

“SALTEMALIQUEANDO ETIAM UNDULATIM” (“A VECES INCLUSO ONDULA”) (“AT LEAST SOMETIMES IT WAVES”)

ROMÁN CASTAÑEDA SEPÚLVEDA

Recibido 11-05-2012, aceptado 16-06-2012, versión final 04-07-2012

RESUMEN: Los términos *difracción* e *interferencia* señalan propiedades distintivas de la naturaleza ondulatoria de la luz, que se consolidaron en el siglo 19. En este artículo se analiza su desarrollo sobre bases históricas, haciendo especial reconocimiento a Francesco María Grimaldi, SJ, quien acuñó el término *diffractum* en el siglo 17.

PALABRAS CLAVE: Difracción, Efluvios, Interferencia.

ABSTRACT: The terms diffraction and interference refer to exclusive properties of the wave nature of light. Such concepts were consolidated in the 19th century. In this paper, their developing is analyzed on historical basis, and special recognizing is given to Francesco María Grimaldi, JP, who coined the term *diffractum* in the 17th century.

KEYWORDS: *Diffraction, Effluvium, Interference.*

1 GRIMALDI

Bologna, la capital de la Emilia-Romaña (Italia), vio llegar al mundo a Francesco María Grimaldi, también conocido como Grimaldo (Figura 1a) el 2 de Abril de 1618. Llamada *Velzna* por sus fundadores etruscos, *Felsina* por los romanos, nombre latino que finalmente cambiaron por *Bononia* en 189 AC, y apodada *La Rossa* por los actuales italianos, dicen que por sus casas de color rojo mediterráneo (también las hay amarillo de Parma), pero saben que es por su célebre vida liberal y rebelde, que la llevó al castigo del truncamiento de las capillas menores y a la prohibición de la culminación de la fachada principal de su catedral de San Petronio, por oponerse al dominio pontificio. Era una próspera urbe renacentista, con más de treinta kilómetros de pórticos y la primera universidad de Europa, apodada “La Docta” (Figura 1b), cuyos claustros habían sido iluminados por una nutrida lista de celebridades en sus cerca de cuatro siglos de existencia, cuando Grimaldi nació. Su último día, 28 de Diciembre de 1663, 44 años después, también transcurrió en Bologna.

Grimaldi ingresó a la *Compañía de Jesús* el 18 de Marzo de 1632 y se ordenó sacerdote jesuita en 1651. Sin embargo, brilló desde sus estudios básicos y, al culminarlos, fue promovido a profesor de *bellas-letas*, un

Escuela de Física, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, A.A. 3840, Medellín, Colombia
rcastane@unal.edu.co

cargo que desempeñó durante 25 años en los colegios de la orden en Novellara y Parma. Regresó a su natal Bologna como profesor de filosofía del colegio de la orden. Pero no postergó más su gusto por la ciencia, a la que se dedicó hasta el final de su vida: se consagró como geómetra, matemático, físico y astrónomo, comenzando sus cátedras en el colegio. No fue sólo catedrático: también investigador con habilidades experimentales excepcionales y una búsqueda obsesiva de la respuesta a una pregunta fundamental: ¿Qué es la luz?

Dejó registro de sus descubrimientos en una única obra, *Physico-mathesis de Lumine, Coloribus et Iride* (Grimaldo, 1665), impresa dos años después de su muerte. ¿No la publicó en vida por temor a la inquisición, a los procesos contra Galileo Galilei, cuyas teorías estudió sistemáticamente, y contra Giordano Bruno, quemado en *Campo dei Fiori* (Roma) por “desviaciones en la doctrina religiosa”? Tal vez. Su fuero sacerdotal no lo hubiera eximido de un juicio por herejía. Sin embargo, es más probable que un hábito de humildad y una vida científica corta retardara la aparición de su legado (Sommervogel, 1890-1960; Oldenburg, 1665-1715). En su libro se lee: “*Seamos honestos, nosotros no sabemos realmente nada sobre la naturaleza de la luz y es deshonesto emplear palabras rimbombantes carentes de sentido*”. Pareciera una crítica ácida. Todo lo contrario: Grimaldi fue distinguido por su amabilidad, gentileza y modestia.

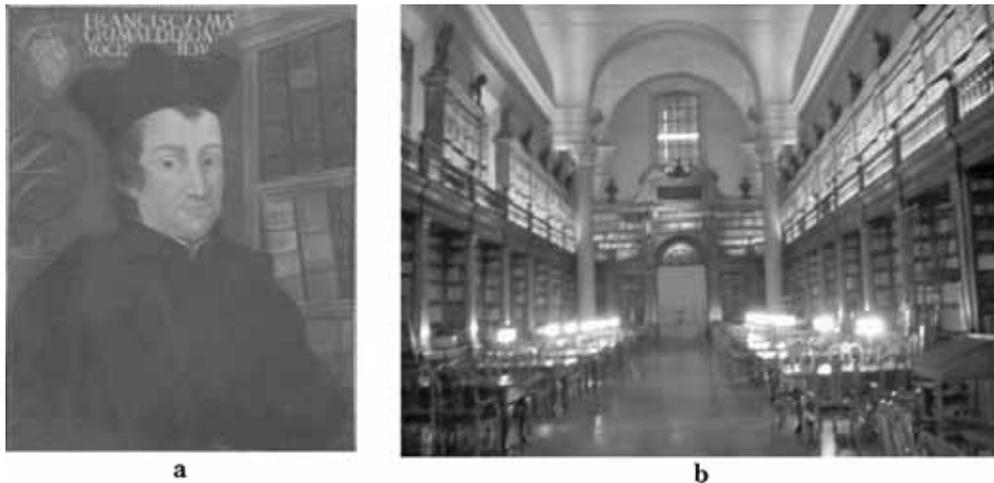


Figura 1: a) Francesco María Grimaldi (1618-1663) (Fuente: *Quadreria dell'Università degli Studi di Bologna*, imagen libre en internet), b) Sala de lectura del 1400, Biblioteca de la *Università degli Studi di Bologna “La Docta”* (Fuente: realización propia).

También acuñó allí un vocablo histórico: *diffRACTUM* (ruptura) para bautizar un descubrimiento sin precedentes, que lo llevaría a pensar que era posible “*obtener oscuridad sumando luz*”. Esta semilla habría de florecer en el siglo 19, con todo el esplendor de la concepción ondulatoria de la luz. *Physico-mathesis de Lumine, Coloribus et Iride* antecedió a los trabajos de Christian Huygens, y se dice que atrajo a Isaac Newton al estudio de la óptica. De hecho, apareció impresa cuando Newton, con 23 años de edad, desarrollaba los experimentos de óptica que lo hicieron famoso. Él debió conocerla, a juzgar por la influencia explícita que se advierte en *Opticks*, su obra publicada en 1704: en la parte III, Newton quiso rebautizar la difracción con el término *inflexión* (lat. *Inflexionis*: torcimiento o comba de una cosa que estaba recta o plana). Sin embargo, el nombre dado por Grimaldi prevaleció históricamente.

La astronomía fue la otra gran pasión de Grimaldi, que compartió con el también sacerdote jesuita Giovanni Battista Riccioli, autor del *Almagestum Novum*. Procedimientos para determinar la longitud de arco de los meridianos, medir la altura de las nubes y la de las montañas de la luna fueron contribuciones de Grimaldi

que Riccioli incluyó en su obra, así como la descripción del fenómeno de aplanamiento de Saturno y sus cuidadosas observaciones del relieve lunar, sintetizadas en el *Selenógrafo* levantado conjuntamente con Riccioli. Grimaldi denominó las regiones lunares empleando nombres de astrónomos, físicos y filósofos ilustres, en lugar de los términos empleados por Hevelius, inspirados en la topografía terrestre. Fue también responsable, en buena parte, de la elaboración de las tablas astronómicas, publicadas por Riccioli en su *Astronomia Reformata*, el mismo año en que hizo imprimir *Physico-mathesis de Lumine, Coloribus et Iride*, obra póstuma de su colaborador y amigo. En memoria de Grimaldi, uno de los cráteres lunares lleva su nombre.

2 “OBTENER OSCURIDAD SUMANDO LUZ”

Quizá Grimaldi no tuvo una idea precisa del valor científico de la difracción de la luz, un descubrimiento adelantado para su época, en la que sobre bases matemáticas sólidas y experimentos inobjektivos, se había consolidado la concepción corpuscular de la luz, herencia del pensamiento griego. En efecto, el cuadro conformado por la hipótesis de “efluvios de partículas inconmensurables” promulgada por Demócrito de Abdera hacia el siglo 4 AC, que viajan a lo largo de trayectorias de mínima distancia, según el principio que Herón de Alejandría estableció en el siglo 1, y se reflejan sobre las superficies obedeciendo una ley de igualdad angular, reportada por Euclides en sus *Elementos* hacia el siglo 3 AC, fue culminado en tiempos de Grimaldi por la ley de refracción, sintetizada en 1620 por Willebrod Snellius para describir el cambio de trayectoria luminosa cuando la luz pasa de un medio a otro, por ejemplo de aire a agua o a vidrio. La importancia de esta ley resalta al considerar que el “problema” de la refracción no había sido resuelto desde que fuera enunciado en Alejandría, hacia el año 50 AC, en términos de una conocida parodia: ¿por qué un cliente de una taberna, que pone una moneda en el fondo de su vaso y lo deja sobre la mesa, de manera que no alcance a verla mirando a través de la boca del vaso, la ve aparecer mágicamente cuando el tabernero vierte agua en él hasta una cierta altura? Además, la ley de Snellius condujo a Pierre de Fermat a formular su célebre *Principio del mínimo tiempo* (1657), que reemplazó al principio de Herón (Izuka, 1985). Sin embargo, no hay sitio para la difracción en este elaborado cuadro. ¿Qué la hace tan particular?

Grimaldi hizo construir un cuarto oscuro, orientado de manera que el sol diera en pleno en una de sus paredes, en el momento del día que dispuso para realizar las observaciones. Practicó una pequeña abertura en esta pared, para introducir en el cuarto un lápiz de luz solar (luz que se propaga en un cono “que se hace visible en aire si hay polvo flotando en él o se produce humo” (Grimaldo, 1665)) y proyectarlo en la pared opuesta. Se sorprendió al comprobar que la mancha de luz, sobre la segunda pared, era más ancha que lo predicho por los cálculos geométricos y, además, estaba bordeada por bandas coloreadas: “*La sombra aparece apreciablemente más ancha de lo que sería bajo la suposición de que todo ocurre en términos de líneas rectas. Incluso, el límite de la sombra permanece difuso a causa de una penumbra, caracterizada por una perceptible graduación luminosa [...] entre las regiones de sombra completa y de iluminación completa [...]*” (Grimaldo, 1665).

Reportó el mismo comportamiento en relación con la sombra de una vara colocada dentro de la trayectoria del lápiz de luz: “*Sea ahora AB el agujero que lleva el lápiz de luz solar hacia el interior del cuarto oscuro [ver Figura 2] y EF el obstáculo que atraviesa al lápiz de luz, de manera que MN sea su sombra proyectada sobre la pared opuesta a la del agujero. Ésta será sensiblemente más ancha que la que debiera observarse bajo la ley de propagación rectilínea. Además, dentro de esta sombra proyectada, IG y HL son las zonas de penumbra, mientras que GH es la región de oscuridad completa. En las regiones CM y ND la luz se despliega como un abanico, concentrándose sobre ciertas direcciones, esto es, conformando franjas. En el medio de éstas, la luz aparece pura y genuina, mientras que se descompone en colores en sus bordes. Por último, existe cierta dependencia de las franjas respecto al ancho de la abertura, de manera que desaparecen si la abertura se agranda suficientemente*” (Grimaldo, 1665).

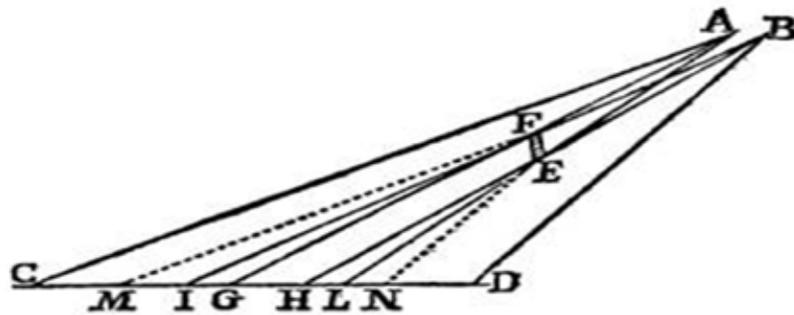


Figura 2: Esquema de Grimaldi para describir la difracción producida por un obstáculo.(Fuente: imagen libre en internet)

Encontrar un fenómeno luminoso diferente e independiente de la reflexión y la refracción justo en esa época debió ser una experiencia sorprendente. Un fenómeno que, además, impide aislar un rayo, el componente básico de luz, aceptado ya cuando Thales de Mileto, en el siglo 6 AC, midiera la altura de la gran pirámide de Egipto con ayuda de un bastón y aplicando las proporciones de semejanza de triángulos rectángulos; usado también en el procedimiento geométrico con el que Eratóstenes, hacia el siglo 3 AC, estimó el tamaño de la tierra. Puede intuirse que ésta es la meta del experimento en el que Grimaldi dispone dos pantallas consecutivas con agujeros alineados sobre la trayectoria luminosa, siguiendo el lineamiento del famoso teorema de Euclides: por dos puntos en el espacio pasa una y sólo una recta; cuyo resultado reportó así (Grimaldo, 1665): “*La luz incidente sobre una superficie blanca y pulida iluminará una base IK [ver Figura 3] notablemente mayor que la que los rayos debieran iluminar si fueran transmitidos en línea recta a través de dos agujeros. Esto es probado en el momento mismo de la realización del experimento, observando el tamaño de la base IK y comparándolo con el de la base NO, calculado bajo la suposición de que dicha base es formada por rayos directos. Además, no debe omitirse que la base iluminada IK aparece bañada en el medio con luz pura y, en cada extremidad, su luz es coloreada*”.

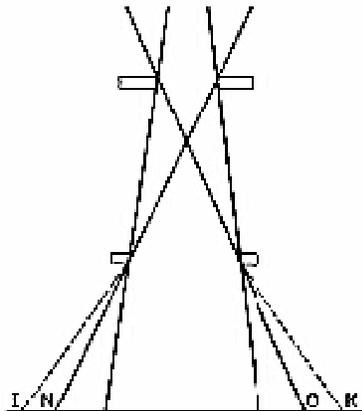


Figura 3: Esquema de Grimaldi que muestra la imposibilidad de aislar un rayo debido a la difracción (Fuente: imagen libre en internet).

Grimaldi concluye, entonces, en su *Propositio I*: “*Lumen propagaturseudeffunditur non solum Directe, Refracte, acReflexe, sed etiamalioquodamquarto modo, Diffractè*” (La luz se propaga no sólo de manera directa, por refracción o por reflexión, existe incluso un cuarto modo, por difracción) (Grimaldo, 1665). Por lo tanto, la difracción consiste en la desviación de los rayos de luz de su trayectoria rectilínea al pasar cerca del borde de un objeto, ensanchando su proyección sobre una pantalla, sin que medie reflexión o refracción. Este

fenómeno depende de los colores de la luz, en el sentido de que los rayos correspondientes a los diferentes colores se desviarán en ángulos distintos, de manera que la luz desviada ya no será “pura y genuina” sino iridiscente, esto es, con una distribución de colores similar a la del arco iris. Llama la atención el recurso explicativo que usa Grimaldi en la Propositio I, N.21, para este comportamiento: “*Durante la propagación, la radiación luminosa (luminisradiationem) constituye nuevas fuentes de radiación con su propia esfera de acción. Radiación secundaria se genera una y otra vez dando lugar a las franjas observadas*” (Grimaldo, 1665). Este argumento es llamativo porque él mismo consideró los rayos como finas “barras”, conformadas por un efluvo continuo de partículas luminosas que se “rompen” (difractan) al pasar cerca al borde de un obstáculo, configurando otras barras. Esta variedad de elementos explicativos en la argumentación de Grimaldi, íntimamente relacionada con la época que le tocó vivir, parece justificar su conclusión de que la luz “*saltemaliquando etiam undulatum*” (“*a veces incluso ondula*”).

La búsqueda del conocimiento pleno del fenómeno luminoso llevó a Grimaldi un paso más adelante: practicó una segunda abertura en la misma pared, de forma idéntica a la primera y suficientemente cercana a ésta para que la luz de los dos lápices que entran al cuarto oscuro se superpusiera en la pared opuesta. Anotó que la región de superposición aparecía más oscura que cuando se iluminaba con uno sólo de los lápices: “*un objeto iluminado puede oscurecerse agregando luz a la que ya está recibiendo*” (Grimaldo, 1665).

Aunque no fue inmediato, el impacto de esta anotación en la concepción de la naturaleza de la luz fue contundente. La hipótesis de “efluvios de partículas inconmensurables” puede vislumbrarse como manifestación de la estructura atómica que Demócrito le atribuyó al cosmos: “*El espacio puro es vacío. En este vacío no existe altura, ni base ni centro, pero, es el espacio físico en el que los átomos se mueven, se acercan y se alejan. [...] Los átomos son los elementos indivisibles de la materia, entidades últimas del universo, eternos e infinitos en número. Los fenómenos se edifican sobre estas entidades últimas y mantienen las propiedades primarias de tamaño y forma y en esta condición son reales y pueden ser conocidos por medio de los sentidos*”. Para la época de Grimaldi esta concepción acumulaba casi 20 siglos de arraigo, dando soporte a la expectativa de aumento de la densidad de partículas inconmensurables en la región de superposición de los efluvios aportados por los dos lápices de luz. En consecuencia, su observación anteriormente citada no se compagina con la hipótesis de los efluvios de partículas.

La distancia entre esta hipótesis y el descubrimiento de Grimaldi se tornó crítica cuando él aceptó como posible “*obtener oscuridad sumando luz*”, ya que ello implica, por lo menos, la sospecha de que la naturaleza de la luz puede ser diferente a la de un efluvo de partículas. Tal sospecha se percibe en su explicación de la generación de iridiscencia en la difracción. Es oportuno tener en cuenta que, a pesar de la profunda aceptación de que gozaba la hipótesis de los efluvios, ésta no era la única sobre la naturaleza física de la luz: existía al menos una alternativa que había acompañado a la hipótesis de los efluvios desde Grecia clásica, probablemente sólo por su atractivo lógico-filosófico, pues no contaba con el respaldo de resultados experimentales o prácticos, los cuales validaban en cambio la hipótesis de los efluvios.

Antes que Demócrito, Parménides de Elea escribió un poema, única obra de la que sobreviven fragmentos en los que puede leerse: “... *El ser llena todo el espacio. El no-ser es vaciedad, de ahí que no pueda existir aunque pueda pensarse...*”. Es evidente que este verso está dedicado a la concepción del cosmos como un *continuum*, en el que “*el pensamiento y el ser se refieren a la misma cosa*”, la cual es contraria a la proclamada por Demócrito, que comienza por declarar la vaciedad del espacio puro. La dinámica de un universo lleno por el “ser” deberá entonces explicarse en términos de movimientos del “ser”, que sin embargo no afectan la naturaleza inmutable de su esencia. Esta condición le confiere una faceta ilusoria a la idea de movimiento en Parménides. No obstante, en ese contexto, la luz sería la manifestación de ciertos movimientos del “ser”.

Esta idea primigenia de la luz como un “movimiento” aparece registrada desde entonces en varias obras de significativa importancia. En la primera década del año 1000, Abu Ali Hasan ibn al-Hasan ibn al-Haitam (latinizado Alhazen), escribió en 7 volúmenes su *Kittab al-Manazirn* (Libro de Óptica) (Risner, 1572), la obra de mayor envergadura en óptica después de los 13 volúmenes de la *Composición Matemáticao Gran sintaxis* de Claudio Ptolomeo – El Astrónomo, escrita en Alejandría hacia el siglo 2 y traducida al árabe con el título de *Almagesto*. En la obra de Alhazen, que dominó el pensamiento de la edad media sobre la óptica, se lee: “*la luz es un movimiento que admite una velocidad variable, siendo menor en los medios más densos. Dicho movimiento puede comprenderse en términos de dos componentes: una paralela y otra normal a la superficie de separación de los medios. La primera no es afectada cuando la luz penetra al segundo medio, mientras que la segunda es impedida por el medio más denso. Así, el movimiento luminoso resultante en el segundo medio será diferente del ocurrido en el primer medio*”.

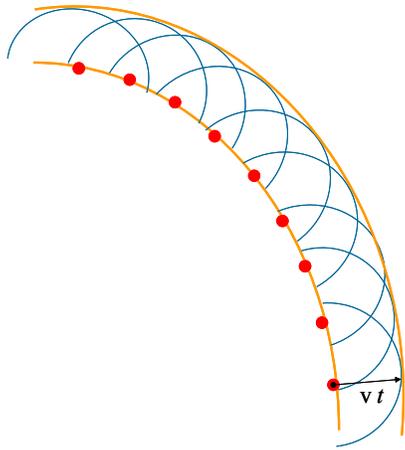
A pesar de que esta explicación conduce a predicciones contrarias a las de la Ley de Snellius, puede considerarse como un canal que comunicó la idea primigenia de “la luz como movimiento” a los pensadores europeos, desde la edad media hasta el rutilante siglo 17. En efecto, Roger Bacon, insigne fraile franciscano a quien la historia bautizó *Doctor Mirabilis*, y quien tallara en Oxford (1266) las primeras lentes de tipo moderno, hizo un reconocimiento especial a la obra de Alhazen en la sección 7 de su *Opus Maius*. Leonardo Da Vinci debió conocer la obra de Alhazen, puesto que estudió en detalle la *cámara oscura* inventada por éste, y dejó en sus escritos indicios de que entendía la luz como una vibración emparentada con la del sonido. Johannes Kepler corrigió inexactitudes en el modelo de visión de Alhazen (cuyos términos anatómicos conservamos actualmente) al desarrollar su propia teoría de imágenes retinianas, hoy vigente. Grimaldi tenía 19 años cuando se publicó *La Dioptrique* de René Descartes, en la que el filósofo expresó: “... recordando la naturaleza que yo he atribuido a la luz, cuando dije que no es otra cosa que un cierto movimiento o una acción concebida en una materia muy sutil, la cual llena los poros de todos los cuerpos...”. La luz como una vibración del *éter*, el quinto elemento cósmico de Aristóteles, el “abrasador”.

Christiaan Huygens dejó evidencia de su conocimiento no sólo de la obra de Alhazen, puesto que resolvió el problema de Alhazen (encontrar el punto de reflexión sobre la superficie de un espejo esférico, convexo o cóncavo, dados dos puntos especificados como el ojo y el objeto visible) desde una perspectiva moderna, sino también de la de Grimaldi, cuyo influjo no sólo le hizo rechazar la explicación de *inflexión de la luz*, propuesta por su amigo Isaac Newton (cuando el efluvio de partículas luminosas rodea un obstáculo, su reflexión y refracción en dicho obstáculo causan la inflexión de su trayectoria), sino que, en particular la *Propositio I, N.21* de Grimaldi lo inspiró para desarrollar el principio y el método de construcción de la propagación del movimiento (ondulatorio) de la luz que hoy llevan su nombre (Figura 4).

Actualmente sabemos que en la incorrección de la explicación de Newton y en el acierto de la actitud de Huygens está la clave que impide que la difracción encuentre sitio dentro del conocimiento de la óptica que se tenía en el Siglo 17. Grimaldi observó lo que, quizá otros antes que él, hubieran querido ver: la evidencia de que la luz es un movimiento, vibraciones de un continuo, capaces incluso de producir oscuridad sumando luz. Es este el profundo sentido de su sentencia “*saltemaliquando etiam undulatum*”.

No logró demostrar que efectivamente es posible producir oscuridad sumando luz, porque para lograrlo es necesario manipular una propiedad que apenas se comprendería cerca de 300 años después: la *coherencia óptica*. Por supuesto que se puede manipular una propiedad por mera intuición, esto es, sin tener conocimiento formalizado de ella, lo cual suele acelerar la evolución de las ideas. A inicios del siglo 19, Thomas Young refinó el experimento de doble abertura de Grimaldi, agregando una pared delantera con

un agujero ubicado sobre la perpendicular que pasa por el punto medio de la doble abertura, con el fin de "limitar las muchas ondas que llegan a los dos agujeros". La mancha de luz en la pared opuesta del cuarto oscuro fue cruzada por las bandas oscuras que Grimaldi no pudo producir (Young, 1804) (Figura 5).



"Al estudiar la dispersión de estas ondas, hemos de considerar aún que toda partícula de materia por la cual avanza la onda, no solamente comunica su movimiento a la partícula siguiente, la cual está en la línea recta trazada desde el punto luminoso, sino que también confiere necesariamente movimiento a todas las otras que la tocan y que se oponen a su movimiento. El resultado es que, alrededor de cada partícula aparece una onda, en cuyo centro estará la partícula"

Principio de Huygens

Método de construcción de Huygens.

Desde cada punto en un frente de onda se trazan arcos de circunferencia con radios de longitud correspondiente al espacio recorrido a velocidad v en un período t , esto es vt . La envolvente de dichos arcos determinará el nuevo frente de onda.

Figura 4: Concepción ondulatoria de la luz de Christiaan Huygens (Fuente: elaboración propia)

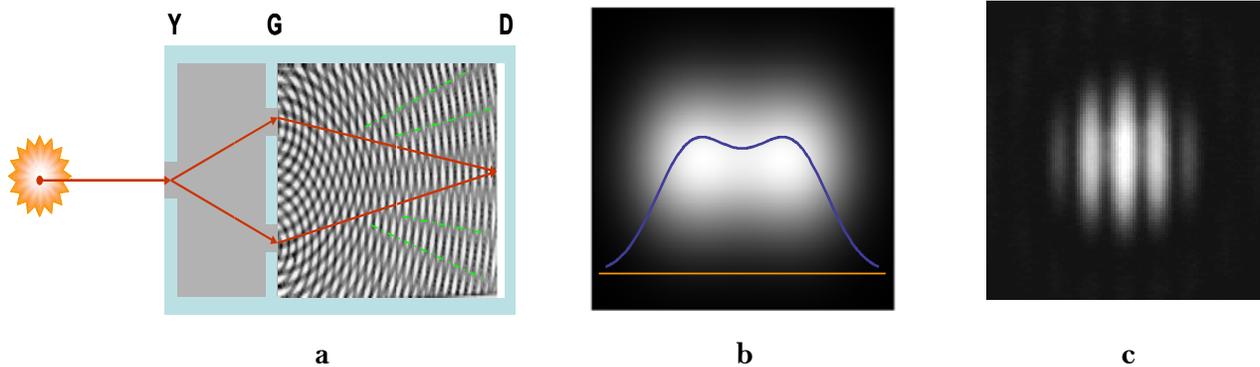


Figura 5: a) Montaje interferométrico de Young. G es la pared de doble rendija de Grimaldi y Y la pared adicionada por Young. Los arcos representan las ondas superpuestas, las flechas, los rayos de luz y las líneas punteadas señalan zonas de interferencia destructiva. b) Patrón de difracción observado por Grimaldi sobre la pared D del montaje en a). c) Patrón de interferencia observado por Young sobre la pared D. (Fuente: elaboración propia, laboratorio de óptica, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín).

Entre 1801 y 1805, Young leyó varios trabajos ante la *Royal Society*, introduciendo lo que él llamó *principio de interferencia*, como explicación al patrón de franjas producido por su versión del experimento de doble rendija de Grimaldi: "These fringes are also the joint effect of the light which is in flected directly to ward the shadow, from each of the outlines of the object [...]. From the experimental results [...] we may be allowed to infer, that a homogeneous pencil of light is possessed of opposite qualities, capable of neutralize or destroying each other, and of extinguishing light where they happen to be united" (Young, 1804).

Young debió comprender lo que este descubrimiento podría y le podría significar. Aunque hacía tiempo que la Santa Inquisición (o Congregación para la Defensa de la Doctrina de la Fé) había dejado de amenazar a los científicos, las comunidades científicas eran (y lo siguen siendo) conservadoras en grado sumo. Así que adelantó en su defensa: “*The advocates of the projectile hypothesis of light must consider that...I have advanced in this paper no general hypothesis whatever. But, since we know that sound diverges in concentric surfaces, and that musical sounds consist of opposite qualities, capable of neutralizing each other, and succeeding at certain equal intervals, which are different according to the difference of the note, we are fully authorized to conclude, that there must be some strong resemblance between the nature of sound and that of light*” (Young, 1804).

No obstante, la prueba fehaciente de que la luz era un movimiento ondulatorio no fue bien recibida en un ámbito convencido de las características contrarias que le otorgara Newton. La *Royal Society* criticó sin ambages el principio de interferencia de Young, pasando por encima del resultado limpio e inobjetable de su experimento. Lord Broughman manifestó en la *Edinburgh Review* que sus artículos “estaban desprovistos de todo tipo de mérito” (Hecht, 1990).

Sin embargo, no todos los científicos prestigiosos de la época eran “*advocates of the projectile hypothesis of light*”. Miembros de la Academia de Ciencias de Francia simpatizaban abiertamente con la hipótesis de la luz como un movimiento vibracional. Por primera vez la larga historia entre las dos concepciones, no sólo diferentes en sus fundamentos sino irreductibles la una en la otra, llegaba a un claro punto de quiebre con la evidencia experimental presentada. Además, si Inglaterra había tenido a Newton, Francia había tenido a Descartes. El afamado académico Dominique François Jean Arago fue el artífice del concurso científico, convocado por la Academia de Ciencias de Francia para “dirimir de una vez por todas el asunto sobre la naturaleza de la luz”; y estimuló la participación de su amigo Augustin Jean Fresnel, quien no conocía las obras clásicas sobre óptica porque sólo hablaba francés, pero cuyo talento lo llevó a matematizar las ideas de Huygens y de Grimaldi, formalizando la concepción de la luz como ondas que se propagan en el éter.

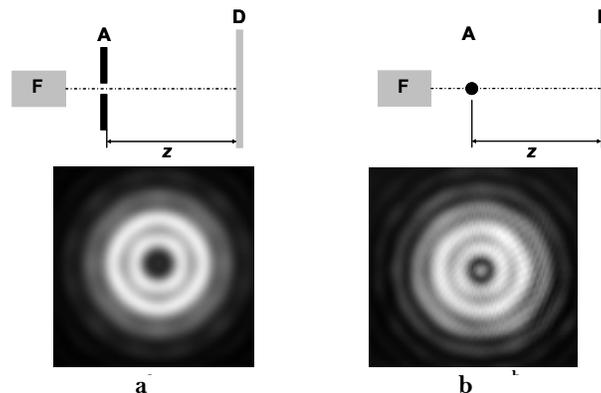
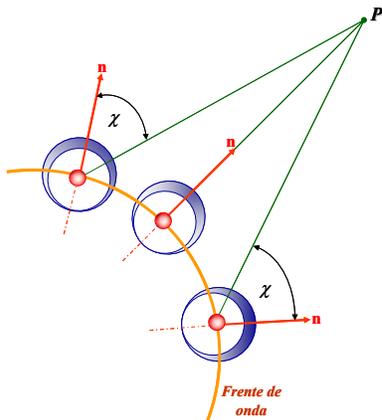


Figura 6: Patrones luminosos predichos por Fresnel. Éstos son recogidos sobre una pantalla D cuando la luz de una fuente F ilumina a) un agujero circular practicado sobre una pantalla oscura A (nótese la sombra en el centro) y b) un obstáculo opaco en la posición A (balín); nótese el *punto de Poisson* en el centro de la sombra geométrica del obstáculo (Fuente: elaboración propia, laboratorio de óptica, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín).

El no menos afamado académico Simeón Poisson, jurado evaluador del concurso junto a otros de la talla de Pierre Simon conde de Laplace y Augustin Louis Cauchy, descalificó el trabajo de Fresnel por predecir un comportamiento *contra natura* de la luz, pues violaba todos los presupuestos de la óptica newtoniana y de la concepción de efluvios de partículas. En efecto, la teoría de Fresnel predice la aparición de un punto brillante dentro de la sombra geométrica proyectada por un objeto opaco al ser iluminado y, peor aún, la

aparición de un punto oscuro en el centro de la mancha de luz que proyecta una abertura transparente cuando es iluminada (Figura 6). Fue Waterloo. Arago y Fresnel aportaron la prueba experimental: el punto brillante en el centro de la sombra geométrica de una esfera metálica, que pasó a la historia con el irónico nombre de *punto de Poisson*. La teoría que formalizaba la difracción de Grimaldi y la interferencia de Young fue declarada *Mémoire Couronné* en 1818.

Aunque existe cierta tradición de considerar la difracción de Grimaldi y la interferencia de Young como fenómenos ópticos específicos, sabemos hoy en día que están íntimamente relacionados, como fue establecido por el principio de Huygens-Fresnel y formulado rigurosamente por Gustav Robert Kirchhoff y Arnold Sommerfeld en su célebre integral de difracción (Figura 7).



cada punto sobre un frente de onda es un emisor fundamental de onditas secundarias esféricas, cuya energía se concentra en la dirección de la normal al frente de onda (n) y es nula en la dirección contraria. La amplitud de la onda en cada punto P de un frente posterior, resulta de la interferencia de tales onditas en dicho punto. Dada la anisotropía (asimetría) en la distribución de la energía de tales onditas, su participación en la interferencia en P dependerá del ángulo χ entre la normal y la recta al punto P.

Figura 7: Principio de Huygens-Fresnel (Fuente: elaboración propia)

La diferencia esencial entre la difracción de Grimaldi y la interferencia de Young es la naturaleza continua o discreta del conjunto de emisores fundamentales. En ambos casos, el conjunto es acotado por el borde de las aberturas que producen la difracción o la interferencia, pero será no-contable o no-numerable en el caso de difracción, mientras que es contable o numerable en el de interferencia.

3 EL SIGLO DE ORO

El siglo 19, inaugurado con el experimento de Young (y Grimaldi, siendo justos) y con la teoría de difracción de Fresnel, fue el siglo de oro de la concepción ondulatoria de la luz (Izuka, 1985). En 1819 se publicaron las *leyes de interferencia y polarización* de Fresnel y Arago. También, las célebres fórmulas de Fresnel, que determinan las amplitudes de las ondas reflejada y transmitida por una superficie. En 1845, Michel Faraday descubrió que la polarización de la luz puede ser alterada por un campo magnético, fenómeno conocido actualmente como *efecto Faraday*. En 1849, Armand Hippolyte Louis Fizeau midió la velocidad de la luz con un sistema estroboscópico: 315.300 km/s; medida confirmada por Jean Bernard León Foucault mediante un procedimiento alternativo, basado en un sistema de espejos rotatorios ideado por Charles Wheatstone. Fizeau y Foucault hicieron florecer las enseñanzas de su maestro Arago. En 1850, Foucault presentó en la Academia de Ciencias el puntillazo final a las afirmaciones de Newton: la velocidad de la luz en agua era menor que en aire, al contrario de lo que sostuvo el sabio inglés.

Desde 1825, los defensores de la teoría de los efluvios de partículas eran apenas un puñado. Pero el esplendor llegó al clímax en 1865, doscientos años después de la publicación de la obra de Grimaldi, con la culminación de la Electrodinámica de James Clerk Maxwell (Maxwell, 1873). Como consecuencia de la Electrodinámica, Maxwell adelantó la hipótesis de que la luz no es cosa diferente a “*una ondulación transversal del mismo medio que produce la electricidad y el magnetismo*” (medio denominado *éter luminífero*), la cual recibió un respaldo definitivo con el descubrimiento experimental de las ondas electromagnéticas, realizado por Heinrich Rudolph Hertz en 1887.

Hubo un último paso en este siglo de oro: Maxwell propuso un procedimiento para medir la velocidad de translación de la tierra con respecto al éter luminífero, realizado por Albert Abraham Michelson, en 1881. Maxwell murió antes de que se reportaran los resultados que indicaban que la tierra se mantenía estacionaria con respecto al éter: la velocidad de la luz no sufría las perturbaciones que debería producirle la presencia del éter luminífero.

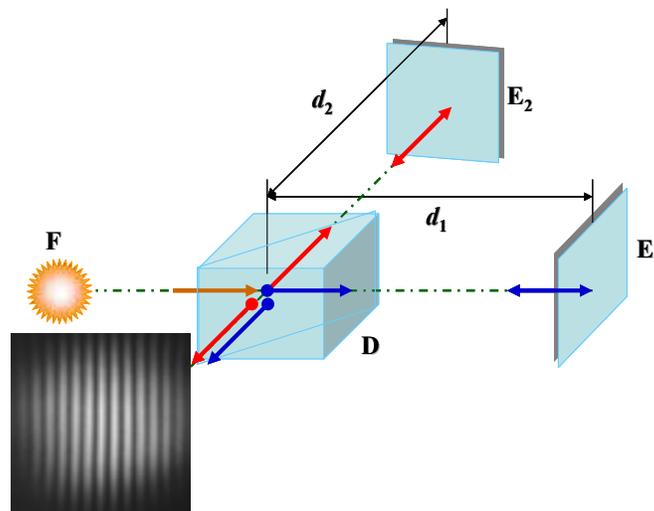


Figura 8: Esquema conceptual del experimento de Michelson-Morley. La luz proveniente de la fuente F es dividida en dos haces ortogonales por el dado divisor de haz D. Los haces son reflejados por los espejos E_1 y E_2 , de modo que el dado divisor de haz puede reunirlos a la salida, produciendo un patrón de franjas de interferencia. En presencia del éter luminífero, las franjas deberán desplazarse al rotar el interferómetro alrededor de un eje ortogonal al plano sobre el cual descansa. Dicho desplazamiento no fue observado en las múltiples realizaciones del experimento (Fuente: elaboración propia).

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) señaló errores que Michelson acogió para desarrollar, en los siguientes 7 años, el interferómetro que hoy lleva su nombre (Figura 8), con el que, junto con Edward William Morley, repitió el experimento. Ellos consideraron que la Tierra se mueve por el éter produciendo un *viento del éter* detectable. Cada año, la Tierra recorre una distancia enorme en su órbita alrededor del Sol, a una velocidad de 30 km/s (más de 100.000 km/h), de manera que la dirección del viento del éter con respecto a la posición de la estrella variaría al medirse desde la Tierra, y así podría ser detectado. Por esta razón, el experimento debería llevarse a cabo en varios momentos del año, lo cual adicionalmente permitiría eliminar los efectos que podría provocar el Sol en el viento, al moverse la tierra por el espacio. Ahora bien, el efecto del viento del éter sobre las ondas de luz sería como el de la corriente de un río en un nadador que se mueve constantemente a favor o en contra de ella: en algunos momentos, el nadador sería frenado y en otros impulsado. Así, la luz solar, al llegar a la Tierra en diferentes posiciones con respecto al éter, lo haría con diferentes velocidades. Este cambio de velocidad provocaría el desplazamiento

de las franjas de interferencia, producidas por el interferómetro de Michelson, cuando la orientación del dispositivo fuera cambiada; en particular, dicho desplazamiento debería ser máximo y perfectamente visible si el interferómetro se rota 90° alrededor de un eje ortogonal a su plano de planta (el plano sobre el que descansa).

Todas las realizaciones del experimento confirmaron el resultado de 1881. En 1887, Michelson y Morley reportaron que la velocidad de la luz no cambia aunque varíe el estado de movimiento de la fuente que la produce o del observador que la mide. Tres años después, disminuidos en parte la sorpresa y el desconcierto inicial que produjo el limpio resultado interferométrico, Jules Henri Poincaré señaló: “¿*Nuestro éter realmente existe? Yo no creo que observaciones más precisas nos puedan revelar algo más que desplazamientos relativos*”.

La intuición de Grimaldi se vislumbra como corolario de esta acotación: si el éter no es físicamente detectable ni teóricamente necesario, las ondas de luz no requieren de un medio material, es decir, su naturaleza es inmaterial. Más aún, la luz irrumpió como el único fenómeno universal (igual para todos los observadores), como lo puntualizó un joven Albert Einstein en uno de sus brillantes artículos de 1905: “*La introducción de un “éter luminífero” resultará ser superflua, puesto que el punto de vista que habrá de desarrollarse aquí no necesitará un “espacio estacionario absoluto [...] La luz siempre se propaga en el espacio con una velocidad definida c , la cual es independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor*”.

4 ANOTACIONES FINALES

La hegemonía de la concepción ondulatoria de la luz duró prácticamente un siglo. Su ímpetu disminuyó justo al inicio del siglo 20 debido principalmente a su silencio frente a los resultados de un conjunto de experimentos desarrollados desde la segunda mitad del siglo 19: el espectro de radiación de cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico y el espectro de emisión del hidrógeno (Eisberg y Resnick, 1978). Silencio acentuado por una falla incorregible, puesta de manifiesto en el intento de explicación del primer experimento, realizado por John William Strutt Lord Rayleigh y Sir James Jeans en 1900, conocida hoy como *la catástrofe del ultravioleta* (Eisberg y Resnick, 1978).

Sin entrar en detalles sobre estos experimentos, puede afirmarse que ellos constituyeron la puerta de retorno para los efluvios de partículas, cualificados de manera diferente a como se concibieron hasta el siglo 19: el *quantum* electromagnético, introducido por Max Karl Ernst Ludwig Planck en 1900 para corregir el fallo de la teoría de Rayleigh-Jeans, prácticamente un siglo después de que Young realizara su experimento de la doble rendija. Este aporte le mereció el premio Nóbel de física otorgado en 1918, justo al siglo de que la teoría de difracción de Fresnel fuera declarada *Mémoire Courronné*. No fue Planck, sin embargo, sino Einstein quien en 1905 (un siglo después de que Young intentara defenderse ante la *Royal Society*) propuso que los *quanta* de Planck constituirían un efluviio de partículas electromagnéticas que, al colisionar con los átomos de un material, daban cuenta del efecto fotoeléctrico. Esta explicación le mereció el premio Nóbel de física de 1921. Los *quanta* fueron empleados nuevamente por Niels Henrik David Bohr para explicar el espectro de emisión del hidrógeno como resultado de la colisión de sus átomos con *quanta* electromagnéticos. Esto le permitió además predecir la emisión de espectros no-visibles por el hidrógeno, los cuales fueron verificados experimentalmente. Tales explicaciones, que le merecieron el premio Nobel de física de 1922, constituyeron la primera aproximación formal, en el sentido contemporáneo, a la estructura atómica de la materia.

Así, un nuevo escenario para la contienda entre esas dos ideas primigenias sobre la luz (efluvios de partículas y movimiento ondulatorio) quedó servido a inicios del siglo 20, con un aderezo adicional. Conociendo que la luz puede manifestarse como onda electromagnética o como *quantum* electromagnético, el Príncipe Louis Victor Pierre Raymond 7° Duque de Broglie (la región donde naciera Fresnel en 1788) propuso en 1924 que la materia también debe manifestarse como onda, además de hacerlo como partícula, en virtud de un principio de simetría de la naturaleza. Tal simetría puede apreciarse en la doble solución de las ecuaciones de la Física Cuántica: un campo de ondas continuo con un significado estadístico, y una solución puntual correspondiente a una partícula localizada. Su planteamiento, recibido con frialdad por los físicos de entonces, fue demostrado experimentalmente en 1927, mediante difracción de electrones, realizada independientemente por Clinton Joseph Davisson en norteamérica y George Paget Thomson en Gran Bretaña. Este último era el hijo de Joseph John Thomson, galardonado con el premio Nobel de Física de 1906 por su descubrimiento de la primera partícula sub-atómica, precisamente el electrón. De Broglie recibió el premio Nobel de Física en 1929 y Davisson y Thomson lo compartieron en 1937. Francesco María Grimaldi no pudo haberlo soñado: ¡hasta la materia misma podía difractarse! Estos laureles fueron de magnitud similar al logrado por Fresnel en 1818. No obstante, un estudio pormenorizado de dicha contienda en el escenario del siglo 20 amerita un próximo trabajo, porque aunque a estas alturas el descubrimiento de la difracción de la luz por Grimaldi podría parecer una contribución modesta, lo que siempre será actual, como la historia lo enseña una y otra vez, es su valerosa convicción: “*Seamos honestos, nosotros no sabemos realmente nada sobre la naturaleza de la luz y es deshonesto emplear palabras rimbombantes carentes de sentido*”.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a los profesores Giorgio Matteucci (Università degli Studi di Bologna) y Fernando Medina Estrada (Universidad de Antioquia) sus inspiradoras discusiones sobre la vida y obra de Francesco María Grimaldi.

Referencias

- Eisberg, R y R. Resnick (1978), *Física Cuántica*. Editorial Limusa, México.
- Grimaldo, F. M.(1665), *Physico-Mathesis De Lumine Coloribus Et Iride*. Bononiae: Ex Typographia Haeredi Victorij Benatij.
- Hecht, E. (1990), *Optics*. 2nd ed., Addison-Wesley, Reading.
- Izuka, K. (1985), *Engineering optics*. Springer-Verlag, Berlin.
- Maxwell, J. C. (1873), *Treatise on Electricity and Magnetism*. <http://en.wikisource.org/wiki/>
- Oldenburg, H. ed. (1665-1715), *Philosophical Transactions of the Royal Society*. vols. 1-30. London.
- Risner, F. (1572), *Opticae thesaurus: Alhazeni Arabis libri septem, nunc primum editi; Eiusdem libri De Crepusculis et nubium ascensionibus*.
- Sommervogel, C. (1890-1960), *Bibliothèque de la compagnie de Jésus*. 12 volumes. Société Belge de Librairie, Bruxelles.
- Young, T.(1804), The Bakerian lecture. Experiments and calculations relative to physical optics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **94** 1-16.