de lo que deberían ser, si los Rayos de Luz pasaban por estos Cuerpos en Líneas rectas»²⁷²

Particularmente, al utilizar un cabello, Newton observó que: «sostenido en esta Luz, a la distancia de unos doce Pies del Agujero, se proyecta una Sombra, a una distancia de cuatro pulgadas del Cabello, [...] cuatro veces más ancha que el cabello; y a la distancia de dos Pies del Cabello [...] diez veces más ancha que el cabello».²⁷³

Con esto, Newton comprobó de inmediato el paradójico ensanchamiento de la sombra de «sustancias delgadas colocadas en este rayo de Luz». Gracias a estas observaciones, Newton concluyó que los rayos que pasan cerca del cabello se curvan para alejarse de él «siendo esta acción más fuerte en los rayos que pasan a una menor una distancia, y que se debilitan cada vez más a medida que los rayos pasan a distancias cada vez mayores [como se representa en la Fig. 33]. De ahí que la Sombra del Cabello sea mucho más amplia en proporción a la distancia del Papel [o pantalla] del Cabello, cuando el Papel está más cerca del Cabello, que cuando está a una gran distancia de él».²⁷⁴

Además, Newton observó que las sombras de todos los cuerpos, al proyectarse sobre la pantalla, se encuentran bordeadas con «tres franjas paralelas o bandas de luz de colores, de las cuales la que estaba contigua a la sombra era la más ancha y luminosa, y la que estaba más alejada de ella era la más estrecha, y tan tenue, que no era fácil de ver».. Newton examinó el orden de los colores de estas franjas con el mayor cuidado posible, midiendo escrupulosamente la anchura de las sombras y las franjas, de hasta 1/340 de pulgada. Y se limita a decir que le parecía que los márgenes y los intervalos entre ellos

²⁷² *Ibíd.*, p. 318.

²⁷³ *Ibíd.*, pp. 318-319.

²⁷⁴ *Ibíd.*, pp. 319-320.



Fig. 34. Franjas de difracción formadas por la intersección de dos cuchillos. Las líneas rectas AC y BC representan los límites geométricos de la sombra de los cuchillos. (Ilustración tomada de Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 332).

formaban una «progresión continua de los Números 1, $\sqrt{1/3}$, $\sqrt{1/5}$ »²⁷⁵, sin ir más allá, reportando únicamente el resultado de sus observaciones.

Newton también describió la difracción utilizando las hojas de dos cuchillos separados ligeramente entre sí (Fig. 34) y encontró que:

«Cuando las franjas de las sombras de los cuchillos caen perpendicularmente sobre un papel a gran distancia de los cuchillos, tienen forma de Hipérbolas».²⁷⁶

La investigación de la difracción se interrumpe poco después. Este estudio breve e inconcluso de la inflexión/difracción apunta a la existencia de propiedades y fuerzas de la materia que solamente una investigación futura podría dilucidar, así que escribe:

«Cuando hice las Observaciones anteriores, planeaba repetir la mayoría de estas con más cuidado y exactitud, y hacer algunas nuevas [...] Pero fui interrumpido y ahora no puedo pensar en llevar estas cosas a una Consideración más profunda. Y como no he terminado esta parte de mi Plan, concluiré proponiendo solo algunas *Queries* [Cuestiones], con el fin de que se realice una búsqueda más amplia por parte de otros».²⁷⁷

Como podemos ver, la estructura de la *Óptica* es muy peculiar, consistiendo los en tres libros cuya «trama» se va debilitando, de tal manera que en Libro I, podemos ver cómo las proposiciones van demostrándose a partir de los experimentos, a través de los cuales, Newton intenta persuadir al lector de sus conclusiones; en el Libro II estos argumentos se van debilitando, constando principalmente de observaciones y consideraciones respecto a estas, con proposiciones que se «demuestran» sin el rigor mostrado en el Libro I. El Libro

²⁷⁵ *Ibíd.*, p. 325.

²⁷⁶ *Ibíd.*, p. 332.

²⁷⁷ *Ibíd.*, p. 338,

III termina con un conjunto de observaciones, donde a Newton le es imposible plantear conclusiones al respecto, por lo que terminan desembocando en 31 Cuestiones. La *Óptica* es un libro anti-climático, que inicia probando proposiciones con un fundamento enteramente empírico, y termina haciendo preguntas, que Newton responde, como veremos a continuación, basándose en especulaciones.

4.4 Cuestiones.

Las *Querries* o Cuestiones que siguen a los experimentos de difracción son preguntas y especulaciones audaces sobre la naturaleza de la luz, los colores, la visión, las interacciones fundamentales de la luz con la materia y la constitución básica del universo, razón por la cual, la *Óptica* ganó su reputación no solo como un ejemplo de ciencia experimental sino también como un bosquejo de todo el cosmos físico tal como fue concebido por la mente de Isaac Newton.

Las Cuestiones abren con especulaciones sobre la interacción de la luz y la materia: «¿Acaso los cuerpos no actúan a distancia sobre la luz y con su acción doblan los rayos?»²⁷⁸, «¿Acaso los rayos que difieren en refrangibilidad difieren también en reflexibilidad?»²⁷⁹. Entonces los pensamientos de Newton comienzan a extenderse más, hablando de la aparente interrelación de la luz y los cuerpos que da lugar al calor y ahora pregunta: ¿No hay un principio común en la materia que refleja, refracta o inflexiona los rayos de luz según las circunstancias, y a la inversa, la luz no actúa sobre los cuerpos para calentarlos?²⁸⁰. Y la estructura de la superficie de partículas de los cuerpos que percibimos como color también entra en esto, ya que la absorción de calor y luz varía con el tono de la superficie absorbente y reflectante.²⁸¹

Más adelante, las Cuestiones 12 a 16 hablan de los efectos de la luz que dan lugar a la visión, Newton escribe: «¿No excitan las vibraciones en la retina los rayos de luz que caen sobre el fondo del ojo?»²⁸², vibraciones que, al ser transmitidas por los nervios ópticos al cerebro, causan la vista. Además, Newton propone que la sensación de color está determinada por la *bigness* (o longitud de onda) de las vibraciones.²⁸³

Durante las Cuestiones 17-24, Newton especula sobre fenómenos que sugieren la presencia de algún tipo de materia incluso en lo que parece ser considerado vacío, un éter, «que llena todo el espacio adecuadamente sin dejar poros»²⁸⁴, una materia muy sutil que tiene propiedades le permiten servir como el medio responsable del comportamiento de la luz y, muy posiblemente es la causa de la gravedad:

«¿Acaso al alejarse a grandes distancias de ellos no se torna más y más denso, causando con ello la gravedad de esos grandes cuerpos entre sí y de sus partes hacia los cuerpos, al intentar cada uno de tales cuerpos alejarse de las partes más densas del medio [...]?»²⁸⁵

²⁷⁸ Cuestión 1 (Ibíd., p. 339).

²⁷⁹ Cuestión 2 (Ibíd.).

²⁸⁰ Cuestión 5 (Ibíd.).

²⁸¹ Cuestión 6. Ibíd.p. 339-340.

²⁸² Cuestión 12 (Ibíd., p. 345).

²⁸³ Cuestión 13 (Ibíd., pp. 345-346).

²⁸⁴ Cuestión 22 (Ibíd., p. 352).

²⁸⁵ Cuestión 21 (Ibíd., p. 350).

Así, poco a poco las preguntas y conjeturas se van ampliando, mientras unas tienen apenas unos renglones de longitud, otras alcanzan páginas enteras, convirtiéndose en ensayos del pensamiento de Newton, como es el caso de la Cuestión 31, que ocupa el mismo espacio que las primeras 30 Cuestiones juntas, donde pretende, entre otras cosas, dibujar un universo sometido a la acción de fuerzas, desde la gravitación, pasando por la electricidad y el magnetismo para llegar hasta la química y la cohesión de los cuerpos. Newton escribe en las primeras líneas de la Cuestión 31:

«¿No poseen las pequeñas partículas de los cuerpos ciertos poderes, virtudes o fuerzas con los que actúan a distancia no solo sobre la luz, reflejándola, refractándola o inflexionándola, sino también unos sobre otros, para producir una gran parte de los fenómenos de la naturaleza? En efecto, es bien sabido que los cuerpos actúan unos sobre otros por la acción de la gravedad, magnetismo y electricidad. Estos ejemplos muestran el talante y curso de la naturaleza, haciendo que no sea improbable la existencia de otras potencias atractivas además de estas, pues la naturaleza es muy consonante y conforme consigo misma. No examino aquí cómo se puedan realizar estas atracciones. Lo que denomino atracción puede realizarse mediante un impulso o cualesquiera otros medios que me resulten desconocidos [...]. Las atracciones de la gravedad, del magnetismo y de la electricidad alcanzan distancias claramente perceptibles, por lo que han sido observadas por ojos vulgares; sin embargo, puede haber otras que alcancen distancias lo suficientemente pequeñas como para haber escapado hasta ahora a la observación»²⁸⁶

La cuestión 31 se extiende, describiendo numerosas reacciones químicas, cuya explicación queda reducida a la acción de una fuerza actuando entre las partículas de las diversas sustancias que las componen, por ejemplo, Newton escribe: «cuando la sal de tártaro se disuelve *per deliquium*²⁸⁷ [...]¿acaso no se debe a la existencia de una atracción entre las partículas de la sal de tártaro y las partículas de agua que flotan en el aire en forma de vapor?»²⁸⁸ Newton continúa con ejemplos por varias páginas. Así, desde la formación de cristales, pasando por reacciones exotérmicas, la disolución de metales en ácidos y todo un catálogo de fenómenos químicos, Newton explica que todos estos podrían explicarse mediante el uso de fuerzas atractivas.

Pero detengámonos un poco en las Cuestiones 25, 26, 28 y 29, donde Newton desarrolló sus ideas sobre la doble refracción, la teoría ondulatoria y la teoría corpuscular de la Luz.

4.4.1 Doble refracción.

«¿No hay otras Propiedades originales de los Rayos de Luz, además de las ya descritas?»²⁸⁹, pregunta Newton en la Cuestión 25, «[u]n ejemplo de otra Propiedad original que tenemos en la Refracción del Cristal de Islandia, descrita primero por Erasmus Bartolinus, y después de manera más exacta por Huygens, en su Libro *De la Lumière*»²⁹⁰.

²⁸⁶ Cuestión 31 (Ibíd., pp. 375-376).

²⁸⁷ Significa literalmente, «por disolución» se refiere a los materiales higroscópicos que se dejan disolver en la humedad del aire. (Starkey, *Alchemical Laboratory Notebooks and Correspondence*. p. 344).

²⁸⁸ Ibíd., p. 380.

²⁸⁹ Ibíd., p. 354.

²⁹⁰ Ibíd.

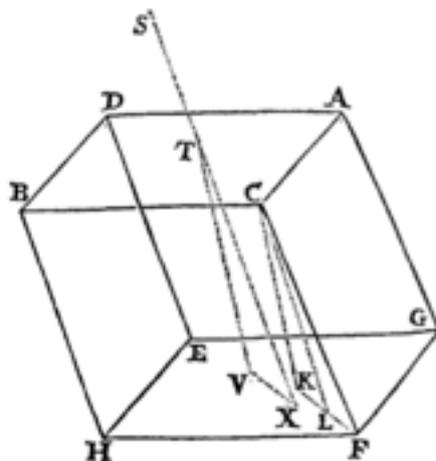


Fig. 35. Esquema de la doble refracción del Espato de Islandia. Donde, del rayo incidente ST, Newton observa un rayo «usual» TV y un rayo «inusual» TX. (Ilustración tomada de Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 356).

Newton describe este cristal como una «Piedra transparente como el Agua o el Cristal de la Roca, y sin Color y se encuentra en forma de un Paralelopípedo oblicuo, con seis Lados de paralelogramo y ocho Ángulos sólidos. Los ángulos obtusos de los paralelogramos son cada uno de ellos 101 grados y 52 minutos; los agudos 78 grados y 8 minutos».²⁹¹

Newton explica entonces aquella otra «propiedad original de los rayos de luz», por la que se preguntaba en un principio, la propiedad de la doble refracción, explicando que, mientras una de las refracciones obedece a ley de los senos, la otra refracción «se realiza con la siguiente regla»²⁹²:

«Sea ADBC la superficie refractante del cristal, C el mayor ángulo sólido en esa superficie, GEHF la superficie opuesta, y CK una perpendicular en esa superficie. Esta perpendicular hace con el borde del Cristal CF, un ángulo de $19^{\circ} 3'$. Une KF, y en él toma KL, para que el ángulo KCL sea de $6^{\circ} 40'$ y el Ángulo LCF $12^{\circ} 23'$. Y si ST representa cualquier rayo de Luz incidente a T en cualquier Ángulo sobre la Superficie refractante ADBC, que TV sea el rayo refractado determinado por la Proporción de los Senos 5 a 3, de acuerdo con la Regla usual de la óptica. Traza VX en paralelo e igual a KL. Trázalo de la misma manera en la que L se encuentra desde K; y al unir TX, esta línea TX será el otro rayo refractado llevado de T a X, por la Refracción inusual, [...] formando un ángulo VTX de $6 \frac{2}{3}$ grados, como ha sido encontrado por experiencia»²⁹³

Sin embargo, esta regla expresada por Newton para obtener la refracción extraordinaria, según Buchwald (1980), no funciona bien fuera de la sección principal.²⁹⁴

En la Cuestión 26, Newton intenta resolver el problema planteado en el experimento de dos cristales paralelos de Huygens, el problema de la polarización por doble refracción, proponiendo que «cada rayo de luz [...] tiene dos lados opuestos originales dotados de una propiedad de la que depende la refracción inusual, y los otros dos lados opuestos no

²⁹¹ *Ibíd.*, pp. 354-355.

²⁹² *Ibíd.*, p. 356.

²⁹³ *Ibíd.*

²⁹⁴ Buchwald, *Experimental Investigations of Double Refraction from Huygens to Malus.*, p. 327.

dotados de esa propiedad»²⁹⁵, siendo esta propiedad inherente a los rayos y no proveniente de ningún tipo de modificación de la luz.

Más adelante, Newton retoma la explicación de la doble refracción, en su modelo de la teoría corpuscular (Cuestión 29), pero antes, realiza una crítica a la teoría ondulatoria, donde usa el problema de la polarización contra la misma.

4.4.2 Crítica a la Teoría Ondulatoria

«¿No son todas las Hipótesis erróneas, en las que se supone que la Luz consiste en Presión o Movimiento, propagadas a través de un Medio fluido? Porque en todas estas Hipótesis los fenómenos de Luz se han explicado hasta ahora suponiendo que surgen de nuevas Modificaciones de los Rayos: lo cual es una Suposición errónea».²⁹⁶, inicia diciendo Newton, pues la Cuestión 28, tiene como objetivo poner un alto a las teorías de la luz como un movimiento ondulatorio, afirmando que la presión por sí sola no podría calentar los cuerpos, y que el movimiento instantáneo requeriría la acción de una fuerza infinita, además, la presión o el movimiento ondulatorio haría que la luz «se doblara en la sombras»:

«Por Presión o Movimiento [la luz] no se puede propagar en un Fluido en Líneas rectas, más allá de un Obstáculo que detiene parte del Movimiento [...]. Las Ondas en la Superficie del Agua estancada, pasando por los lados de un amplio Obstáculo que detiene parte de ellas, se doblan después y se dilatan gradualmente en el Agua tranquila detrás del Obstáculo. Las Ondas, Pulsos o Vibraciones del Aire, en las que consisten los Sonidos, se doblan manifiestamente, aunque no tanto como las Ondas de Agua».

Además, explicar los accesos de fácil reflexión y fácil transmisión mediante la teoría ondulatoria también tendría dificultades:

«[...] a menos que tal vez uno pueda suponer que hay en todo el Espacio dos Medios Eféreos vibratorios, y que las Vibraciones de uno de ellos constituyen la Luz, y las Vibraciones del otro son más rápidas, y tan a menudo como superan las Vibraciones del primero, las ponen en esos Accesos. Pero es inconcebible cómo dos Éter pueden ser difundidos a través de todo el Espacio, uno de los cuales actúa sobre el otro, y por consecuencia es reaccionado sobre, sin retardarse, destrozarse, dispersarse y confundirse el uno al otros».²⁹⁷

Y retomando el tema de la doble refracción del Espato de Islandia, Newton apunta directamente al fenómeno de la polarización:

«Para explicar la inusual Refracción del Cristal de Islandia por Presión o Movimiento propagado, no se ha intentado hasta ahora (que yo sepa) excepto por Huygens, quien para ese fin supuso dos medios vibratorios dentro de ese Cristal. Pero cuando probó las Refracciones en dos piezas sucesivas de ese Cristal, [...], se confesó incapaz de explicarlas».²⁹⁸

²⁹⁵ Newton, *Opticks 4th ed.*, p.360.

²⁹⁶ *Ibíd.*, p. 362.

²⁹⁷ *Ibíd.*, p. 364.

²⁹⁸ Newton hace una nota al pie, para citar a Huygens "Mais pour dire comment cela se fait, je n'ay rien trouve jusqu' ici qui me satisfasse. C. H. de la lumiere, c. 5, p. 91" (*Ibíd.*).

4.4.3 Naturaleza de la luz.

En la Cuestión 29, después de negar una y otra vez que existía una hipótesis sobre la naturaleza corpuscular de la luz presente en su trabajo, Newton escribe:

«¿No son los Rayos de Luz cuerpos muy pequeños emitidos por sustancias brillantes? Porque tales Cuerpos pasarán a través de Medios uniformes en Líneas rectas sin doblarse en la Sombra, que es la Naturaleza de los Rayos de Luz».²⁹⁹

La luz, en el universo de Newton, es entonces un cuerpo de una clase particular que, al estar en constante interacción con las demás cosas materiales de la naturaleza, lo hacen de acuerdo con las fuerzas que la gobiernan:

«Las Sustancias Pelúcidas actúan sobre los Rayos de Luz a distancia para refractarlos, reflejarlos e inflexionarlos, y los Rayos agitan mutuamente las Partes de esas Sustancias a distancia para calentarlos; y esta Acción y Reacción a distancia se asemeja mucho a una Fuerza atractiva entre Cuerpos».³⁰⁰

Con esto, Newton es capaz de explicar todos los fenómenos estudiados. Escribe, por ejemplo que la refracción es efectuada por una fuerza atractiva, «los Senos de la Incidencia deben ser a los Senos de la Refracción en una proporción dada, como lo demostramos en nuestros Principios de Filosofía: Y esta Regla es cierta por experiencia»³⁰¹.

Newton explica también el fenómeno del color, tomando en cuenta el tamaño de las partículas de luz:

«Nada es más necesario para producir toda la variedad de Colores, y grados de Refrangibilidad, que los Rayos de Luz sean Cuerpos de diferentes Tamaños, el menor de los cuales puede tomar el violeta el más débil y oscuro de los Colores, y ser desviado más fácilmente refractando Superficies del Curso correcto; y el resto, a medida que son más grandes y más lúcidos, puede hacer los Colores más fuertes y lúcidos, el azul, el verde, el amarillo, y el rojo, y ser desviados más y más difícilmente».³⁰²

Así, la refracción extraordinaria del Espato de Islandia que da explicada si se interpreta que «por algún tipo de virtud atractiva alojada en ciertos Lados tanto de los Rayos, como de las Partículas del Cristal».³⁰³ De esta forma, esta «disposición o virtud» del cristal actúa sobre esta «disposición o virtud» de los rayos, «como los Polos de dos Imanes responden el uno al otro»³⁰⁴, siendo esta disposición diferente al magnetismo de los cuerpos, pues «parece ser de otro tipo»³⁰⁵.

²⁹⁹ *Ibíd.*, p. 370.

³⁰⁰ *Ibíd.*, p. 370-371.

³⁰¹ Newton se refiere a la demostración de los Principia, Libro I, Sección 14, proposición 94, de la que hablamos anteriormente. (*Ibíd.*, p. 371).

³⁰² *Ibíd.*, p. 372.

³⁰³ *Ibíd.*, p. 373.

³⁰⁴ *Ibíd.*

³⁰⁵ *Ibíd.*, p. 374.

4.5 Recepción de la Óptica.

La *Óptica* no pudo tener mejor recepción en el siglo XVIII. Amparada por la fama que le habían acarreado los *Principia* (1687) a su autor, sus resultados fueron ampliamente estudiados y aceptados entre los estudiosos de la época. Además, el contenido de la *Óptica* adquirió gran popularidad y una presencia casi obligatoria en la vida cultural de la sociedad de entonces. El libro no requería casi ningún conocimiento matemático y presentaba un gran número de experimentos muy bien descritos que poco a poco iban construyendo la teoría óptica de Newton, algunos de los cuales no requerían nada más que prismas, papel y luz de sol.

Al estar escrito en inglés y con un estilo expositivo que transmitía de forma asequible la complejidad de las leyes naturales que ahí recoge, con una prosa clara y un discurso neutral, se volvió accesible no solo para los científicos consumados y aficionados, si sino también para literatos y poetas, así como al público no especializado, ávidos todos de tratar entender a «Newton con sus primas y su cara silenciosa. [...]» y su «mente siempre viajando a través de extraños mares del pensamiento»³⁰⁶, como escribían los poetas, que encontraron en la *Óptica* inspiración y guía para su trabajo³⁰⁷.

Pero la *Óptica* no se popularizó solamente a través de la poesía³⁰⁸, sino también gracias a conferencias públicas y libros cortos dedicados al público en general.

Las conferencias de John Teophilous Desaguliers (1683-1744), por ejemplo, se convirtieron en una especie de patrón a seguir. En sus conferencias, Desaguliers presentó la filosofía natural como un conjunto de verdades indudables sobre la naturaleza ejemplificadas por varios experimentos fáciles de comprender y manejar, exploró partes específicas de la *Óptica* que se basaban principalmente de experimentos con prismas. En *Physico-mechanical Lectures* (1717), una selección de temas discutidos en sus conferencias, Desaguliers asumió que el carácter corpuscular de la luz era evidente a partir de la observación de fenómenos ópticos simples, como la refracción:

«[...] que la Luz es un cuerpo, aparece por su Reflexión, Refracción, Composición, División y movimiento en el Tiempo; pero sobre todo por su propagación en Líneas rectas».³⁰⁹

³⁰⁶ Poema de Wordsworth (Nicolson, *Newton Demands the Muse*, p. 2).

³⁰⁷ Los poetas «no solo se preocupaban por incorporar en su obra el simbolismo de la luz, sino que lo hacían en términos más o menos Newtonianos». Hubo algunos a los que no les gustaba esta retórica «científica» y decían que Newton «había destruido la poesía del arcoíris reduciéndola a su forma prismática» (Ibíd. p. 32). Para otros, sin embargo, «El sol nunca fue más hermoso para ellos que cuando brillaba en todo su esplendor meridiano, con su luz fluyendo a través del éter en líneas rectas, refractada lo menos posible por la atmósfera, las nubes o la niebla. Se deleitaban en su propia madurez intelectual [...]. No creían que Newton había quitado belleza a la poesía; él había añadido nueva belleza, porque había añadido una nueva verdad». (Ibíd.).

³⁰⁸ La preocupación por simplificar, aclarar y comunicar el lenguaje científico condujo a una serie de obras populares que intentaban educar al público en general sobre los descubrimientos de Newton y su visión del mundo. Entre estos estaban los *Physico-mechanical Lectures* (1717) de J. T. Desaguliers y *Discours sur les différentes figures des astres avec une exposition des systemes de MM. Descartes et Newton* (1732) de Maupertuis', los *Elements de la philosophie de Newton* (1738) de Voltaire, y *An Account of Sir Isaac Newton's Philosophy* (1748) de Colin Maclaurin's. Además de trabajos biográficos acerca de Newton: *A View of Sir Isaac Newton's Philosophy* (1728) de Henry Pemberton; y *Memoirs of Sir Isaac Newton's Life* (1752) de William Stukeley. Algunas de las composiciones inspiradas en los escritos de Newton estaban destinadas a mujeres y niños, como *Tom Telescope: The Newtonian System of Philosophy, Explained by Familiar Objects, In an Entertaining Manner, For the Use of Young Persons and A Plain and Familiar Introduction to the Newtonian Experimental Philosophy* (1754) de Benjamin Martin; así como *Il newtonianesimo per le dame* de Francesco Algarotti, son ejemplos de libros que fueron ampliamente leídos para entender y popularizar la ciencia newtoniana. (Epstein, *Greenberg. Decomposing Newton's Rainbow*, pp. 118-119).

³⁰⁹ Desaguliers (1717), p. 42 (Silva, *Science and Society: The Case of Acceptance of Newtonian Optics in the Eighteenth Century*, p. 1326).

Y es que Desaguliers consideraba que el carácter corpuscular de la luz era un resultado evidente de la teoría de Newton. A esta visión se sumaron otros como Harris y Algarotti, y se unieron cada vez más a lo largo de las primeras décadas del siglo. El objetivo de cada uno de ellos era el construir modelos que explicaran diversos fenómenos ópticos basados en una concepción corpuscular de la luz. Estos modelos contribuyeron aún más a establecer definitivamente el retrato de Newton como el gran defensor de la teoría corpuscular de la luz.³¹⁰

La *Óptica* aportó también a las discusiones sobre la naturaleza y el comportamiento de la materia, contribuyendo con ideas sobre electricidad, magnetismo, calor, química y otros temas³¹¹, convirtiéndose en la referencia principal en óptica durante al menos un siglo.

³¹⁰ *Ibíd.* 1327.

³¹¹ Hall, *All was Light*.

CAPÍTULO 5. COMPARACIÓN

Introducción.

Las diferencias entre Huygens y Newton son lo primero que salta a la vista. Huygens, en apenas 120 páginas desarrolló una obra que explicaba a través de un solo principio los principales fenómenos ópticos: propagación rectilínea de la luz, reflexión, refracción y doble refracción; con una breve mención del fenómeno de polarización. Una obra corta, concreta y objetiva.

Por su parte, Newton publicó una obra de poco más de 400 páginas que pretendía tratar de forma exhaustiva los temas de óptica de la época y un poco más. La reflexión, la refracción, los diferentes grados de refrangibilidad de la luz, la producción y mezcla de colores, los telescopios, el arcoíris; los anillos de colores formados en películas delgadas y gruesas, el color de los cuerpos, la difracción; y explicar, de manera especulativa, la interacción de la luz con la materia, la producción de calor, la visión, el éter, la doble refracción, la naturaleza de la luz, las interacciones químicas.

Huygens guardó silencio sobre la mayoría de aquellos temas: sobre los telescopios desarrolló otros tratados, acerca la refrangibilidad de la luz conocimos su opinión por su intercambio de cartas con Newton después de la publicación de *New theory about light and colours*, refiriéndose a ella como «un accidente» que no era suficiente para demostrar la afirmación de Newton sobre la heterogeneidad de la luz³¹², donde también se refirió al tema del color, diciendo que «en cuanto a la composición del Blanco hecha por todos los Colores juntos, es posible que el Amarillo y el Azul también sean suficientes para ello»³¹³. Acerca de los «anillos de Newton» hay trazos y mediciones en sus notas (fig. 7) que demuestran que sí dedicó espacio de estudio a este tema, sin embargo, nunca publicó, ni en el *Tratado de la Luz*, ni en ningún otro sitio alguna conclusión o explicación al respecto. Hemos de conformarnos entonces con aquellas ilustraciones que muestran rayos de luz entre dos superficies, atravesando una película delgada y el indicio de frentes de onda en ellos.

Esto reduce de manera significativa la cantidad de temas que pueden compararse entre las dos obras, que es a lo que estarán dedicadas las siguientes secciones de este trabajo.

Pero antes, es importante destacar también algunas de sus similitudes, y es que tanto Huygens como Newton llegaron a una nueva forma de hacer óptica, superando los límites de la óptica geométrica tradicional de su época. En etapas tempranas de su trabajo ambos trabajaron con estos principios establecidos, Huygens en un primer intento de entender la doble refracción y Newton al redactar sus *Optical Lectures*. Sin embargo, trabajando con cristales y prismas, el rayo no podía seguir siendo un ente geométrico cuya naturaleza era ignorada y requería una justificación más allá del ámbito de los fenómenos visibles. Cada uno creó una forma de óptica física mediante la matemática de nuevos dominios de luz, pero de una naturaleza esencialmente diferente. Newton estudió una amplia gama de fenómenos ópticos, matematizando y experimentando en el camino;

³¹² Carta de Huygens a Newton. MS Add. 6086.(Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents*, p 136).

³¹³ *Ibíd.*

Huygens extendió las matemáticas al reino de la naturaleza hipotética e inobservable de la luz y utilizó experimentos para comprobar que sus resultados cazaban con la teoría.

En este capítulo examinaremos las diferencias y similitudes del *Tratado de la Luz* y de la *Óptica*, en su estructura, lenguaje y método; su concepción sobre la naturaleza de la luz, los fenómenos de reflexión, refracción y doble refracción, además de la recepción de ambas obras en siglos posteriores.

5.1 Estructura y lenguaje.

5.1.1 Portada y Prefacio.

La estructura del *Tratado de la Luz* (1690) y la *Óptica* (1704) es similar, al menos durante las primeras páginas. Esta similitud fue planeada y argumentada por Cohen (2001)³¹⁴, quien inicia realizando un examen de las portadas de ambas obras.

En la portada del *Tratado de la Luz* (Fig. 9) notamos que se identifica al autor simplemente por sus iniciales, «C.H.D.Z». (Christiaan Huygens de Zeelhem); mientras que la *Óptica* no declara nombre alguno (Fig. 26) y las iniciales del autor aparecen al final del prefacio, «I. N.». Esta «evidencia» parece poco importante, casi insignificante, sin embargo, al analizar sus prefacios encontramos que Huygens inicia refiriéndose al hecho de que presentó una primera versión de su obra en 1679 ante la *Académie des Sciences* de París³¹⁵, y Newton se refiere también a la presentación de obras previas ante la *Royal Society* de Londres³¹⁶. Ambos prosiguen a dar una explicación por el retraso de su obra, Huygens escribe, «La razón es que lo escribí con bastante descuido en el idioma en el que aparece [...]. Después me propuse entregarlo junto con otro Tratado de Dióptrica [...], Después [...] he aplazado de vez en cuando la ejecución de este proyecto, y no sé cuándo le daré fin, a menudo desviado por diferentes empresas o por algún nuevo estudio»³¹⁷; Newton escribe que deseaba «evitar disputas sobre estos asuntos, hasta ahora he retrasado la impresión, y aún seguiría retrasada, si la insistencia de los amigos no hubiera prevalecido sobre mí»³¹⁸. Además, durante las primeras páginas, Huygens en su prefacio y Newton en el primer párrafo del Libro I, escriben acerca del método que utilizaron para llevar a cabo sus trabajos.

Otro punto a destacar es que tanto el *Tratado de la Luz* como la *Óptica* se encuentran escritas en lengua vernácula, francés e inglés, respectivamente. El francés no era la lengua materna de Huygens, pero sí era la lengua de la *Académie des Sciences*, que además dominaba de manera prácticamente nativa. Es en este punto, en el uso del lenguaje, donde encontramos otra diferencia.

5.1.2 Lenguaje.

Habiendo leído ambas obras en inglés, desconozco el tono real de la obra de Huygens, alcanzo a juzgar sin embargo que el contenido matemático de su obra, esto es el uso de geometría para cada una de las pruebas propuestas a los fenómenos, es claro y preciso,

³¹⁴ Cohen, *The Case of the Missing Author*.

³¹⁵ Huygens, *Treatise on Light*, p. i.

³¹⁶ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. i.

³¹⁷ Huygens, *Treatise on Light*, p. vi.

³¹⁸ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. iii.

algo que como un matemático consumado podíamos esperar de Huygens. Esa claridad de lenguaje se extiende también al uso de analogías para explicar la naturaleza de la luz y su medio de propagación, el éter. La lectura, sin embargo, se vuelve compleja al alcanzar las observaciones experimentales realizadas por Huygens durante el capítulo dedicado a la doble refracción del Espato de Islandia, donde aunque los experimentos son sencillos, la explicación no lo es tanto.

Esto representa una gran diferencia con la *Óptica*, la cual es un manual de experimentación minucioso en cada detalle de la ejecución del experimento, así como de los resultados obtenidos, en el que el único impedimento para repetir los experimentos es la propia limitación del lector (en cuanto a material y habilidades propias requeridas para llevar a cabo la experimentación) y, aún si es imposible o innecesario reproducir experimento alguno, las descripciones de Newton bastan para realizarlo de manera mental. En el uso de matemáticas, la redacción de sus proposiciones y teoremas casi podría ser igual de magistral, excepto por el hecho de que, en su afán de ocultar cualquier trazo de hipótesis realizadas, en muchos casos pierde claridad al respecto (como en el caso de su explicación de los accesos de fácil reflexión y fácil transmisión, así como en su prueba de la refracción en la Proposición 6, Libro I, Parte I).

Ahora, para resolver la brecha de lenguaje entre el francés de Huygens y mi desconocimiento del mismo, he recurrido a un estudio de lingüística que confronta ambas obras, «en la medida en que la comparación [...] entre los distintos idiomas es válida»³¹⁹, realizado por David Banks (2005)³²⁰. En este estudio, algunas de las conclusiones generales apuntan a que el texto en francés de Huygens es más «complejo» que el texto en inglés de Newton. Es complejo en el sentido de la forma en que se configura cada oración, considerando el número de palabras por oración y el uso de verbos en la misma, haciendo así que sus frases tengan una estructura más compleja.

Además, la obra de Newton está casi enteramente escrita en primera persona del singular, mientras que la de Huygens combina el uso de la primera persona del singular, primera persona del plural y pronombres impersonales.³²¹ Esto muy probablemente por la naturaleza de ambas obras, dado que la obra de Newton, por la extensa realización de observaciones y experimentos resulta en una implicación más personal por parte del autor; mientras que el texto de Huygens resulta más abstracto por el uso de analogías y geometría en la mayor parte de su composición.

5.2 Metodología.

En cuanto a método, la postura de Huygens y Newton es clara al principio de los libros, Huygens declara su posición del lado de un método hipotético-deductivo («aquí los Principios son verificados por las conclusiones que se extraen de ellos; la naturaleza de estas cosas no permite que esto se haga de otra manera»³²²), a través del cual el experimento se utiliza como una forma de confirmar lo que ha dilucidado por la razón; mientras que Newton utiliza un método inductivo, que coloca al experimento en primer

³¹⁹ Huygens, *Treatise on Light*, p. 71.

³²⁰ El marco teórico empleado para el desarrollo de este artículo es denominado SFL (Systemic Functional Linguistics). (Banks, *Emerging Scientific Discourse in the Late Seventeenth Century: A Comparison of Newton's Opticks, and Huygens' Traité De La Lumière* pp 66-67).

³²¹ Huygens, *Treatise on Light*, p. 76.

³²² *Ibid.*, p. vi.

lugar («Mi diseño no es explicar las propiedades de la Luz por hipótesis, sino proponerlas y demostrarlas por Razón y Experimentos»³²³).

Con su método, Huygens, utilizó el principio de propagación de onda como una representación matemática de la luz, describiendo sus propiedades no a través del comportamiento de los rayos, sino de ondas, entidades inobservables que correspondían a la naturaleza de la luz. Y es que la única diferencia entre aplicar la geometría a la materia observable y aplicarla a las partículas de éter era el nivel de certeza que se podía alcanzar. En esta teoría, la naturaleza de la luz es una especulación para la que «[s]iempre es posible alcanzar un grado de probabilidad que muy a menudo es apenas una prueba completa».³²⁴

Así, su teoría ondulatoria ocupaba una zona de probabilidad entre la verdad de las leyes de la óptica y la mera especulación, una zona que Huygens, a diferencia de Newton, se atrevió a pisar. El principio de propagación de onda era probable porque lograba explicar leyes que estaban fundadas de manera empírica. Por medio de derivaciones sólidas y mutuamente consistentes, Huygens demostró que su principio era más plausible y más probable que otras teorías explicativas.

Newton, por otro lado, condenaba de manera continua esta forma de pensar, ya que consideraba que no debían mezclarse «conjeturas con certezas»³²⁵, manteniéndose siempre más cerca del enfoque inductivista, donde los principios de su ciencia se derivan directamente del experimento o de los fenómenos. Así pues, el método hipotético-deductivo violaba dos de los cánones del método de Newton y le parecía inaceptable: mezclaba conjeturas con ciertos principios establecidos, y esos principios no se deducían directamente de los fenómenos. Al admitir las hipótesis, Huygens sacrificó la certeza plena e indiscutible que Newton quería preservar a toda costa.

El rechazo de Newton a las hipótesis es un elemento constante de su filosofía natural. En una carta de Newton a Cotes (28 de marzo de 1713) contiene una aclaración importante de lo que él quiso decir con una hipótesis: «Y la palabra Hipótesis es aquí utilizada por mí para significar solamente una Proposición que no es un Fenómeno ni se deduce de ningún Fenómeno, sino que es asumida o supuesta sin ninguna prueba experimental»³²⁶.

Aclaremos que lo que Newton rechazaba abiertamente eran las hipótesis totalmente imaginarias, sin ningún tipo de fundamento experimental. Newton «permitía» hipótesis de este último tipo, hipótesis con un soporte experimental, que sin embargo no son suficientes para demostrar principios de la naturaleza y deben mantenerse separadas de estos (como las Cuestiones anexas a la *Óptica*). Newton creía que este tipo de hipótesis era útil para sugerir nuevos experimentos y hacer inteligibles las propiedades y principios previamente descubiertos.³²⁷

Sin embargo, siguiendo el uso de hipótesis en su estudio de los colores periódicos en películas delgadas y el posterior desarrollo de la teoría de los accesos de fácil reflexión y fácil transmisión, podemos notar que el método utilizado es similar al método hipotético-deductivo de Huygens, excepto, claro está, en el hecho de que Newton eliminó las

³²³ Newton, *Opticks* (4th ed.), p. 1.

³²⁴ Huygens, *Treatise on Light*, p. vii.

³²⁵ Newton, MS Add. 3970.3, p. 464v.

³²⁶ Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents*.

³²⁷ Shapiro, *Newton's "Experimental Philosophy"*, p. 114.

hipótesis al publicar la versión final de su teoría³²⁸: En *Hypothesis*, vimos cómo Newton planteó que a partir de ondas etéreas, podía explicar las causas de los colores de periódicos de películas delgadas, prediciendo a través de estas ondas resultados que podían ser confirmados experimentalmente. En la teoría publicada de la *Óptica*, sin embargo, estos resultados fueron presentados únicamente como consecuencia de experimentos y observaciones.

Newton hizo hipótesis sobre la naturaleza corpuscular de la luz, el color y sus propiedades, pero las omitió en sus teorías establecidas, «[p]ues las hipótesis no deben considerarse en la filosofía experimental».³²⁹

5.3 Naturaleza de la Luz

5.3.1 Velocidad de la Luz.

La luz tiene una velocidad finita, ese fue un punto de consenso entre Huygens y Newton. Un consenso que no era habitual en la época, donde el acuerdo general clamaba la propagación instantánea de la luz y apenas un puñado de gente aceptaba que la luz tuviera velocidad finita, aún después de las observaciones realizadas por Roemer (publicadas en 1676), observaciones que Huygens y Newton utilizaron en sus obras para fundamentar esto y, sin embargo, la velocidad que manejaron fue distinta. Y es que, en su artículo de 1676, Roemer no propuso un valor definido para la velocidad de la luz, su estimado para esta debía ser deducido a partir de la conclusión, donde estimaba que la luz requería alrededor de 22 minutos en cruzar la órbita de la Tierra. Sin embargo, tomando en cuenta que en ese momento había una incertidumbre considerable en las cifras dadas sobre dicha distancia no es posible dar un resultado concreto.³³⁰ Roemer mismo admitió esto, en correspondencia con Huygens y, en una nota a la *Académie* en 1677, diciendo que las incertidumbres hacían imposible una determinación exacta del tiempo en que la luz atravesaría la órbita de la Tierra.³³¹

Sin embargo, realizando cálculos que incluían considerar el diámetro de la órbita terrestre como 22.000 diámetros terrestres, la luz atravesaría una distancia de 1.000 diámetros terrestres por minuto o 16 diámetros de 2/3 en un segundo³³². Huygens expresó que la velocidad era «600 mil veces mayor que la del sonido»³³³, una velocidad que Huygens estimaba en 180 toises/s³³⁴, es decir, poco más de 210,000 km/s.

Por su parte, Newton la estimaba, tomando en cuenta que la luz tardaba entre «siete u ocho minutos de llegar del Sol a la Tierra»³³⁵, considerando una distancia de 70,000,000

³²⁸ Shapiro, *Huygens' 'Traite De La Lumière' and Newton's 'Opticks': Pursuing and Eschewing Hypotheses*, pp. 229-230.

³²⁹ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 404.

³³⁰ Boyer, *Early Estimates of the Velocity of Light*, p. 29.

³³¹ *Ibid.*, p. 30.

³³² Huygens, *Treatise on Light*, p. 10.

³³³ *Ibid.*

³³⁴ El toise era una medida de longitud que equivalía a 1,949 m. (Boyer, *Early Estimates of the Velocity of Light*, p. 31).

³³⁵ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 277.

de millas entre ambos, es decir, 112, 654,080 Km., lo que da un aproximado de poco más de 241,400 km/s³³⁶

Por lo tanto, en el sentido del cálculo de velocidades, la estimación de Newton era mejor que la de Huygens, a pesar de la pobre distancia solar en la que está basada³³⁷.

5.3.2 Uso de la Analogía Acústica

Otro punto en común entre Huygens y Newton, lo encontramos el uso de la analogía acústica para describir fenómenos ondulatorios. Desde sus inicios o primeros trabajos en el estudio de la óptica, esta analogía estuvo presente en ambos.

Huygens la citaría en sus notas para el *Projet du Contenu de la Dioptrique* («[Luz] comparada con sonido. [...] [ondas en aire] comparadas con aquellas en el agua. propagación perpendicular de los círculos»³³⁸); mientras que Newton la utilizaría para dar una primera explicación a la formación de colores en películas delgadas en su *Hypothesis explaining the properties of Light* («Supongo que los rayos, cuando inciden en la rígida superficie etérea, al ser actuados por ella, reaccionan sobre ella y causan vibraciones en ella, como lo hacen las piedras arrojadas al agua en su superficie»³³⁹).

En el *Tratado de la Luz*, Huygens la utilizaría nuevamente para realizar una primera caracterización de las ondas que darían forma a su principio de propagación:

«[...] las llamo ondas por su semejanza con las que se forman en el agua cuando se lanza una piedra, y que presentan una propagación sucesiva en forma de círculos [...]»³⁴⁰

Mientras que Newton la retomaría apenas como la mención de una posible hipótesis de la verdadera naturaleza de los accesos de fácil reflexión y fácil transmisión, describiéndolos «como piedras al caer sobre el agua ponen el agua en un movimiento ondulante».

En todos los casos, la descripción termina siendo la misma: Una piedra cae sobre el agua, haciendo que esta se mueva en círculos concéntricos alrededor del lugar de impacto, en un movimiento ondulatorio.

A pesar de que la existencia de fenómenos, como la periodicidad de los anillos de colores en películas delgadas, sugerían fuertemente un mecanismo ondulatorio, Newton renegaba completamente de las teorías ondulatorias de la luz.

Es curioso, sin embargo, que aunque Huygens representaba la luz con naturaleza ondulatoria, en ningún caso usó atributos característicos de modelos ondulatorios posteriores, como la longitud de onda o la periodicidad, rechazando, por ejemplo, esta última: «las percusiones en el centro de estas ondas no se suceden con regularidad, por

³³⁶ El estimado de 7 u 8 minutos, tomando la distancia del sol para ser cerca de 70,000,000.000 de millas, concluyó que la velocidad de la luz era 700.000 veces mayor que la del sonido, que colocó a 1.140 pies ingleses por «segundo minuto de tiempo». Esto resultaría en una velocidad de algo más de 150.000 millas por segundo. (Boyer, *Early Estimates of the Velocity of Light*, p. 33).

³³⁷ *Ibíd.*

³³⁸ Las frases entre corchetes son añadidos para dar coherencia al texto. Huygens, *Oeuvres Complètes*. Vol. XIII, p. 742.

³³⁹ *Hypothesis explaining the Properties of Light*. (Cohen, *Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents*, p. 187).

³⁴⁰ Huygens, *Traité on Light*, p. 7.

eso no hay que imaginar que las mismas ondas se siguen unas a otras a distancias iguales»³⁴¹.

Y, más curioso aún, que Newton sí atribuyera a sus ondas etéreas el concepto de *bigness* o espesor de una vibración, el equivalente a la longitud de onda, un concepto que retoma en las Cuestiones 12 a 16, referentes a las causas de la visión, donde Newton sugiere que los rayos de luz excitan los nervios ópticos causando vibraciones y que a determinadas a las vibraciones provocadas por la excitación de la retina a los nervios ópticos, y que, dependiendo de la *bigness* o longitud de onda de estas vibraciones, queda determinada la sensación de color detectada por el ojo. Además, Newton también usa de manera extendida la periodicidad, dados los resultados encontrados a través de su estudio en películas delgadas.

5.3.3 Ondas y Corpúsculos

Huygens fue explícito al explicar la naturaleza de la luz: ondas que se originan a partir de cada punto del objeto luminoso, propagándose a través de un éter omnipresente que accede libremente en toda la materia, un éter formado por pequeñas partículas elásticas del mismo tamaño, donde la luz se origina a partir de la agitación de partículas en objetos luminosos que colisionan con las partículas del éter circulante, donde cada partícula afectada por un frente de onda, se transforma a su vez en el origen de un nuevo frente de onda.

A partir de esto, con un único principio de propagación, demostró cómo las ondas podían ser construidas en los fenómenos ópticos. Para la refracción, apenas era necesario un cambio de velocidad entre el medio incidente y el medio refractante, derivando así todas las propiedades observables de los rayos con un solo principio de manera consistente.

Sobre esto, poco después de la publicación del *Tratado de la Luz*, Huygens escribió a Fatio, el 7 de febrero de 1690 que estaba ansioso por saber lo que Newton pensaba de sus « [...] explicaciones de la refracción y de los fenómenos del cristal de Islandia [...] »³⁴². Huygens no viviría para ver a Newton rechazar por completo la idea de las ondas de luz, e ignorar su explicación de la doble refracción, en las Cuestiones adjuntas a la *Óptica*.

«¿No son todas las Hipótesis erróneas, en las que se supone que la Luz consiste en Presión o Movimiento, propagadas a través de un Medio fluido?»³⁴³, recordemos que escribió, argumentando que el movimiento rectilíneo de la luz no podía ser explicado a través de ondas. Además, los accesos de fácil reflexión y fácil transmisión requerirían de dos éter distintos para ser explicados. Y, citando directamente a Huygens (quien «se confesó incapaz de explicarlas»³⁴⁴), la teoría ondulatoria también era incapaz de explicar el fenómeno de polarización.

Newton responde a la naturaleza de la luz en la Cuestión 29, reconociendo su creencia de que «¿No son los Rayos de Luz cuerpos muy pequeños emitidos por sustancias brillantes?»³⁴⁵. Estos cuerpos, corpúsculos o *globuli* (como los llamó en sus primeras

³⁴¹ Huygens, *Treatise on Light*, p. 16.

³⁴² Huygens, *Oeuvres Complètes. Vol. IX*, p. 358.

³⁴³ Newton, *Opticks 4th ed*, p. 362.

³⁴⁴ Newton hace una nota al pie, para citar a Huygens "Mais pour dire comment cela se fait, je n'ay rien trouve jusqu' ici qui me satisfasse. C. H. de la lumiere, c. 5, p. 91" (Ibid.).

³⁴⁵ Ibid., p. 370.

investigaciones) interactúan con otros cuerpos y sustancias a través de fuerzas, explicando con esto la reflexión y la refracción. El fenómeno del color queda explicado tomando en cuenta el tamaño de estos corpúsculos, donde cada tamaño corresponde a un color distinto.

Y, aunque Newton relegó esta explicación a una de las Cuestiones, en un intento de destilar su teoría de forma que quedara libre de hipótesis alguna, la hipótesis corpuscular se manifestó de manera implícita en su obra, pues como hemos visto, al realizar la demostración de la Proposición 6 (Libro I, Parte I), sobre la refracción, Newton presentó una versión ajustada y abreviada de la demostración planteada en los *Principia*, donde había empleado partículas y fuerzas para explicar el fenómeno. En la *Óptica*, Newton eliminó cuidadosamente todos los rastros de partículas inobservables y formuló la demostración en términos de rayos y sus propiedades.

5.4 Reflexión y Refracción

5.4.1 Reflexión

La explicación de la ley de reflexión dada por Huygens obedece a la elegancia del principio de propagación de onda, donde el único supuesto que debe realizar es que la velocidad, después de que el frente de onda llega a la superficie reflectante, no cambia. Esta velocidad uniforme le permite construir otro frente de onda, el frente de onda reflejado que se produce a un ángulo idéntico al ángulo de incidencia.³⁴⁶

Mientras que Newton, quien en un principio da por sentada la ley de reflexión en el Axioma II de la *Óptica*, enunciándola sencillamente, después transforma al fenómeno después transforma al fenómeno de la reflexión en un ente más complejo, que le ayuda a explicar los anillos de las películas delgadas y el color de los cuerpos, fenómenos acerca de los cuales, Huygens no realizó comentario alguno en el *Tratado de la Luz*.

Al usar luz monocromática, Newton se dio cuenta de que los anillos formados, uno oscuro y otro de color, representaban luz transmitida y luz reflejada, respectivamente, donde existen «disposiciones» para transmitir o reflejar la luz en ciertos lugares. Además, el color de los cuerpos está determinado por la reflexión selectiva de la luz de los corpúsculos superficiales que componen el cuerpo en cuestión, análogo a lo que ocurre en películas delgadas. Para explicar este fenómeno, Newton recurre a su teoría de los Accesos de Fácil Reflexión y Fácil Transmisión, donde los rayos de luz tienen «disposiciones» a ser transmitidos o ser reflejados por las superficies de los cuerpos.

5.4.2 Refracción

Huygens emplea nuevamente el principio de propagación de onda para demostrar el fenómeno de refracción. Aquí, su demostración requiere simplemente el tomar en cuenta que, al entrar en la superficie refractante, el frente de onda cambiará su velocidad, v_i , generando ondas secundarias en el segundo medio con esta segunda velocidad, v_r encontrando la ecuación 15:³⁴⁷

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{BC}{AN} = \frac{v_i}{v_r} = n \quad \text{a)}$$

³⁴⁶ Ver Capítulo 2, sección 2.2 de este trabajo.

³⁴⁷ Ver Capítulo 2, sección 2.3 de este trabajo.

Newton explica la ley de refracción de dos formas. En primer lugar, al realizar la demostración en la Óptica, Newton emplea las siguientes suposiciones: la descomposición del movimiento, «uno perpendicular a la Superficie refractante, el otro paralelo a ella»³⁴⁸, donde el único afectado es el movimiento perpendicular del movimiento³⁴⁹. Utilizando esto, Newton demuestra la ley de refracción que, en términos de velocidades podría escribirse como la ecuación 29:

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{v_r}{v_i} \quad \text{b)}$$

Esta demostración, según Newton, es general, «sin determinar qué es la Luz, o por qué tipo de fuerza se refracta»³⁵⁰, sin embargo, como hemos visto, autores como Bechler (1973) Shapiro (2017)³⁵¹ y Sabra (1981)³⁵² mencionan que, de manera implícita, Newton sí empleó una hipótesis corpuscular, ya que la prueba de la proposición 94 de los Principia, Libro I, sección 14 sirvió como base para la demostración de la Óptica.

Newton deja claro esto de manera más explícita en la Cuestión 29 cuando escribe que los corpúsculos que componen la luz interactúan con las «Sustancias Pelúcidas» a través de «fuerzas a distancia», por lo que la demostración de la ley de refracción es efectuada por una fuerza atractiva «como lo demostramos en nuestros Principios de Filosofía»³⁵³, es decir, tal y como fue demostrado en los Principia.

Pero resaltemos otra diferencia entre las deducciones de Huygens y Newton. Mientras que Huygens deduce, según la ecuación a), que cuando el ángulo de refracción es menor que el ángulo de incidencia correspondiente, es decir, cuando la luz es desviada hacia la normal, la velocidad debe haber sido disminuida por la refracción, por lo tanto, se puede concluir que la velocidad de la luz es menor cuando pasa de un medio a otro más denso.

Newton obtiene un resultado opuesto, ecuación b), es decir, la velocidad es mayor cuando el rayo refractado pasa de un medio, como el aire, a un medio más denso, como el agua o el vidrio. En la explicación de Newton esto tendría sentido, pues, existe mayor atracción en el medio más denso, haciendo que las partículas de luz se aceleren perpendicularmente hacia la interfaz, y por lo tanto la trayectoria está más cerca de la normal.

5.5 Doble Refracción

Para explicar el fenómeno de la doble refracción, nuevamente es el principio de propagación de onda el protagonista de la demostración de Huygens, que en este caso hace uso de ondas elipsoidales, justificando esta propuesta, asumiendo que la velocidad de la luz tenía diferente velocidad en varias direcciones, por la disposición de las partículas

³⁴⁸ Newton, *Opticks 4th ed.*

³⁴⁹ Ver Capítulo 4, sección de este trabajo.

³⁵⁰ Newton, *Opticks 4th ed.*, pp. 81-82.

³⁵¹ Shapiro, *Newton's Optical Experiments and Theories*, p. 9.

³⁵² Sabra, *Theories of Light*, p. 303.

³⁵³ Newton se refiere a la demostración de los Principia, Libro I, Sección 14, proposición 94, de la que hablamos anteriormente. (Ibid., p. 371).

que componían el cristal. Estas ondas elipsoidales seguían el principio de propagación de onda, formando frentes de onda elípticos. En este espacio, Huygens deja de hacer solo cálculos matemáticos y se pone en el lugar del científico experimental, determinando de manera cuantitativa los parámetros de la elipse, para comprobar su teoría, considerando también los rayos fuera de la sección principal.

Sin embargo, reconoció un fenómeno al que es incapaz de encontrar una causa, explicando el mismo y dando oportunidad a otros de investigarlo, el fenómeno de la polarización. Algo que fue usado en su contra por parte de Newton, quien intentó resolver el problema proponiendo que cada rayo de luz poseía «dos lados opuestos originales dotados de una propiedad de la que depende la refracción inusual, y los otros dos lados opuestos no dotados de esa propiedad»³⁵⁴.

Newton también rechazó la explicación de Huygens de la doble refracción, reemplazándola por la suya propia, asentada en la Cuestión 25 de la *Óptica*, explicando cómo encontrar un rayo extraordinario a partir de rayos trazados a partir de las paredes del cristal y el rayo ordinario. Newton asumió esta construcción como una ley válida para cualquier refracción fuera de la sección principal, lo cual era incorrecto.³⁵⁵ Newton no ofreció observaciones experimentales, no mencionó la construcción de Huygens, ni cómo difería esta de la suya.

Así, la refracción extraordinaria del Espato de Islandia, en términos de la teoría corpuscular de Newton, se explicaba a partir de «algún tipo de virtud atractiva alojada en ciertos Lados tanto de los Rayos, como de las Partículas del Cristal».³⁵⁶ Virtudes o disposiciones que hacían que hubiera atracción o repulsión entre ellos.

La explicación de Newton, era errónea, mientras que la explicación de Huygens era un triunfo para la teoría ondulatoria.

5.6 Recepción.

El estado de óptica a principios del siglo XVIII no representó una lucha entre la teoría ondulatoria y la teoría corpuscular, con Huygens y Newton como los dos protagonistas. En realidad, la teoría de la luz de Huygens nunca fue un serio rival para la de Newton. Después del pequeño número de personas que elogió y aceptó el *Tratado de la Luz*, este no recibió adherentes posteriores. Esta falta de aceptación fue paralela al hecho de que el estudio de la doble refracción también fue ignorado por casi un siglo, un estudio del cual dependía la confirmación del principio de propagación de onda y que sería retomado hasta finales del siglo XVIII y principios de XIX.

Por su parte, la *Óptica*, gozó del prestigio de su autor, reconocido, ya desde entonces como el mejor investigador y el mayor genio de todos los tiempos. La *Óptica* fue conocida por niños y adultos, quienes recibieron sus descubrimientos de manera entusiasta, dejándose conquistar por «la verdad» acerca de muchos de los fenómenos que los rodeaban. Así, Newton se convirtió en un ícono cultural, un símbolo viviente del estudio de la naturaleza. Además, aún cuando su hipótesis sobre la naturaleza corpuscular de la luz

³⁵⁴ Newton, *Opticks 4th ed.*, p.360.

³⁵⁵ La regla expresada por Newton para obtener la refracción extraordinaria, según Buchwald (1980), no funciona bien fuera de la sección principal.

³⁵⁶ Newton, *Opticks 4th ed.*, p. 373.

fue relegada al conjunto de especulaciones que constituyen el Libro III de la Óptica, le fue otorgado el estandarte de la creación de una teoría corpuscular de la luz.

Y no sería hasta principios del siglo XIX cuando dos importantes descubrimientos revivieron la competencia entre la teoría ondulatoria y la teoría corpuscular. En las primeras décadas del siglo XIX, Thomas Young (1773-1829) y Augustin Fresnel (1788-1827) dieron a la teoría ondulatoria de la luz el impulso necesario para permitirle desplazar a la teoría corpuscular. Pero la discusión no terminaría ahí, permanecería latente durante ese siglo y el siglo XX, hasta el desarrollo de la mecánica cuántica.

CONCLUSIÓN

Entre Huygens y Newton, su *Tratado de la Luz* y la *Óptica*, las diferencias son más evidentes que las similitudes. Su extensión, el método utilizado para llegar a sus conclusiones, la cantidad de fenómenos estudiados. Pero, quizá la similitud más importante entre ambos hombres y ambas obras es que transformaron la ciencia de la óptica.

La óptica de principios del siglo XVII no era más que una extensión de antigua tradición de la óptica geométrica, apenas expandida un poco más con la deducción de la ley de los senos de la refracción y el descubrimiento de fenómenos como los anillos de colores en películas delgadas, la difracción y la doble refracción.

Al comenzar sus trabajos en óptica, tanto Huygens como Newton emplearon estrategias y métodos utilizados comúnmente en esta tradición de óptica geométrica, dándose cuenta muy pronto de las limitaciones de realizarlo de esta manera. Es ahí donde sus caminos se separaron, siguiendo métodos distintos.

Ninguna de estas obras fue trivial. Ambas iniciaron con el planteamiento de uno o más problemas a resolver, requiriendo entonces años de reflexión, experimentación y trabajo para llegar a las conclusiones finales; y aún después de eso, requirieron de la redacción y edición que solo llegó años después de que hubieran puesto punto final al primer borrador. Es gracias al trabajo titánico de ambos hombres, cuyo interés, al publicar «obras imperfectas», era que otros pudieran continuar el estudio de la luz, en el sitio donde ellos lo habían dejado.

Huygens planteó el uso de ondas para explicar los fenómenos a través de un solo principio de propagación. Así, la reflexión y refracción quedaron reducidos a frentes de onda que cambian (o no) su velocidad a través de distintos medios; mientras que la doble refracción, el fenómeno que orilló a Huygens a la formulación final de su principio de propagación, se explica a través de ondas elipsoidales, señalando cambios de velocidad en dos direcciones, generados por la composición del cristal.

Newton se dedicó a experimentar. Y el resultado fue avasallador. La experimentación, combinada con el genio matemático e imaginativo de Newton resultó en una óptica física que estudió la composición y dinámica de la luz, generando resultados sobre la composición de la luz blanca, las leyes de reflexión y refracción; dio origen a la ciencia del color, estudiando la producción y mezcla de colores; explicando también los anillos de colores formados en películas delgadas y gruesas, el color de los cuerpos. Explicando también fenómenos como el arcoíris y la difracción. Pero Newton no quería responder solo a esas preguntas, así que incluyó 31 Cuestiones más, sobre la interacción de la luz con la materia, la producción de calor, la visión, el éter, la doble refracción, la naturaleza de la luz las interacciones químicas.

Por esa razón, apenas y es posible encontrar intersecciones entre el *Tratado de la Luz* y la *Óptica*. Pero entre las existentes, encontramos el uso de la analogía acústica o de las ondas en el agua para describir fenómenos ondulatorios; la velocidad finita de la luz como parte de su investigación (algo que no era algo aceptado de manera general en la época). Y el interés de dejar a otros lo que no han podido investigar «con el fin de que se realice

una búsqueda más amplia por parte de otros»³⁵⁷, ya que, «finalmente, queda mucho más por investigar en cuanto a la naturaleza de la Luz que no pretendo haber revelado, y deberé mucho a cambio a aquel que sea capaz de complementar lo que aquí me falta en conocimiento».³⁵⁸

Recalcando, sus diferencias son más evidentes que sus similitudes. Y es quizá por eso que su recepción fue así de distinta y desequilibrada, Huygens se quedó atrás al limitarse a explicar los fenómenos básicos y más inmediatos de la época, mientras Newton dio origen a una obra que sería leída hasta nuestros días con el mismo interés que hace tres siglos donde, maravillados, descubrimos experimentos, teorías y especulaciones que van moldeando la ciencia de la luz.

En el siglo XXI, ambas obras serían recordadas eventualmente como las protagonistas de un debate que se extendería por siglos, para tratar de responder la pregunta: ¿Es la luz una onda o una partícula?

³⁵⁷ Newton, *Opticks 4th ed*, p. 338.

³⁵⁸ Huygens, *Treatise on light*, p. vii.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aames, Jimmy. "The Development of Newton's Theory of Fits.". Sitio web: <http://osaka-u.academia.edu/JimmyAames>, 2017.
2. Ango, Pierre. "L' Optique Divisée En Trois Livres Ou L' on Démontre D' Une Maniere Aisée Tout Ce Qui Regarde 1° La Propagation & Les Proprietez De La Lumière, 2° La Vision, 3° La Figure & La Disposition Des Verres Qui Servent À La Perfectionner." Michallet, 1682.
3. Banks, David. "Emerging Scientific Discourse in the Late Seventeenth Century: A Comparison of Newton's Opticks, and Huygens' *Traité de la Lumière*." *Functions of Language* Vol. 12, pp. 65-86, 2005.
4. Barth, Michael. "Huygens at Work: Annotations in His Rediscovered Personal Copy of Hooke's *Micrographia*." *Annals of Science* Vol. 56, pp 601-613, 1995.
5. Bechler, Zev. "Newton's Search for a Mechanistic Model of Colour Dispersion: A Suggested Interpretation." *Archive for History of Exact Sciences* Vol. 11, pp. 1-37, 1973.
6. Boyer, Carl B. "Early Estimates of the Velocity of Light." *Isis* Vol. 33, pp. 24-40, 1941.
7. Buchwald, Jed Z. "Experimental Investigations of Double Refraction from Huygens to Malus." *Archive for History of Exact Sciences* Vol. 21, pp. 331-73, 1980.
8. Cajori, Florian. "A History of Physics in Its Elementary Branches Including the Evolution of Physical Laboratories." London: Macmillan and Co., 1917.
9. Cohen, I. Bernard. "The Case of the Missing Author: The Title Page of Newton's *Opticks* (1704), with Notes on the Title Page of Huygen's *Traité de la Lumière*." Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, pp 15-46, 2001.
10. Cohen, I. Bernard. "Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents" Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1958.
11. Darrigol, Oliver. "The Analogy between Light and Sound in the History of Optics from the Ancient Greeks to Isaac Newton. Part 1." *Centaurus* Vol. 52, no. 2, pp. 117-55, 2010.
12. Darrigol, Oliver. "A History of Optics: From Greek Antiquity to the Nineteenth Century." New York: Oxford University Press, 2012.
13. Descartes, René. "The World and Other Writings. Cambridge Texts in the History of Philosophy." Editado por Desmond M. Clarke Karl Ameriks Cambridge, UK.: Cambridge University Press, 1998.

14. Descartes, René. "The Philosophical Writings of Descartes Vol. I." Traducción de Robert Stoothoff John Cottingham, Dugald Murdoch. London, New York: Cambridge University Press, 1985.
15. Dijksterhuis, Fokko Jan. "Once Snell Breacks Down: From Geometrical to Physical Optics in the Seventeenth Century." *Annals of Science* Vol. 61, pp. 165-85, 2005.
16. Dijksterhuis, Fokko Jan. "Lenses and Waves: Christian Huygens and the Mathematical Science of Optics in the Seventeenth Century." The Netherlands: Springer Netherlands, 2004.
17. Guerlac, Henry. "Can We Date Newton's Early Optical Experiments?". *Isis* Vol. 74, pp 74-80, 1883.
18. Hall, A. Rupert. "Sir Isaac Newton's Note-Book, 1661-65." *Cambridge Historical Journal* Vol. 9, pp. 239-50, 1948.
19. Hall, A. Rupert. "All Was Light: An Introduction to Newton's Opticks." United States: Oxford University Press, 1993.
20. Hooke, Robert. "Robert Hooke's Critique of Newton's Theory of Light and Colors." En *The Newton Project*, Cambridge, UK: Cambridge University Library. Sitio web: <http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00005>, 1672.
21. Hooke, Robert. "Micrografía O Algunas Descripciones Fisiológicas De Los Cuerpos Diminutos Realizadas Mediante Cristales De Aumento Con Observaciones Y Disquisiciones Sobre Ellas". Traducción de C. Solis. Madrid: Alfaguara, 1665.
22. Huygens, Christiaan. "Oeuvres Complètes. Vol. IX. Correspondance 1685-1690". Den Haag: Oeuvres Complètes.
23. Huygens, Christiaan. "Oeuvres Complètes. Vol. XIX. Mécanique théorique et Physique 1666-1695". Den Haag: Oeuvres Complètes, 1937.
24. Huygens, Christiaan. "Oeuvres Complètes. Vol. XIII, Dioptrique." Den Haag: Oeuvres Complètes, 1916.
25. Huygens, Christiaan. "Treatise on Light: In Which Are Explained the Causes of That Which Occurs in Reflexion, and in Refraction. And in Particularly in the Strange Refraction of Iceland Crystal. (1690)" Traducido por Silvanus P. Thompson. London: Macmillan and CO., 1912.
26. Julia Epstein, Mark Greenberg. "Decomposing Newton's Rainbow." *Journal of the History of Ideas* Vol. 45, pp. 115-40, 1984.
27. Lohne, Johs. "Newton's 'Proof' of the Sine Law and His Mathematical Principles of Colors." *Archive for History of Exact Sciences* Vol. 1, pp. 389-405, 1961.
28. Roemer, M; Cohen, Bernard. "Roemer and the First Determination of the Velocity of Light (1676)." *Isis* Vol. 31, no. 2, pp. 327-79, 1940.

29. Marquina, José Ernesto. "La Tradición de Investigación Newtoniana." México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2003.
30. Newton, Isaac. "Letter from Newton to Henry Oldenburg, Dated 25 January 1675/6. MS Add. 9597/2/18/50." En The Newton Project, Cambridge, UK: Cambridge University Library. Sitio web: <http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00266>, 2013.
31. Newton, Isaac. "Portsmouth Add. Ms. 3975. 1669-1693". En The Newton Project, Cambridge, UK: Cambridge University Library, Sitio web: <http://webapp1.dlib.indiana.edu/newton/mss/norm/ALCH00110>
32. Newton, Isaac. "Trinity College Notebook (Ms Add.3996), 1661-1665", Cambridge, UK: Cambridge University Library. Sitio web: <https://cudl.lib.cam.ac.uk/view/MS-ADD-03996/>.
33. Newton, Isaac. "Principios Matemáticos De La Filosofía Natural. (1687)" Traducción por E. R. García. México: Alianza Editorial, 2011.
34. Newton, Isaac. "The Correspondence of Isaac Newton." Editado por H. W. Turnbull Vol. 1, Cambridge: Cambridge University Press, 1959–77.
35. Newton, Isaac, "MS Add. 3970.3, ff.460-466," En The Newton Project, Cambridge, UK: Cambridge University Library. Sitio web:<http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00120>
36. Newton, Isaac. "Opticks or a Treatise of the Refractions, Refractions, Inflections and Colours of Light. Fourth Edition, London, 1730", New York: Dover Publications, Inc., 1952.
37. Nicolson, Marjorie Hope. "Newton Demands the Muse: Newton's Opticks and the Eighteenth Century Poets." Princeton: Princeton University Press, 1946.
38. Pardies, Ignace-Gaston. "La Statique, Ou La Science Des Forces Mouvantes . Par Le P. Ignace Gaston Pardies De La Compagnie De Jesus. Troisième Edition." Francia: A Paris, de l'imprimerie de Seb. Mabre-Cramoisy. hez Florentin & Pierre Delaulne, devant l'église de Sorbonne, à l'Empereur. M. DC. LXXX. Avec privilege de Sa Majesté [sic], 1674.
39. Sabra, A. I. "Theories of Light: From Descartes to Newton." Cambridge: Cambridge University Press, 1981.
40. Sepper, Dennis L. "Newton's Optical Writings." En Masterworks of Discovery, New Jersey: Rutgers University Press, 1994.
41. Shapiro, A. E. "Huygens' 'Traite De La Lumière' and Newton's 'Opticks': Pursuing and Eschewing Hypotheses." Notes and Records of the Royal Society of London, no. 43, pp. 223-247, 1989.
42. Shapiro, A. E. "Kinematic Optics: A Study of the Wave Theory of Light in the Seventeenth Century." Archive for History of Exact Sciences Vol. 11, pp. 134–266, 1973.

43. Shapiro, A. E. "Twenty-Nine Years in the Making: Newton's Opticks." *Perspectives on Science* Vol. 16, no. 4, pp. 417-38, 2008.
44. Shapiro, Alan E. "Experiment and Mathematics in Newton's Theory of Color." *Physics Today* Vol. 37, no. 34, 1984.
45. Shapiro, Alan E. "Newton's Optical Experiments and Theories." En *Oxford Handbooks Online*, editado por E. Scliesser. Oxford: Oxford University Press, 2017.
46. Shapiro, Alan E. "Newton's Optics and Atomism." En *The Cambridge Companion to Newton*, editado por R. Iliffe, G. E. Smith. United Kingdom: Cambridge University Press, 2002.
47. Shapiro, Alan E. "Fits, Passions, and Paroxysms: Physics, Method, and Chemistry and Newton's Theories of Colored Bodies and Fits of Easy Reflection." Cambridge, U.K: Cambridge University Press, 1993.
48. Shapiro, Alan E. "The Optical Papers of Isaac Newton. Vol. I", Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1984.
49. Silva, Cibelle. "Science and Society: The Case of Acceptance of Newtonian Optics in the Eighteenth Century." *Science & Education - SCI EDUCATION* Vol. 21, pp. 1317–1335, 2011.
50. Starkey, George. "Alchemical Laboratory Notebooks and Correspondence." Editado por W. R. Newman and L. M. Principe. Chicago and London: The University of Chicago Press, 2004.
51. Walsh, Kirsten. "Newton's Scaffolding: The Instrumental Roles of His Optical Hypotheses." 2018. Sitio web: <http://philsci-archive.pitt.edu/14772/>
52. Westfall, Richard S. "Isaac Newton's Coloured Circles Twixt Two Contiguous Glasses." *Archive for History of Exact Sciences* Vol. 2, pp. 181-96, 1695.
53. Westfall, Richard S. "The Foundations of Newton's Philosophy of Nature." *The British Journal for the History of Science* Vol. 1, pp. 171-82, 1962.
54. Westfall, Richard S. "Isaac Newton: Una Vida." Traducido por Menchu Gutiérrez. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.