

**EL FENÓMENO DE LA DIFRACCIÓN EN LA HISTORIA DE LA ÓPTICA Y EN LOS
LIBROS DE TEXTO
REFLEXIONES SOBRE SUS DIFICULTADES DE APRENDIZAJE**

*Diffraction phenomenon in optical history and textbooks:
Reflections on learning difficulties*

Silvia Bravo ^(1,2) [sbravo@herrera.unt.edu.ar]

Marta Pesa ^(1,2) [mpesa@herrera.unt.edu.ar]

(1) Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Universidad Nacional de Tucumán
Avenida Independencia 1800. San Miguel de Tucumán

(2) Facultad Regional Tucumán,
Universidad Tecnológica Nacional
Rivadavia 1050. San Miguel de Tucumán

Resumen

Este trabajo aborda las dificultades que manifiestan los alumnos en el cambio de paradigma entre la óptica geométrica y la óptica ondulatoria. Se propone interpretar el origen de las mismas en el nivel universitario. Se focaliza la investigación en dos aspectos: el primero de ellos se refiere a la similitud entre la evolución de las ideas fundamentales en la historia de la ciencia y la evolución de las concepciones de los estudiantes desde aquellas del sentido común hasta las de la enseñanza formal, y el segundo a las características del desarrollo lógico del tema en los libros de texto. Se realiza una reseña histórica sobre las teorías acerca de la naturaleza de la luz, analizando el papel del fenómeno de la difracción en el cambio de paradigma. Los resultados permiten establecer cierto paralelismo entre las dificultades que manifiestan los alumnos durante su aprendizaje y las dificultades que tuvo la comunidad científica para aceptar el modelo ondulatorio. Luego se realiza una caracterización del desarrollo de la óptica en los principales libros de texto de nivel universitario, centrando el análisis en la forma en que se introduce y desarrolla la óptica ondulatoria. El análisis de libros de texto permite inferir que la secuencia del desarrollo de los temas y algunas representaciones que se utilizan pueden reforzar en algunos casos el uso acrítico del modelo de rayos. Por último, se fundamenta la importancia de que los docentes tengan en cuenta las dificultades de los alumnos y las interpretaciones sobre el origen de las mismas para el diseño de actividades y/o propuestas didácticas.

Palabras clave: óptica ondulatoria, historia y filosofía de la ciencia, libros de texto.

Abstract

This paper addresses the difficulties showed by students in the paradigm shift between geometrical optics and wave optics. It tries to interpret its origin at the university level. The research focuses on two aspects: the similarity between the fundamental ideas in the history of science and students conceptions, and the logical development of the issue in textbooks. A historical review of theories about the nature of light is developed analyzing the role of diffraction phenomenon in the paradigm shift. A characterization of the development of optics in major textbooks at university level is then performed, focusing the analysis on the way wave optics is introduced and develop. The results

indicate some parallelism between students difficulties and the difficulties experienced by the scientific community in order to accept the wave model. The analysis of textbooks showed that the developmental sequence of topics and some representations used can sometimes reinforce the uncritical use of the ray-model. Finally, it is marked the importance that teachers take into account students difficulties and the interpretations about its origin for the design of educational activities and proposals.

Keywords: wave optics, history and philosophy of science, textbooks.

Introducción

Aunque el mundo de las ondas luminosas sea la experiencia más cotidiana de los estudiantes y tal vez una de las más atractivas, desde el punto de vista didáctico la comprensión del modelo ondulatorio implica un alto grado de dificultad durante su aprendizaje. Numerosos aportes de la investigación educativa en el ámbito del modelo ondulatorio de la luz durante las últimas décadas (por ejemplo, Wosilait et al., 1999; Colin y Viennot, 2001; Maurines, 2010) son coincidentes en señalar la dificultad que manifiestan los alumnos en el cambio de paradigma entre la óptica geométrica y la óptica ondulatoria. Los alumnos resuelven las situaciones problemáticas referidas a la óptica ondulatoria con razonamientos basados en modelos de la óptica geométrica o mezclando acriticamente elementos de ambos modelos, independientemente de los ámbitos explicativos de los mismos.

Si se analiza el papel que tuvo el fenómeno de la difracción en la formulación de las distintas teorías sobre la naturaleza de la luz y todos los intentos que se hicieron para explicarlo sin hacer abandono de la propagación rectilínea de la luz, no resulta raro que hoy los alumnos evidencien serias dificultades en el cambio de paradigma entre la óptica geométrica y la óptica ondulatoria. En efecto, desde que fue observado en las cuidadosas y detalladas experiencias de Grimaldi y de Hooke en 1618, no pudo ser explicado por la teoría ondulatoria de Huygens ni por la corpuscular de Newton y tuvo que transcurrir un siglo para que se pudiera vencer el peso de la autoridad de Newton, con la genial interpretación de Fresnell en 1917 (Hull, 2011).

Desde la epistemología genética, la hipótesis fundamental es que hay un “*paralelismo entre el progreso realizado en la organización lógica y racional del conocimiento (historia de las ciencias) y el proceso psicológico formativo correspondiente*” (Piaget J., 1975). Desde esta perspectiva, “*las normas elaboradas por el sujeto epistémico en el curso de su génesis serían comparables a las normas inherentes al pensamiento científico*” (Piaget y García, 1987)

Este postulado básico de la psicología y de la epistemología genética, según el cual la explicación de todo fenómeno debe buscarse en su propia génesis, ha contribuido a dar un nuevo papel a la dimensión histórica, tanto en la práctica pedagógica como en la reflexión sobre la educación. Desde una perspectiva que considera el aprendizaje un proceso constructivo mediado por el profesor, esta dimensión histórica indica que para comprender bien se necesita reconstruir no tanto el concepto u objeto de que se trate, sino el recorrido que lo ha llevado desde sus orígenes hasta ese concepto u objeto actual (Munari, 1999). Algunas dificultades que manifiestan los estudiantes durante el aprendizaje se podrían comprender entonces desde esta perspectiva.

Según Matthews (1994), una parte significativa de las publicaciones sobre historia y filosofía de la ciencia y enseñanza de las ciencias en la década del noventa se ha ocupado de la asociación de la historia de la ciencia y la psicología del aprendizaje. Más precisamente, de averiguar en qué forma se influyen mutuamente el desarrollo cognitivo individual y el proceso del desarrollo histórico conceptual. Pero además, numerosos estudios realizados en distintas áreas de la enseñanza de Física muestran cómo la historia de los desarrollos cognitivos individuales y el proceso de desarrollo

conceptual arrojan luz uno sobre el otro. En el campo de la mecánica se pueden mencionar, por ejemplo, a DiSessa (1982) y McDermott (1984) entre muchos autores que sugieren que las ideas previas de los alumnos sobre fuerza y movimiento reflejan los fundamentos de la dinámica aristotélica. En el área de la óptica, numerosos trabajos (Guesne, 1985; Feher y Rice, 1985; Golberg y McDermott, 1987; Pesa, 1997) muestran que los primeros modelos en el desarrollo histórico del área presentan grandes similitudes con las preconcepciones espontáneas que los estudiantes usan para explicar, interpretar y predecir la realidad. Por ejemplo, la explicación de cómo se forman las imágenes tomó miles de años de construcción. Si bien Kepler logró una explicación más o menos clara sobre la formación de la imagen en el ojo no pudo aceptar la inversión de ésta respecto del objeto. La persistencia de las viejas teorías era muy grande: Aristóteles ya reconocía que si la luz saliera del ojo veríamos en la oscuridad, y no obstante, usa este modelo para explicar otros fenómenos relacionados con la visión.

La historia de la física muestra así el largo y lento proceso de reflexión y análisis que requirió al hombre ir construyendo un sistema científico coherente sobre los fenómenos más simples relacionados con la luz y la visión (Pesa y Cudmani, 1993). El estudio de casos de la historia de la física podría entonces aportar valiosas pistas para comprender no sólo la preconcepciones de los estudiantes, al poner en evidencia sus semejanzas con teorías que alguna vez la ciencia aceptó como válidas, sino también la complejidad que implican los procesos de cambio de paradigma, tales como los asociados a la transición entre la óptica geométrica y la óptica ondulatoria.

Con el objetivo de determinar si la dificultad que evidencian los estudiantes en el cambio de paradigma durante el aprendizaje de la óptica ondulatoria en la enseñanza formal se puede interpretar desde la hipótesis fundamental de la epistemología genética, vamos a realizar en primer lugar una reseña histórica para analizar el papel del fenómeno de la difracción en la evolución de la teoría ondulatoria de la luz y en segundo lugar, una caracterización sobre el desarrollo de los conceptos de la óptica ondulatoria en los principales libros didácticos o libros de texto de nivel universitario básico.

El análisis del fenómeno de la difracción en la evolución de la teoría ondulatoria de la luz se focalizará en los desarrollos correspondientes a los siglos XVII, XVIII y XIX. ¿Por qué este período? La difracción de la luz se observó por primera vez en el siglo XVII y recién al cabo de dos siglos caracterizados por disputas entre diferentes teorías, se logró encontrar una explicación satisfactoria al mismo mediante la teoría ondulatoria en el siglo XIX. Aunque luego las teorías siguieron evolucionando para dar cuenta de los fenómenos de emisión y absorción y la interacción de la luz con la materia, el fenómeno de la difracción aún hoy se explica desde la teoría ondulatoria de la luz.

Las preguntas principales que guían nuestro análisis histórico al respecto son las siguientes:

- ¿Por qué se tardó dos siglos en reconocer la naturaleza ondulatoria de la luz desde la observación del fenómeno de la difracción?
- ¿Los obstáculos en la construcción de un nuevo paradigma en la historia de las ciencias, tienen alguna similitud con las dificultades que manifiestan los alumnos?

El segundo aspecto que vamos a considerar se refiere al lugar que ocupa la difracción de la luz en la secuencia de desarrollo de los conceptos en los principales libros didácticos sobre óptica en nivel universitario. Nos parece un aspecto de relevancia por cuanto: a) los alumnos van a ir construyendo paulatinamente sus modelos de óptica a partir de las características de las diferentes propuestas didácticas en la enseñanza formal y el manejo de materiales como el libro de texto, b) el currículo que elabora el profesor en la institución muchas veces está pautado por el desarrollo que proponen los textos y c) la consulta a libros didácticos es una práctica usual en el nivel universitario y exigida por los profesores en la mayoría de los casos.

Reconocemos, sin embargo, que el punto de partida para el desarrollo conceptual de la óptica ondulatoria en la instrucción formal no ha sido el mismo en la historia de la ciencia. En efecto, cuando

el fenómeno de difracción fue observado por primera vez, las teorías sobre la luz no pudieron dar una explicación satisfactoria al mismo hasta la aceptación plena de la hipótesis ondulatoria (Gribin, 2003). Hoy, en cambio, se conoce que la luz es una onda electromagnética que puede producir fenómenos de diferente tipo en su interacción con la materia (reflexión, refracción, difracción, polarización) y desde este concepto se plantea el desarrollo de la óptica ondulatoria en la instrucción formal.

Las preguntas que van a guiar el análisis de los libros didácticos son las siguientes:

- ¿De qué manera proponen el desarrollo conceptual de la óptica ondulatoria los diferentes textos de nivel universitario?
- ¿Qué lugar ocupa el fenómeno de la difracción en ese desarrollo?
- ¿Algunos aspectos de las propuestas de los diferentes textos podrían tener relación con las dificultades manifestadas por los alumnos en el cambio de paradigma entre la óptica geométrica y la óptica ondulatoria?

El fenómeno de la difracción en la historia de la naturaleza de la luz

Desde la época de los griegos se han elaborado diversas teorías en el intento de responder a la incógnita sobre qué es la luz. Algunos consideraban que el objeto desprendía imágenes que eran captadas por los ojos, otros, en tanto, sostenían que el ojo emitía un rayo de luz que se propagaba en línea recta hasta alcanzar el objeto. Los avances en Occidente respecto a estas teorías surgieron recién a partir del siglo XV, cuando la física comienza a desarrollarse como ciencia con Galileo y se intensifica luego a finales del siglo XVI, con el uso de lentes e instrumentos ópticos que permitieron observar, analizar y experimentar los fenómenos luminosos. Los científicos abandonaron la especulación escolástica y comenzaron a estudiar la naturaleza a través del experimento, con notables resultados. A partir del siglo XVII, las disputas sobre la concepción de la naturaleza de la luz estuvieron basadas en un mayor número de experimentos y predicciones y centradas en encontrar aspectos que pudieran invalidar una u otra concepción. En las primeras décadas se destacan los escritos de los franceses Descartes y Gassendi.

René Descartes (1596-1650) atribuía el fenómeno de la visión a la presión ejercida por un objeto luminoso sobre un fluido universal, de tal forma que el objeto luminoso empujaba al fluido y este empuje se traducía “instantáneamente” en una presión sobre los ojos de quien está mirando el objeto luminoso. La luz se interpretaba como la acción de un cuerpo luminoso sobre una “materia muy sutil y muy fluida”, que llenaba los “poros” de los cuerpos (Welti, 2013). Con estas hipótesis brindó explicaciones acerca de la reflexión de la luz, de la refracción y del origen de los colores. Consideraba que los distintos colores obedecen a una mayor o menor rotación de la materia sutil que se encuentra en una superficie, cuando la luz interactúa con ella. Aunque esta teoría solo se refería a una presión constante sobre los ojos, estaba muy cerca de una teoría de ondas de presión análogas a las ondas de presión sobre un líquido cuando se golpea su superficie. En este sentido, fue el holandés Christiaan Huygens quien avanzó más tarde con el desarrollo de una teoría del tipo de ondas de presión (Gribin, 2003).

Thomas Hobbes (1588-1679) también había elaborado una teoría mecanicista acerca de la propagación de la luz. Según él, la acción de la fuente luminosa se explica mediante un movimiento de sístole-diástole, análogo al del corazón. La emisión de la luz surge en forma de pulsos que se propagan en forma instantánea, y en este sentido, también fue un precursor de la teoría ondulatoria. Consideraba, además, que la acción física de la luz era insuficiente para producir la visión y su teoría remite a un complejo sistema psíquico-fisiológico para explicar la visión (Leivas, 2007).

Gassendi (1592-1655) recuperó la antigua teoría del atomismo y consideró que si todo estaba formado por pequeñas partículas, la luz no era una excepción. En consecuencia, fue el primero en postular la hipótesis corpuscular sobre la naturaleza de la luz. Según Gassendi, la luz tenía como

causa unas corrientes de partículas muy diminutas que surgían de objetos brillantes, como el sol, y que chocaban contra los ojos del observador. Más tarde sería Isaac Newton quien retomara estas ideas y reforzara sus argumentos para proponer también su teoría corpuscular de la luz (Gribbin, 2003).

La segunda mitad del siglo XVII, entonces, se caracterizó por las constantes discusiones entre los partidarios de ambas hipótesis a través de la publicación de libros, intercambio de correspondencia y duros debates con opiniones encontradas. Los principales exponentes de ideas y/o resultados experimentales referidos a la naturaleza y propagación de la luz en este período fueron el italiano Francesco Grimaldi, el holandés Christiaan Huygens y los ingleses Robert Hooke e Isaac Newton. Aquí se debe destacar que, aunque Grimaldi no llegó a formular una teoría acerca de la naturaleza de la luz, fue el primero que puso en evidencia a través de experiencias muy cuidadosas el fenómeno de la difracción. La figura N° 1 muestra, en una línea de tiempo, la época en que vivieron y las fechas de las contribuciones más importantes de cada uno de ellos.

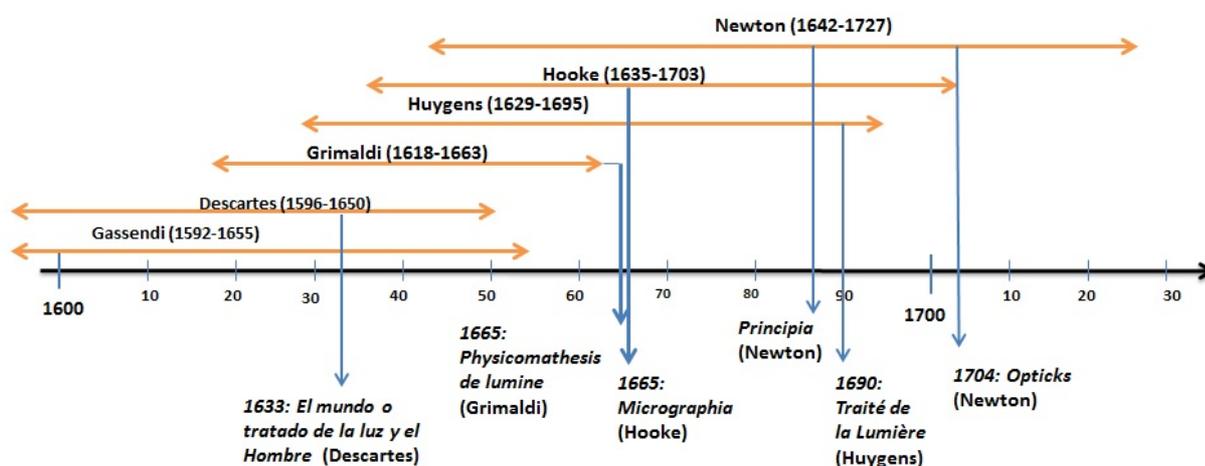


Fig. N° 1: Principales exponentes de las teorías sobre la naturaleza de la luz durante el siglo XVII

La palabra *difracción* fue acuñada por el físico italiano Francesco María Grimaldi (1618-1663), profesor de matemáticas del colegio de los jesuitas de la Universidad de Bolonia, como producto de una detallada investigación sobre fenómenos luminosos en la década de 1660 (Zajonc, 1994; Gribbin, 2003). El término proviene del latín *diffRACTum*, y éste del verbo *diffRINGERE* que significa *quebrar o romper en pedazos*.

En sus experimentos dejaba pasar un rayo de luz solar a un cuarto oscuro a través de un orificio lo más pequeño posible en una de sus paredes, para iluminar la pared opuesta encontrando 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 (Sepúlveda, 2014). Encontró resultados similares cuando observó en la pared opuesta la sombra de un delgado hilo colocado dentro de la trayectoria del haz de luz. Así observó por primera vez el fenómeno de la *difracción* por un obstáculo: franjas iluminadas dentro de la sombra del objeto. Además, las sombras eran más anchas de lo que predecía el modelo de rayos y estaban coloreadas, siempre azuladas del lado más cercano a la sombra central, y rojizas en el otro extremo (Pesic, 2007).

También descubrió que, cuando el haz de luz pasaba a través de un segundo orificio pequeño y llegaba a una pantalla, la imagen que formaba el punto de luz sobre dicha pantalla tenía bordes coloreados y era ligeramente más ancha de lo que tenía que ser si la luz hubiera viajado en línea recta a través del agujero. Esta sencilla experiencia demuestra la imposibilidad experimental de aislar un rayo, debido a la difracción. La figura N° 2 muestra un esquema elaborado por Grimaldi (1665) en el cual pone de manifiesto con un diagrama de rayos el razonamiento que emplea, además de describir con detalle

los resultados obtenidos: “[...] *no debe omitirse que la base iluminada IK aparece bañada en el medio con luz pura y, en cada extremidad, su luz es coloreada*” (Sepúlveda, 2012).

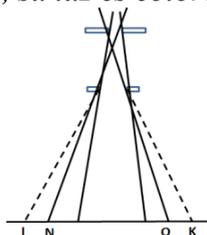


Figura N° 2: Diagrama de Grimaldi para describir la difracción por un segundo orificio alineado con el primero (Grimaldi, 1665)

Sus observaciones lo llevaron a la conclusión de los rayos de luz se desvían de su trayectoria rectilínea al pasar cerca del borde de un objeto, ensanchando su proyección sobre una pantalla, sin que medie reflexión o refracción alguna. Concluye entonces, en la Propositio I de su obra titulada *Physicomathesis de lumine, coloribus et iride*, publicada en 1665 en Bologna dos años después de su muerte, que la luz “*se propaga no sólo de manera directa, por refracción o por reflexión, sino que existe un cuarto modo, por difracción*”.

Grimaldi se abstuvo de defender cualquier hipótesis sobre la naturaleza de la luz. Sin embargo, elabora conjeturas en la búsqueda de explicaciones a sus resultados experimentales, por ejemplo: “*radiación secundaria que se genera una y otra vez durante la propagación, dando lugar a las franjas observadas*” para explicar las franjas coloreadas, “*obtener oscuridad sumando luz*” cuando realiza un segundo orificio muy cerca del primero y observa los cambios que se producen en la pared opuesta y refiriéndose a la propagación de la luz a modo de conclusión en su Propositio I: “*a veces, incluso ondula*” (Sepúlveda, 2012). Ciertamente, estas conjeturas tendrían luego gran influencia en las ideas de Huygens.

Desde el punto de vista experimental se debe destacar la importancia de sus cuidadosas observaciones. En efecto, la difracción de la luz por orificios u obstáculos no es tan fácil de poner en evidencia por medio de la experimentación utilizando fuentes comunes o luz natural. Hoy sabemos que si se quiere observar con la luz los mismos efectos de difracción que las olas de mar cuando rodean obstáculos o pasan por aberturas, se necesita que las dimensiones del obstáculo o abertura sean comparables a la longitud de onda y que el sistema experimental formado por la fuente de luz, orificios u obstáculos y pantalla tenga un cierto grado de coherencia espacial y temporal. Para ello son determinantes las dimensiones de la fuente y la distancia entre elementos del sistema experimental, así como la monocromaticidad de la fuente. Por ejemplo, cuanto más pequeño es el orificio por el cual entra la luz y más alejado se encuentra del obstáculo, el sistema experimental se acerca más a esas condiciones de coherencia (Hecht, 2000). Pero también, cuanto más pequeño es el orificio por el cual entra la luz, menor es la intensidad de la luz que llegará al segundo orificio o al obstáculo y menor es el contraste entre la zona iluminada y la zona oscura en la pantalla.

La meticulosidad de las observaciones de Grimaldi se ponen de manifiesto en la notable coincidencia entre el diagrama elaborado en su obra *Physicomathesis de lumine* para describir las zonas oscuras e iluminadas que observó en sus experimentos y una fotografía actual de la difracción por el borde de una pantalla (figura N° 3).

Conociendo hoy con fundamento teórico las dificultades experimentales que surgen para llevar a cabo la experiencia de Grimaldi con fuentes comunes o con luz natural, cabe preguntarnos: ¿Qué lo llevó a realizar este cuidadoso experimento de la difracción? ¿Tenía algún motivo o suposición para tratar de observar con tanto detalle la sombra de un obstáculo? ¿Por qué utilizó la luz proveniente de un “pequeño orificio” para sus experiencias?

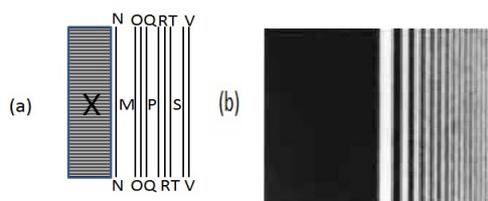


Figura N° 3: (a) reproducción de un diagrama realizado por Grimaldi y (b) fotografía de un patrón de difracción en un borde

Aparentemente Christiaan Huygens (1629-1695) estaba al tanto de los fenómenos observados por Grimaldi, dado que se habían replicado por otros científicos en su presencia, pero no se convenció de que se trataba de un nuevo fenómeno óptico y en consecuencia no intentó elaborar una explicación al respecto (Shapiro, 1973, citado por Krapas et al., 2001). Huygens avanzó con el desarrollo de la teoría de Descartes en la segunda mitad del siglo XVII. Manifestó su desacuerdo con la emisión corpuscular argumentando que el transporte de materia no podía explicar la extrema velocidad de la luz ni el hecho experimental de que los rayos luminosos se atraviesan unos con otros sin obstaculizarse (Welti, 2013; Krapas et al., 2011). Presentó un modelo para la transmisión de la luz en forma de ondas longitudinales, por choques elásticos de los corpúsculos que constituyen el éter, semejante a cómo se propaga el sonido en el aire a través de ondas esféricas. Si en el caso del sonido el medio de sustentación es el aire, la luz, en cambio, recorre una materia etérea. Su afirmación tenía como evidencia las experiencias de Boyle y de Torricelli sobre la propagación de la luz aún en espacios vacíos.

En la década del sesenta pasó mucho tiempo en París trabajando bajo el auspicio de la Real Academia de las Ciencias de Francia, aunque en ese período ya formaba parte de la Royal Society de Londres. Concluyó sus trabajos sobre óptica en el año 1678 pero fueron publicados recién en 1690 con el nombre de *Traité de la Lumière*. Esta obra contenía la exposición de su teoría ondulatoria basada en pulsos no periódicos, además de un estudio sobre la birrefringencia de la luz en los cristales de calcita y un ensayo acerca de la causa de la gravedad (Gribbin, 2003).

Si bien presentó sus hipótesis por medio de una analogía con el sonido, fue capaz de distinguir diferencias entre la luz y el sonido en cuanto a los movimientos que la producen, la materia en la cual se propagan y la forma en que se comunican estos movimientos. En el caso del sonido, se produce por una “*sacudida repentina de un cuerpo entero o una gran parte de él*”, en cambio, en el caso de la luz “*nace de cada punto del objeto luminoso*” (Krapas et. al., 2011). Además, la agitación de las partículas que generan la luz debe ser mucho más rápida y brusca que la que genera el sonido. Usó un diagrama de círculos concéntricos que salen de varios puntos de la fuente para representar su modelo sobre la propagación de la luz (figura N° 4), pero con un significado distinto al que tiene un diagrama de ese tipo en los libros didácticos actuales.



Figura N° 4: Diagrama elaborado para representar los pulsos (Huygens, 1690)

Además, aunque emplea la palabra “*ondas*” en su presentación, aclara que lo hace por el parecido a las *ondas* producidas en la superficie del agua, que se propagan en círculos cuando es perturbada. Para Huygens, los círculos representan “*el progreso de una misma onda en tiempos*”

iguales” y menciona en forma explícita que no necesariamente están separados por distancias iguales ya que “*las vibraciones de los centros que los producen no tienen una secuencia regular*” (Krapas et al., 2011). Lo que indica entonces que estaba pensando en pulsos independientes.

En este punto cabe realizar algunas reflexiones que pueden ser de interés para el objetivo que nos ocupa. Hoy en día, un diagrama como el de la figura N° 4 aparece en la mayoría de los libros didácticos con una interpretación distinta a la de Huygens: representan sucesivos frentes de onda de una onda periódica en un instante determinado, con una distancia entre ellos igual a la longitud de onda, como si fuera una instantánea de la propagación. Además, los diagramas actuales han simplificado el esquema y generalmente no aparece la fuente que está emitiendo, con lo cual no queda explícito que se trata de una fuente extensa donde cada punto es un emisor independiente. En el ámbito del laboratorio de física, cuando realizamos experiencias de difracción con fuentes convencionales, es necesario considerar las características de la fuente, tales como su extensión y su mecanismo de emisión, para analizar la posibilidad de obtener un patrón estable de difracción y/o interferencia en la pantalla.

En cuanto a la forma de propagación, a pesar de que presenta sus ideas a partir de una analogía con el sonido, Huygens estaba convencido de que el modelo de propagación del sonido a través de compresiones y expansiones del aire no lograría explicar la extrema velocidad de la luz. La misma había sido medida por Roemer en 1676 y el resultado arrojó un valor cien mil veces mayor que la velocidad del sonido. Concibe la propagación luminosa como una transmisión de movimiento a través de esferas rígidas de igual tamaño situadas en una línea recta y en contacto entre sí. Este dispositivo se conoce hoy como péndulo de Newton: golpeando la primera esfera se observa que la última se separa de la fila sin que se las demás se muevan. Con este modelo de propagación luminosa a través del éter explica una serie de propiedades de la luz como la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción, imponiendo convenientemente al éter las propiedades necesarias para que ello suceda. El éter de Huygens estaba entonces compuesto por esferas minúsculas en contacto entre sí y supone que las partículas del éter “[...] *están dotadas de una dureza casi perfecta y de una elasticidad tan grande como nos plazca*” para explicar la magnitud de la velocidad de la luz (Welti, 2013).

Para tratar de explicar con este modelo ondulatorio diversos fenómenos ópticos tales como la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción, Huygens asocia a su modelo de propagación una construcción geométrica que se conoce hoy como Principio de Huygens. La figura N° 5 muestra la construcción original de Huygens.

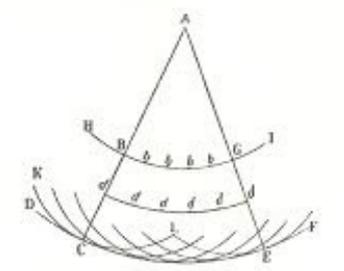


Fig. N° 5: Diagrama de una onda que emerge de un punto luminoso A (Huygens, 1690)

Huygens considera una onda DCF que parte de un único punto de un cuerpo luminoso (A) que se encuentra en el interior de un cuerpo opaco BAG con abertura BG. Se puede interpretar la llegada de la onda DCF como equivalente a la composición de múltiples “*ondas particulares*” originadas en partículas situadas dentro de la esfera DCF y que llegan juntas a los puntos del espacio donde debería estar DCF, sumando sus contribuciones. Por ejemplo, la partícula B produce la onda KCL, que contribuye en el punto C a componer la onda DCF.

Actualmente, los distintos enunciados de los libros didácticos expresan esta idea de Huygens con otros términos, como *onda primaria* y *onda secundaria*, y con conceptos que se desarrollaron con posterioridad, tales como *rapidez*, *frecuencia*, *envolvente*, etc. Por ejemplo: “*cada punto en un frente de onda primario sirve como fuente de onditas esféricas secundarias tales que el frente de onda primario un momento más tarde es la envolvente de estas onditas. Además, las onditas avanzan con una rapidez y frecuencia igual a la onda primaria en cada punto del espacio*” (Hecht, 2000). Aunque con un modelo de propagación esencialmente distinto, ondas electromagnéticas que se propagan en el vacío y en distintos medios, esta idea es muy útil hoy como técnica para tratar la teoría de la difracción. Con el aporte posterior de Fresnel, se puede usar la representación matemática de las onditas para evidenciar el progreso de una onda primaria pasando por todo tipo de aberturas y obstáculos, al sumar matemáticamente todas las contribuciones de las onditas.

En su afán de explicar la propagación rectilínea de la luz, lo cual era una evidencia experimental fuera de toda duda en esa época, añadió que estas ondas secundarias solo eran efectivas en los puntos de contacto con su envolvente: “*las partes de las ondas particulares que se propagan fuera del espacio BAG son demasiado débiles para producir luz*” (fig. N° 5). Estas consideraciones no le permitieron reconocer que siendo una onda, la luz debería comportarse como el sonido “dando vuelta a un obstáculo”, aunque en ese tiempo ya existía evidencia experimental de tal comportamiento. El italiano Francesco Grimaldi y el escocés Gregory fueron los primeros en observar el fenómeno de la difracción en sus experiencias en esa época. Huygens tampoco pudo lograr una explicación para los colores al no considerar que sus ondas de luz eran periódicas, hecho que admite explícitamente en el prefacio de su Tratado de la Luz (Welti, 2011).

En la década de 1660 el escocés James Gregory (1638-1675) también realizaba experimentos sobre óptica, tales como la descomposición de la luz en sus colores individuales. Usaba técnicas experimentales similares a las de Grimaldi y Newton, a saber, una habitación oscurecida y un pequeño orificio por donde entraba un fino haz de luz. En una de estas experiencias, consiguió difractar la luz utilizando una pluma, observando un círculo blanco central y otros de diversos colores en la pared blanca que utilizaba de pantalla. Este sencillo dispositivo experimental se considera hoy la primera *rejilla de difracción*. Gregory no sabía cómo explicar esos resultados y se los comunicó a Newton, de quien era admirador y con quien mantenía correspondencia, pero Newton estaba convencido de su hipótesis corpuscular y trató de explicarlos agregando algunas consideraciones sobre el tamaño de las partículas del éter a su teoría. Además, había obtenido poco antes la descomposición de la luz por un prisma y tal vez, abocado en el estudio de sus resultados, no concibió el hallazgo de Gregory como un fenómeno distinto. El respeto por Newton no le permitió a Gregory avanzar con estas investigaciones.

En la misma época, Robert Hooke (1635-1703), en Londres, describía la luz como una onda y hablaba de pulsos que se propagan por el espacio de un modo similar a las ondas creadas por una piedra sobre la superficie de un estanque. Concebía la luz como un movimiento vibratorio rápido del medio, que se propagaba a gran velocidad. Sostuvo además, que “cada pulso o vibración del cuerpo luminoso generaba una esfera”, esbozando así una teoría ondulatoria de la luz en la misma línea de Huygens y en contra de la teoría corpuscular de Newton (Hecht, 2000; Moledo, 2003). Todas estas observaciones están plasmadas en su obra más importante, *Micrographia*, publicada en 1665, el mismo año en que se publicó la obra de Grimaldi. Como indica su título, la obra se trataba en gran medida sobre sus importantes contribuciones a la microscopía, pero contenía además sus numerosas investigaciones sobre fenómenos luminosos.

En particular, se refirió al fenómeno de difracción por un obstáculo, al describir uno de sus resultados experimentales de la siguiente manera: “*la luz del Sol se reflejaba en lo profundo de la sombra de una navaja*” (Pesic, 2007). Fue el primero en estudiar las zonas coloreadas que se producían en finas capas de materiales como las alas de un insecto, pompas de jabón o películas aceitosas en agua, atribuyendo los mismos, en forma correcta, a algún tipo de interferencia entre la

luz reflejada de las superficies frontal y posterior. También observó que cuando se comprimía una lente curva contra un vidrio plano aparecía una configuración de círculos concéntricos que hoy se conoce como anillos de Newton. La configuración de anillos se ensanchaba y se contraía usando luces monocromáticas de distintos colores y cada anillo presentaba un espectro semejante a un arco iris, azul en el interior y rojo en el exterior, si se usaba luz blanca (Pesic, 2007).

Isaac Newton (1642-1727) comenzó sus experimentos ópticos en 1666, tal vez motivado por la lectura de la obra de Hooke, *Micrographia*, presentando en 1672 una extensa ponencia sobre la luz y los colores a la Royal Society. Algunos historiadores sostienen que su rechazo a las explicaciones de Hooke sobre los colores le sirvió de estímulo para desarrollar una teoría alternativa (Wetsfall, 2006). A diferencia de Hooke, prefirió la hipótesis corpuscular de Gassendi para explicar sus resultados y postuló que la luz es un flujo de pequeñísimas partículas o corpúsculos emitidos por las fuentes luminosas, que se movían en línea recta con gran rapidez. El tamaño de estos corpúsculos de luz estaría asociado con el color. Así, las partículas más pequeñas producirían sensación de azul y violeta y las más grandes serían responsables del verde, amarillo, naranja y rojo (Zajonc, 2003).

El argumento principal para adherir a una teoría corpuscular tal vez tenga su origen en la evidencia experimental recogida a lo largo de sus numerosos experimentos, de que la luz produce sombras bien definidas y en consecuencia no podía ser una onda. Aunque estaba en conocimiento de los resultados de Gregory y reprodujo cuidadosamente las experiencias de Grimaldi y de Hooke referidos a la difracción de la luz por obstáculos, Newton no abandonó su hipótesis corpuscular. Al contrario, consideró estos fenómenos como otra forma de refracción y modificó sus ideas para explicar fenómenos de este tipo y otros tales como los colores que se observan en las pompas de jabón o en películas aceitosas sobre una capa de agua (Pesic, 2007). El razonamiento que usó Newton para explicar la difracción por una pequeña abertura considera que en las cercanías de la misma el éter cambia de densidad, y puesto que la velocidad de la luz depende de la densidad del éter, los corpúsculos luminosos se refractan. Esta propuesta reduce así la difracción a refracción (Arons, 1970).

Después de la primera presentación sobre la luz y los colores en 1672, Newton fue dando a conocer en diversos trabajos los resultados de sus experiencias y sus hipótesis a la Royal Society, realizando también algunas demostraciones. Hooke siempre estuvo al tanto de estas investigaciones y replicó los experimentos de Newton referidos al uso de prismas para explicar los colores. Ambos mantuvieron una serie de discusiones que se iniciaron luego de la primera presentación de Newton en 1672 y que se prolongó hasta 1678. Durante ese tiempo, Hooke avanzó con el desarrollo de su propia teoría de la vibración de la luz y el color, citando nuevos experimentos sobre la difracción para demostrar que *“se pueden conseguir colores sin que medie refracción alguna”* (Scheffer, 2011).

Las numerosas investigaciones de Newton sobre la óptica y la luz culminaron con la publicación de su libro, *Opticks*, en 1704. Como él mismo expresó: “[...] *mi intención en este libro no es explicar las propiedades de la luz mediante hipótesis, sino que quiero proponerlas y probarlas mediante la razón y experimentos*”. En efecto, al igual que Grimaldi y otros, Newton también montó un laboratorio de óptica de características similares. Hizo entrar luz a una habitación oscura a través de un pequeño orificio en la ventana para estudiar la descomposición de la luz por un prisma y realizar numerosas observaciones sobre el color.

Las ideas de Newton habían ido madurando paso a paso en su pensamiento hasta alcanzar su forma definitiva, recibiendo en muchas ocasiones aportes de Hooke en sus conversaciones epistolares, los que no fueron debidamente reconocidos en sus publicaciones posteriores y dieron origen a una feroz confrontación entre ambos (Gribbin, 2003). Hecht (2000) señala que se observa a lo largo de los trabajos de Newton una ambivalencia, una propensión a abarcar simultáneamente ambas teorías, aunque se inclinó en su vejez cada vez más hacia la teoría corpuscular. Aunque trabajó en óptica, termodinámica y acústica, Newton debe su lugar en la historia de la ciencia principalmente

a su refundación de la mecánica. Su obra más importante, Principios matemáticos de la filosofía natural (1687), formula rigurosamente las tres leyes fundamentales del movimiento.

En resumen, a fines del siglo XVII había tres hipótesis sobre la luz: se trataría de un flujo de partículas proyectadas por el cuerpo luminoso (Newton), ondas longitudinales que se propagaban a través de un éter sutil que llenaba el espacio (Huygens) u ondas transversales a través de este éter (Hooke). Las tres hipótesis describían el fenómeno en términos de materia y movimiento, de acuerdo al espíritu mecanicista del siglo, y cada una tenía sus ventajas y sus inconvenientes. Sin embargo, compartían una importante característica, en cuanto todas las hipótesis recurrían a una analogía con fenómenos mejor comprendidos. Así, la luz era algo parecido a otra cosa: una clase de materia, o las ondas en la superficie de un estanque, o el sonido (Hull, 2011).

Hasta el final del siglo XVII no hubo nuevos avances en las teorías sobre la naturaleza de la luz. Se puede interpretar que la influencia de Newton frenó el progreso en este aspecto, dado que a fines del siglo XVIII ya había suficiente evidencia experimental favorable al modelo ondulatorio que no se consideró con suficiente entusiasmo. Se pueden mencionar, por ejemplo, los resultados experimentales de Grimaldi y de Hooke (Gribbin, 2003). De esta manera, el natural respeto por Newton en esta época tendió a hacer olvidar los méritos de la teoría ondulatoria, que volvió a resurgir en el siglo XIX gracias a la obra de Thomas Young (1773-1829) y Agustín Fresnel (1788-1827).

La figura N° 6 muestra en una línea de tiempo las contribuciones más importantes sobre la naturaleza de la luz que se sucedieron luego de la influencia de Newton, continuando con la descripción de la figura N° 1.

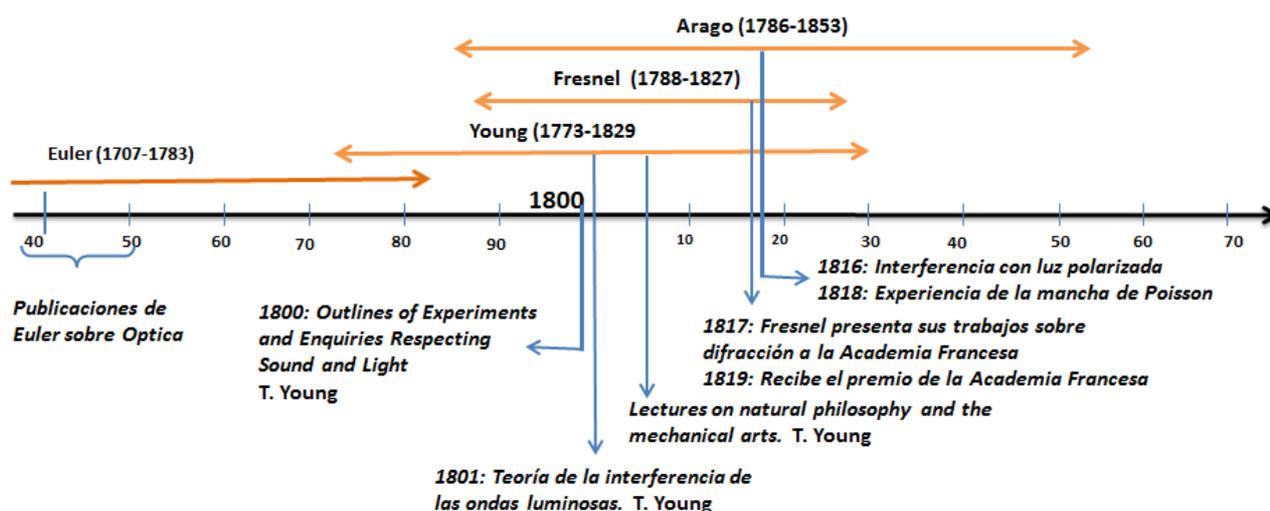


Figura N° 6: Principales contribuciones en los siglos XVIII y XIX

Solamente Leonhar Euler (1707-1783), matemático y físico suizo, realizó contribuciones sobre la naturaleza de la luz en el siglo XVIII. Los argumentos de Euler tenían solidez, ya que examinó minuciosamente todas las dificultades del modelo corpuscular, incluso la dificultad de explicar de esta manera la difracción, y también detalló las pruebas que apoyaban el modelo ondulatorio. Al igual que algunos antecesores, planteó concretamente una analogía entre las ondas luminosas y las ondas sonoras, expresando que la luz solar es con respecto al éter lo que el sonido es con respecto al aire (Gribbin, 2003). En una carta de 1760 sostiene que la causa de la visibilidad de los objetos es un movimiento vibratorio extremadamente rápido, mediante el cual se agitan las partículas minúsculas de sus superficies y que la frecuencia de esas vibraciones determina el color (Pesic, 2007). Llegó a realizar estimaciones explícitas de las propiedades físicas del éter, comparando las velocidades de propagación del sonido y de la luz. Argumentó que la densidad del éter debía ser por lo menos cien millones de veces menor que la del aire, y su elasticidad mil veces mayor.

Décadas más tarde, Thomas Young, en su condición de médico, estudió la fisiología del ojo y del oído. El estudio conjunto de la visión y del oído, y la profunda influencia de Euler, lo llevaron a pensar que la teoría ondulatoria podía abarcar ambos sentidos, adhiriendo así a una teoría vibratoria de la luz en un éter universal (Hecht, 2000). Pero además, postuló en 1801 un principio que permitiría comprender los fenómenos de la difracción. Según Young, así como las olas de agua pueden crecer o cancelarse entre sí cuando se intersectan, las ondulaciones del éter se pueden fortalecer o debilitar hasta extinguirse mediante una interferencia del mismo tipo (Zajonc, 2003). Anadió entonces a la teoría ondulatoria un nuevo concepto fundamental llamado principio de interferencia.

El concepto de interferencia luminosa surgió entonces como una hipótesis que trataba de explicar el fenómeno denominado difracción. Young repitió las observaciones de Grimaldi, buscando la prueba de que la luz interfiere consigo misma. En su investigación iluminó ambos bordes de un trozo delgado de cartulina observado en la pared una configuración de franjas claras y oscuras que llamó interferencia. Sostenía la tesis de que estas franjas se debían al *“efecto conjunto de las porciones de luz que pasan a cada lado de la papeleta y se desvían, o mejor dicho, se difractan en la sombra”*. Para probar su tesis, impidió con una pequeña pantalla que llegue luz a uno de los bordes del obstáculo, de tal forma que quedó solo un extremo iluminado. Como resultado de su experimento, todas las franjas desaparecieron, probando así que hacían falta los dos márgenes y que la luz debía iluminar a ambos al mismo tiempo (Pesic, 2007).

Estos detalles acerca de sus trabajos experimentales son sumamente interesantes, dado que no se explicita suficientemente en los textos actuales de enseñanza universitaria la necesidad de iluminar ambos bordes del obstáculo o de la rendija para obtener la característica configuración de zonas claras y oscuras del patrón de difracción de una rendija. Además, en ocasiones se reproducen fotografías parciales, donde se muestra un detalle del patrón de difracción sólo en una porción del obstáculo, sin la debida contextualización dentro del sistema físico real con el cual se realiza el experimento que lleva a ese resultado.

Young presentó primero la forma en que se podían explicar mediante la interferencia de la luz, fenómenos que ya habían sido observados por Newton y por Hooke, tal como los anillos concéntricos que se observan cuando se coloca una lente plano-convexa sobre una superficie plana de vidrio. Utilizando los datos experimentales de Newton y aplicando su teoría de la interferencia, calculó la longitud de onda de la luz roja, obteniendo $6,5 \cdot 10^{-7}$ m, y de la luz violeta, resultando $4,4 \cdot 10^{-7}$ m, valores que concuerdan con las mediciones actuales (Gribbin, 2003). Luego puso en práctica el experimento de la doble rendija (fig. N° 7). En este arreglo experimental la luz pasa a través de una “estrecha” rendija, de dimensiones similares a la longitud de onda de la luz. La luz que sale de la rendija se difracta, es decir, se esparce, e incide en un segundo trozo de cartulina en el que hay dos rendijas similares paralelas. Cuando la luz sale de estas dos rendijas también se esparce, interfiere entre sí e incide sobre una pantalla donde se observa una imagen formada por zonas de luz y sombras, conocida hoy como patrón de interferencia.

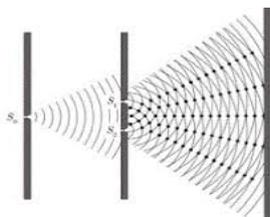


Figura N° 7: Experiencia de la doble ranura de Young (de libre disponibilidad en la web)

Su hermoso y sencillo experimento arrojó tres resultados importantes a la vez: a) puso en evidencia la difracción de la luz, b) produjo el fenómeno llamado interferencia, que era previsto por la teoría ondulatoria y no por la teoría corpuscular y c) posibilitó además a Young medir la longitud y la frecuencia de las ondas (Hull, 2011).

Se debe destacar aquí que, al igual que sus antecesores, las condiciones experimentales en que realizaba sus observaciones eran sumamente cuidadosas. El “laboratorio” que permitía observar estos fenómenos consistía en una habitación totalmente oscurecida y luz natural que penetra primero por una pequeña ranura y luego por otras dos, de manera tal que se pueda observar el patrón de interferencia en la pantalla con el contraste suficiente. Sin embargo, los trabajos de Young sobre la luz no fueron reconocidos por los demás físicos de Gran Bretaña, a los cuales les desagradaba profundamente la pretensión de desautorizar la obra de Newton. Les parecía irrisorio, además, la idea de que la superposición de dos haces de luz produzca oscuridad.

Casi al mismo tiempo estaban surgiendo nuevas pruebas a favor del modelo ondulatorio. Sin conocer los trabajos de Thomas Young, el francés Agustín Fresnel realizó ingeniosos experimentos sobre la difracción y desarrolló las bases matemáticas de una teoría ondulatoria de la luz que pudiera explicar sus observaciones (Zajonc, p. 114). Siendo ingeniero civil, desarrolló gran interés por la óptica y resulta sorprendente que desarrollara su propio modelo ondulatorio de la luz, una síntesis de los conceptos de la teoría ondulatoria de Huygens y el principio de interferencia, sin conocer los trabajos de Young ni tampoco la obra de Huygens y Euler, dado que vivía fuera de los círculos de los científicos académicos de París (Gribbin, 2003).

Fresnel concebía el modo de propagación de una onda primaria como “una sucesión de onditas secundarias esféricas estimuladas, que en su avance se superponen e interfieren para reformar la onda primaria en su avance, tal como aparecería un instante más tarde” (Hecht, 2000). Extendió el principio de interferencia de Young a un número arbitrario de ondas para calcular la superposición en un punto cualquiera del espacio. Gracias al énfasis matemático que logró su teoría, pudo calcular los patrones de difracción generados en obstáculos y aberturas y también pudo explicar satisfactoriamente la propagación rectilínea en medios isotrópicos homogéneos. Como este aspecto era la objeción principal de Newton para aceptar una teoría ondulatoria, este último logro de Fresnel fue el primer paso para derribar la supremacía de Newton. La figura N° 8 muestra el diagrama elaborado por Fresnel para explicar por medio de su teoría, la difracción por un obstáculo.

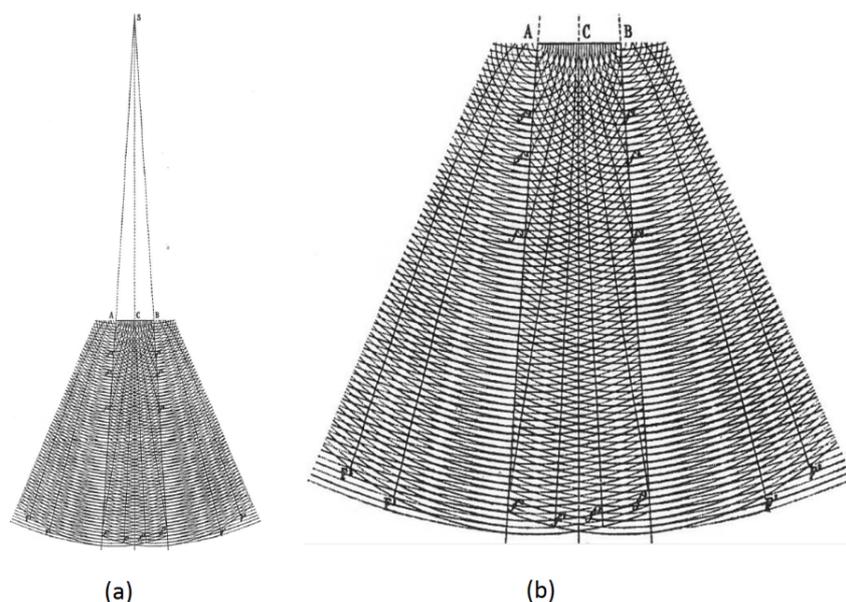


Fig. N° 8: (a) Diagrama elaborado por Fresnel para explicar la difracción por un obstáculo, de la luz que proviene de una fuente puntual S (Pesic, 2007)
 (b) Detalle de la interferencia de los frentes de onda en el diagrama de Fresnel

En 1817 la Academia Francesa ofreció un premio para quien aportara el mejor trabajo experimental sobre el fenómeno de la difracción y lo fundamentara con un modelo teórico que

explicara los resultados. Evidentemente, el trabajo de Young (del cual ya tenían conocimiento) no se había valorado lo suficiente. En el marco de esta convocatoria, Fresnel presenta un informe de su trabajo a la Academia. Los jueces del concurso, Simeón Poisson, Jean Biot y Pierre Laplace, eran todos newtonianos y en consecuencia, trataron de todas formas de buscar fallas en la teoría. Poisson estudió concienzudamente los desarrollos matemáticos de Fresnel, realizó cuidadosos cálculos y creyó encontrar una objeción: la teoría de Fresnel implicaba que debería haber una pequeña mancha de luz en el centro de la sombra proyectada por una pantalla opaca. Esta idea les pareció absurda, por lo que decidieron recurrir al fallo de la experiencia.

El experimentalista Arago, amigo y simpatizante de Fresnel, realizó el experimento y encontró que el punto luminoso que se había pronosticado apareció exactamente donde Poisson había dicho que debería estar. Los resultados del experimento fueron comunicados al Consejo de la Academia de Ciencias en marzo de 1819, con lo cual se otorgó el premio a Fresnel (Gribbin, 2003). A partir de este momento quedó demostrado que Newton estaba en un error y ya no hubo dudas de que la luz tenía naturaleza ondulatoria. La figura N° 9 muestra los resultados de esta experiencia, a partir de la cual el punto blanco que aparece en el centro se llamó punto o mancha de Poisson.

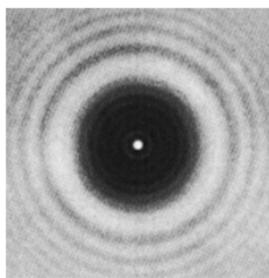


Figura N° 9: Resultado de la experiencia de Arago (libre disponibilidad en la web)

Young y Fresnel trabajaron luego en colaboración para explicar otros resultados experimentales, tales como los referentes a la polarización de la luz (Hecht, 2000). Ya en 1816, Arago y Fresnel habían encontrado que dos haces de luz polarizados perpendicularmente entre sí no mostraban interferencias. Young explicó este resultado suponiendo que las vibraciones de las ondas luminosas no se realizaban en la dirección de propagación, como es el caso del sonido en el aire, sino perpendicularmente a ella. Fresnel acogió la hipótesis de Young del carácter transversal de las oscilaciones luminosas y analizó matemáticamente las supuestas propiedades dinámicas del éter.

Desde este supuesto, hasta 1822, la teoría ondulatoria desarrollada por Fresnel podía dar cuenta de los diferentes fenómenos de la óptica: reflexión, refracción, birrefringencia, interferencia y difracción. La teoría corpuscular ya no tenía muchos adeptos y terminó de caer cuando Foucault logró comprobar experimentalmente en 1858 que la velocidad de la luz en el agua era menor que en el aire, contrariamente a los que predecía la teoría corpuscular (Solís y Sellés, 2005).

Paralelamente al desarrollo de la óptica, en el siglo XIX también hubo grandes avances en el estudio de la electricidad y magnetismo. Maxwell estableció en forma teórica, mediante un simple conjunto de ecuaciones matemáticas, que el medio electromagnético se podía propagar como una onda transversal en el éter. El aspecto más destacado del trabajo de Maxwell fue la identificación de la luz como un fenómeno electromagnético y la unificación de los éteres óptico y electromagnético, que hasta entonces se habían considerado separadamente.

De acuerdo al análisis de Fresnel, el éter debía tener una gran rigidez y comportarse como un sólido elástico y a la vez tenía que dejar pasar los cuerpos a través de él. Estas propiedades mecánicas algo extrañas se precisaron aún más con el planteo de Maxwell: debía ser muy tenue para permitir el movimiento de los cuerpos celestes y debía soportar oscilaciones de alta frecuencia. Así, en las décadas siguientes se dedicó gran esfuerzo a determinar la naturaleza física del éter (Hecht, 2000).

A fines del siglo XIX las experiencias de Michelson y luego la de Michelson y Morley, mostraban que la velocidad de la luz no era afectada por el movimiento del planeta y en consecuencia el éter no era estacionario. Más tarde, Poincaré puso en duda la existencia del éter y en 1905 Einstein, con su teoría de la relatividad, rechazó la hipótesis del éter. A partir de allí, la luz se consideró una onda electromagnética que implica fluctuaciones periódicas de campos eléctricos y magnéticos. Un poco más tarde, durante el siglo XX comenzó la formulación de la física cuántica, que llevó a reconocer que aunque la luz es una onda también se puede comportar como un corpúsculo portador de energía y momento.

La epistemología genética y las dificultades que manifiestan los alumnos.

Después de analizar el papel que tuvo la experiencia de la difracción de la luz en la formulación de las distintas teorías sobre la naturaleza de la misma, resulta comprensible que aún hoy los alumnos evidencien serias dificultades para el cambio de paradigma entre la óptica geométrica y la óptica ondulatoria cuando tienen que abordar situaciones experimentales que involucran los fenómenos de difracción e interferencia. Desde las cuidadosas y detalladas experiencias de Grimaldi y de Hooke, siguiendo por los intentos de Huygens y Newton de explicar el fenómeno sin abandonar la verdad experimental de que la luz se propaga en forma rectilínea, hasta llegar a las hipótesis de Young y Fresnel de la propagación ondulatoria, se observa que el escollo más duro para un cambio de paradigma parecía estar centrado en la necesidad de encontrar hipótesis y explicaciones que no contradigan la propagación rectilínea de la luz.

¿Qué paralelismo encontramos entre el desarrollo de las teorías sobre la naturaleza de la luz y la construcción de los conceptos durante el aprendizaje de la óptica ondulatoria? Al igual que sucede en la historia de construcción de los modelos en la óptica, en su desempeño los alumnos se aferran a la propagación rectilínea de la luz en sus predicciones, interpretaciones y explicaciones. Los resultados de la investigación educativa (Maurines, 2010; Colin y Viennot, 2001; Wosilait et.al, 1999; Bravo y Pesa, 2012) muestran que la mayoría de los alumnos abordan las situaciones experimentales desde la óptica geométrica, o construyen modelos híbridos entre la óptica geométrica y la óptica ondulatoria donde el núcleo del razonamiento sigue siendo la propagación rectilínea de la luz. A modo de ejemplo, podemos mencionar las predicciones realizadas por los alumnos acerca de lo que se observará en la pantalla si se ilumina una rendija de 0,1 mm aproximadamente, primero con luz láser y luego con una fuente común de filamento (Bravo y Pesa, 2012). Un alumno refiere: “*Con luz láser se observa un punto en la pantalla y con luz natural se observa una franja*”. Sus diagramas explicativos muestran un haz láser muy fino que cubre el ancho de la rendija pero no alcanza a cubrir el largo de la misma y un haz de luz que diverge de la lámpara común y que llega a toda la rendija. Otro alumno refiere: “*con el láser se verá el haz con una menor dispersión, ya que tiene menor espacio por el cual puede pasar la luz. Con el foco se puede ver el filamento en la pantalla*”. Aunque no realiza diagramas, se puede inferir que está clasificando a las fuentes según su forma de emisión (haz direccionado en el láser y emisión en todas direcciones para el foco común) e identificando la rendija pequeña con el orificio de una cámara oscura.

Sin embargo, debemos reconocer una diferencia entre la génesis del conocimiento en la historia de la ciencia y la génesis del conocimiento en la estructura cognitiva del alumno. En la actualidad, en la mayoría de los currículos de ciencia la enseñanza de la óptica comienza con la definición de luz como una onda electromagnética y desde este modelo se interpretan luego los fenómenos ópticos. Es decir, el punto de partida en la transposición didáctica está en el modelo que tardó tanto tiempo en imponerse. ¿Por qué entonces los alumnos parecen tener las mismas dificultades que en la historia de la ciencia para delimitar el alcance de la propagación rectilínea de la luz? ¿Cuáles son las razones de la preeminencia de las ideas acerca de la propagación rectilínea de la luz? Consideramos que su arraigo es grande porque son el producto de construcciones personales

elaboradas a lo largo de la vida. Son el resultado de la actividad cognoscitiva del sujeto, que se ha ido construyendo progresivamente con las propias observaciones y experiencias cotidianas, tales como la formación de sombras y penumbras, la formación de imágenes en espejos, etc. Pero cabe también considerar la influencia de la instrucción formal y de los libros didácticos en esta construcción progresiva de los conceptos por alumnos de nivel universitario. La consideración de estos aspectos nos permitiría entender e interpretar con más elementos y mayor fundamento el arraigo de sus ideas y las dificultades que se manifiestan en el aprendizaje.

A continuación, vamos a realizar una caracterización de la construcción progresiva de los conceptos de difracción e interferencia en diversos textos utilizados en la educación formal en el ciclo básico universitario, con el objetivo de interpretar con mayor profundidad y fundamento qué conoce el alumno sobre los modelos de la óptica y cómo ha llegado a conocerlos, tanto desde su experiencia cotidiana como de la enseñanza formal, cuando aborda los fenómenos de difracción. La génesis de este conocimiento previo de los alumnos podría ayudarnos a interpretar las dificultades inherentes al cambio de paradigma y se constituye, a la vez, en un punto de partida para el diseño de propuestas didácticas tendientes a un aprendizaje significativo de la temática.

El tratamiento didáctico de los fenómenos de interferencia y difracción en textos de nivel universitario

Se plantea en esta instancia un análisis de contenido de los principales libros de texto de física básica utilizados en el nivel universitario. Con el término libro de texto se designa aquellos libros que utilizan habitualmente profesores y alumnos a lo largo de un curso. El análisis de contenido es una técnica de investigación para formular inferencias identificando de manera sistemática y objetiva ciertas características específicas dentro de un texto. Se constituye en un instrumento de respuesta para descubrir la estructura interna de la información, en su composición, en su forma de organización o estructura, o en su dinámica.

En este trabajo se realizará un análisis de contenido de tipo cualitativo, que permite verificar la presencia de temas o de conceptos en un contenido. El objeto o tema de análisis consiste en el desarrollo conceptual de la óptica en los principales libros de texto de nivel universitario básico, los que se constituyen así en las unidades de análisis. La constitución de las unidades de análisis implica a menudo selecciones y reglas como las de exhaustividad, representatividad, homogeneidad y pertinencia (Porta y Silva, 2013). Tratando de respetar estos criterios se ha realizado una revisión sobre la disponibilidad de libros de Física en la biblioteca de la institución y en librerías locales de venta y se ha revisado la bibliografía que indican los programas de la asignatura Física III para ingenierías y Física IV para Licenciatura en Física. De esta primera selección, se han escogido cuatro textos que han sido identificados como los más consultados por los estudiantes de carreras de ingeniería y de licenciatura en física. A estos cuatro textos se agregan otros tres, seleccionados con el mismo criterio, que desarrollan con un mayor grado de profundidad las temáticas consideradas y son utilizados por estudiantes de la carrera licenciatura en física. Los textos que se han seleccionado para el análisis son los siguientes:

- Young, H. y Freedman, R. *Física Universitaria*. Vol 2. Editorial Pearson. 2013.
- Serway R. y Jewett J. *Física. Volumen II*. Ed. Thomson. 2005.
- Halliday, D., Resnick, R., Krane, K. *Física, Vol. 2*. Editorial CECSA. México. 1998.
- Tipler, P. *Física*. Edit. Reverté S. A. España. 1996.
- Hecht, E. y Zajac, A. *Óptica*. Edit. Addison-Wesley Iberoamericana S.A. 2000.
- Alonso, M. y Finn, E. *Física. Volumen II: Campos y Ondas*. Fondo Educ. Interam. Mexico. 1976.

- Landsberg, G. S. *Óptica. Primer Tomo*. Traducción al español. Editorial Mir. 1983.

De acuerdo a nuestro interés por caracterizar la influencia de la instrucción formal y de los libros didácticos en la construcción progresiva de los conceptos de difracción e interferencia por parte de los alumnos, para el análisis cualitativo del desarrollo del tema en los textos escogidos se han definido las siguientes dimensiones de análisis y las sub-dimensiones o aspectos que las caracterizan:

- 1- Presentación de aspectos históricos: ubicación y extensión de los mismos
- 2- Secuencia temática en el desarrollo de la óptica: orden en que se presentan y exhaustividad de los siguientes núcleos temáticos: ondas electromagnéticas, polarización, óptica geométrica, interferencia y difracción.
- 3- Delimitación de los límites de validez de la óptica geométrica y la óptica ondulatoria.
- 4- Desarrollo de los conceptos de interferencia y difracción. Características principales.
 - 4.1- introducción cualitativa del concepto de difracción
 - 4.2- uso de analogías
 - 4.3- condiciones de coherencia
 - 4.4- definición de interferencia luminosa
 - 4.5- definición de difracción de la luz

Análisis de contenido: la secuencia temática en el desarrollo de la óptica

Con el objetivo de identificar en qué contexto se aborda específicamente la temática referida a interferencia y difracción de la luz y las principales características de su tratamiento, se han elaborado tablas comparativas de los textos seleccionados.

En la tabla N° 1 se consigna la secuencia en que se desarrollan los distintos núcleos temáticos hasta abordar los fenómenos de interferencia y difracción. En dicha secuencia se resaltan con letra cursiva y un símbolo (*) los aspectos señalados en las dimensiones de análisis, tales como la introducción histórica, la definición de frente de onda y rayo, la introducción de una primera definición de difracción y la delimitación entre la óptica ondulatoria y la óptica geométrica.

La tabla N° 2 representa una continuación de la tabla N°1 y muestra la secuencia en que se abordan los conceptos de interferencia y difracción dentro del desarrollo de la óptica. También aquí se resaltan con cursiva y con el símbolo (*) los aspectos contemplados en las dimensiones de análisis, tales como: definición de interferencia, definición de coherencia, la difracción en la experiencia de Young, el uso de analogías y la definición de difracción.

Tanto en la tabla N° 1 como en la tabla N° 2 aquellos aspectos resaltados con cursiva y que corresponden a las distintas dimensiones de análisis, también van a ser objeto de un análisis más detallado.

Tabla N° 1: Tabla comparativa de la secuencia en que desarrollan los contenidos de la óptica (1° parte)

Young	Serway	Resnick	Tipler	Hecht	Landsberg	Alonso
<p>Introducción Ec. de Maxwell Radiación electromagnética Espectro electromagnético Definición de luz OE plana Diagrama frentes de onda Diag. E-B clásico Energía de ondas Naturaleza y propagación de la luz <i>*Frentes de ondas y rayos</i> <i>*Definición de Óptica</i> <i>Geométrica (1°)</i> Reflexión Refracción Dispersión</p> <p>Polarización Filtros Polarizadores Polarización por reflexión. Polarización circular Polarización elíptica Dispersión de luz por partículas Ppio. de Huygens Reflexión y Ppio. de Huygens Refracción y Ppio. de Huygens</p> <p>Óptica Geométrica <i>*Definición de Óptica</i> <i>Geométrica (2°)</i> Reflexión y Refracción en superficies planas Formación de imágenes El ojo Defectos de la visión Sistemas ópticos</p>	<p>Introducción OE (Onda electromagnética) Ec. de Maxwell Espectro electromagnético Definición de luz Naturaleza de la luz <i>* Introducción Histórica (1 pág.)</i> Velocidad de la luz</p> <p>Optica Geométrica <i>*Definición de Óptica</i> <i>Geométrica</i> <i>*Frentes de ondas y rayos</i> <i>*Definición de difracción (cualitativa)</i> <i>*Delimitación de óptica geométrica y óptica ondulatoria (d/λ)</i> Reflexión Refracción Ppio. de Huygens Dispersión en prismas Reflexión Refracción Formación de imágenes Espejos planos Espejos esféricos Lentes delgadas Aberraciones Cámara fotográfica El ojo Lupa simple Microscopio Telescopio</p>	<p>Introducción Ec. de Maxwell OE (Onda electromagnética) Espectro electromagnético Definición de luz Ondas viajeras Onda plana polarizada linealmente Diag. E-B clásico Naturaleza y propagación de la luz La velocidad de la luz Velocidad de la luz en materiales</p> <p>Optica Geométrica <i>*Delimitación de óptica geométrica y ondulatoria</i> <i>*Frentes de ondas y rayos</i> <i>*Difracción (def. cualitativa)</i> <i>*Limite entre modelos: a/λ</i> Reflexión Refracción Formación de imágenes Espejos planos, esféricos y lentes esféricas Instrumentos ópticos</p>	<p>Introducción OE (Onda electromagnética) Ec. de Maxwell Diag. E-B clásico Energía ondas Espectro electromagnético Definición de luz <i>* Introducción Histórica (2 pág.)</i> Velocidad de la luz Propagación de la luz <i>*Frentes de ondas y rayos</i> Ppio. de Huygens Reflexión Refracción Dispersión en prismas Arco iris</p> <p>Polarización Polarización lineal Polarización circular Mecanismos de polarización: absorción, dispersión y reflexión Polarización por birrefringencia</p> <p>Optica Geométrica <i>*Definición de Óptica Geométrica</i> Espejos planos y esféricos Lentes delgadas Diagramas de rayos Formación de imágenes Instrumentos ópticos El ojo Cámara fotográfica Microscopio Anteojos y telescopios</p>	<p>Introducción <i>* Introducción histórica (11 pág.)</i> Matemática de las ondas Ec. Maxwell Diagrama frentes de onda plana Diag. E-B clásico Dispersión Espectro electromagnético Definición de luz Propagación de la luz Reflexión y Refracción: Ley de Snell Ppio. de Huygens <i>*Definición de rayos de luz</i> Tratamiento electromagnético Interacción de luz con la materia</p> <p>Optica Geométrica <i>*Concepto de difracción</i> <i>*Delimitación de óptica geométrica y ondulatoria</i> Lentes y Espejos Formación de imágenes Prismas Sistemas ópticos El ojo Microscopio Lentes gruesas Aberraciones</p> <p>Superposición de ondas Análisis de Fourier</p> <p>Polarización Polariz. lineal, circular y elíptica Polarizadores Dicroísmo Birrefringencia Esparcimiento Polarización por reflexión. Retardadores Actividad óptica</p>	<p>Introducción <i>* Introducción histórica (12 pág.)</i> Ecuación de la onda Ec. Maxwell OE (Onda electromagnética) Ppio. de superposición Análisis de Fourier Onda monocrom. Energía de ondas <i>*Frentes de ondas y rayos</i> Polarización Onda plana polarizada Conceptos fotométricos</p> <p>Polarización Polarización por reflexión Propagación en medios anisótropos Dicroísmo Doble refracción Actividad óptica</p> <p>Geometría de las ondas <i>*Definición de Óptica Geométrica</i> Reflexión y Refracción en superficies esféricas Formación de imágenes Lentes y trazado de rayos Instrumentos ópticos Dispersión por un prisma Aberración cromática</p>	<p>Introducción Movimiento ondulatorio Análisis de Fourier Tipos de ondas OE Plana Diagrama frentes de onda Diag. E-B Energía de ondas Producción y propagación de OE Espectro electromagnético Definición de luz Ppio. de Huygens Teorema de Malus <i>*Frentes de ondas y rayos</i> Reflexión y Refracción de ondas planas y esféricas Reflexión y Refrac. de ondas electromagnéticas</p>

Tabla N° 2: Tabla comparativa de la secuencia en que desarrollan los contenidos de la óptica (2° parte). Interferencia y difracción.

Young	Serway	Resnick	Tipler	Hecht	Landsberg	Alonso
<p>Interferencia *Definición de interferencia *Definición de óptica física Principio de superposición *Fuentes coherentes y monocromáticas Interferencia constructiva y destructiva Posición de máximos de interferencia *Exp. de Young (no menciona difracción) *Analogía: patrón de interferencia en tanque de agua Interferencia constructiva y destructiva Intensidad de patrones de interferencia Interferencia en películas delgadas Anillos de Newton</p> <p>Difracción *Definición de difracción Difracción de Fresnel Difracción de Fraunhofer *Difracción y Ppio. de Huygens Difracción por una ranura Posición de mínimos Intensidad de patrones de difracción Ranuras múltiples Redes de difracción Resolución de redes</p>	<p>Interferencia Interferencia de ondas mecánicas Interferencia luminosa *Ondas coherentes y monocromáticas *Experiencia de Young (considera difracción) *Analogía: patrón de interferencia en tanque de agua Posición de máximos de interferencia Intensidad de patrones de interferencia Diagrama de fasores Interferencia en películas delgadas Anillos de Newton</p> <p>Difracción *Definición de difracción Difracción por una abertura Ppio. de Huygens Posición de mínimos Intensidad del patrón de una rendija Difracción en dos rendijas Intensidad del patrón difracción de dos rendijas Resolución de. Aberturas Redes de difracción Poder resolución de redes difracción</p> <p>Polarización Polarización lineal Polarización por absorción y reflexión Polarización por reflexión doble Polarización por dispersión Actividad óptica</p>	<p>Interferencia *Definición de interferencia *Ondas coherentes Interferencia por dos rendijas *Analogía: patrón de interferencia en tanque de agua *Experiencia de Young (considera difracción) Posición de máximos de intensidad Definición de coherencia Intensidad del patrón de interferencia Interferencia en películas delgadas</p> <p>Difracción *Breve síntesis histórica(1pág.) Difracción por una rendija Intensidad del patrón de difracción Interferencia y difracción por dos rendijas Rejillas de difracción Poder de resolución</p>	<p>Interferencia y Difracción *Definición de interferencia *Definición de difracción Ondas armónicas Diferencia de fase *Ondas coherentes Interferencia en películas delgadas Anillos de Newton Interferencia por dos rendijas *Analogía con difracción en un tanque de agua Posición de máximos de intensidad con fasores Interferencia con tres o más fuentes</p> <p>Difracción por una rendija Posición de mínimos Intensidad de la difracción Interferencia y difracción por dos rendijas Difracción de Fraunhofer Difracción de Fresnell Resolución de redes de difracción</p>	<p>Interferencia *Definición de interferencia *Analogía: patrón de interferencia en tanque de agua Condiciones para la interferencia *Definición de coherencia Métodos de obtención de ondas coherentes Interferencia con haces múltiples Interferometría</p> <p>Difracción *Definición de difracción *Analogía con difracción en un tanque de agua Difracción de. Fraunhofer Difracción por una abertura Doble rendija Rendijas múltiples Aberturas rectangular y circular Red de difracción Difracción de Fresnel: aberturas y obstáculos circulares Placas zonales Difracción por una rendija y por un obstáculo Difracción de bordes</p> <p>Optica de Fourier Transformada de Fourier Aplicaciones ópticas Difracción de Fraunhofer</p> <p>Coherencia Visibilidad Grado de coherencia</p>	<p>Interferencia Ppio. de superposición Interferencia de dos ondas * Definición de coherencia * El ojo como detector Parámetro de visibilidad Obtención de ondas coherentes *Experiencia de Young(considera difracción) Coherencia espacial El láser Interferencia de luz polarizada Longitud de coherencia Luz parcialmente coherente Interferencia en láminas delgadas Anillos de Newton</p> <p>Difracción Ppio. de Huygens *Delimitación de Óptica geométrica Ppio. de Huygens-Fresnel: óptica ondulatoria *Definición de difracción Difracción de Fresnel Difracción de Fraunhofer Intensidad de patrones de difracción Redes difracción</p> <p>Optica Geométrica *Definición de. Óptica Geométrica Reflexión y Refracción en superficies esféricas Sistemas ópticos Aberraciones Difracción en instrumentos ópticos</p> <p>Polarización Luz polarizada Birrefringencia *Interferencia de rayos polarizados: Fresnel y Arago</p>	<p>Interferencia *Definición de interferencia Interf. por dos fuentes punt. y sincrónicas *Analogía: patrón de interferencia tanque de agua Interferencia por varias fuentes Interferencia en láminas delgadas *Definición de coherencia *Exp. de Young (no menciona difracción. Usa Ppio. Huygens) Interferencia constructiva y destructiva Intensidad de patrones de interferencia Interferencia de varias fuentes sincrónicas Anillos de Newton</p> <p>Difracción *Definición de difracción *Analogía con difracción en un tanque de agua Difracción de Fraunhofer por una rendija Intensidad del patrón de difrac. Difracción de Fraunhofer Abertura circular Intensidad del patrón de difracción Redes de difracción Difracción de Fresnell Zonas Fresnell Difusión de ondas</p>

Análisis de contenido: la delimitación de la óptica geométrica y la óptica ondulatoria

La tabla N° 3 muestra cómo se delimita el ámbito de la Óptica Geométrica en cada uno de los textos seleccionados. Se distinguen dos categorías, según sus características principales. En todos los casos presentados, se ha realizado previamente una introducción de los conceptos de *frente de onda* y *rayo*, en distintos momentos del desarrollo de los conceptos.

Tabla N° 3: Delimitación del ámbito de validez de la Óptica Geométrica en los diferentes textos

Texto	Delimitación del ámbito de validez de la Óptica Geométrica	Características de la delimitación
Young	Introduce previamente los conceptos de <i>frentes de onda</i> y <i>rayos</i> , al abordar la naturaleza y propagación de la luz. - “ <i>Rama de la óptica en la cual resulta adecuada la descripción con el modelo de rayos. La luz se representa mediante líneas rectas que se desvían en una superficie reflectante o refractante</i> ”.	Solo adecuación del modelo de rayos
Serway	Define previamente frentes de onda y rayos, al abordar la Óptica Geométrica. - “ <i>Se ocupa de aquellos casos en que es válida la suposición $\lambda \ll d$ y la aproximación por rayos o propagación rectilínea de la luz</i> ”.	<p>Cuando el tamaño de los objetos es mucho mayor que la longitud de onda de la luz</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>Es válida la aproximación por rayos Es válida la propagación rectilínea Se desprecian los efectos de difracción.</p>
Resnick	Define previamente <i>frentes de onda</i> y <i>rayos</i> , al abordar la Óptica Geométrica. También considera aquí la difracción en forma cualitativa. “ <i>Trata los casos en que la luz interacciona con objetos cuyo tamaño es mucho mayor de la longitud de onda de la luz</i> ”	
Tipler	Define previamente <i>frentes de onda</i> y <i>rayos</i> , al abordar el Principio de Huygens “ <i>Estudio de los casos en que la longitud de onda de la luz es muy pequeña comparada con el tamaño de los obstáculos o aberturas que se encuentran a su paso. Se pueden despreciar los efectos de la difracción y en consecuencia es válida la aproximación de rayos y la propagación rectilínea de la luz</i> ”.	
Alonso	Define previamente <i>frentes de onda</i> y <i>rayos</i> al abordar el Principio de Huygens “ <i>La Geometría de las ondas estudia los fenómenos de reflexión y refracción desde el punto de vista geométrico, usando el concepto de rayo como herramienta. Este tratamiento es adecuado en tanto las superficies y otras discontinuidades que encuentre la onda en su propagación sean muy grandes respecto a la longitud de onda</i> ”	
Hecht	Define previamente <i>frentes de onda</i> y <i>rayos</i> al abordar el Principio de Huygens. Introduce concepto de difracción al iniciar el desarrollo de la Óptica Geométrica. “ <i>Trata la manipulación controlada de los frentes de onda por medio de la interposición de cuerpos reflectores y/o refractores, despreciando cualquier efecto de difracción. La difracción es la desviación aparente de la propagación rectilínea que se produce cuando el sistema acepta sólo un segmento del frente de onda. Sus efectos disminuyen cuando λ disminuye en comparación a las dimensiones del sistema óptico</i> ”.	
Landsberg	Introduce previamente los conceptos de <i>frentes de onda</i> y <i>rayos</i> , al considerar la polarización de las ondas. “ <i>La óptica geométrica opera con el concepto de rayos luminosos aislados que se subordinan a las conocidas leyes de refracción y reflexión y que son independientes entre sí...</i> ” “ <i>El proceso de obtención de un haz infinitamente angosto es imposible a consecuencia de la difracción, por lo que el rayo luminoso es un concepto matemático abstracto y no un ente físico</i> ”.. “ <i>la relación $\varphi \approx \lambda/D$ muestra que la desviación angular que viola la propagación rectilínea de la luz puede ser pequeña cuando mayor sea D en relación a λ</i> ”	

Análisis de contenido: el desarrollo de los conceptos de interferencia y difracción

La tabla N° 4 muestra en la segunda columna cómo se define el concepto de interferencia en cada uno de los textos y en la tercera columna aquellos aspectos de la definición que son comunes a más de un autor. Se distinguen dos categorías: una que resalta sólo el aspecto operativo como superposición de ondas y otra que hace referencia a los resultados de la radiación obtenida como

superposición. La tabla N° 5 muestra en la segunda columna cómo se define el concepto de difracción y en la tercera columna se puede observar que los aspectos resaltados por cada autor permiten distinguir tres categorías. La primera de ellas enfatiza el esparcimiento y el patrón de zonas claras y oscuras, la segunda se focaliza en la interferencia de ondas que provienen de elementos de la abertura y la tercera se refiere a la alteración de los frentes de onda por obstáculos.

Tabla N° 4: Definición del concepto de interferencia luminosa

Autor	Definición de interferencia	Características de la definición
Tipler, Young, Serway	<i>“Combinación por superposición de dos o más ondas que se encuentran en un punto del espacio, donde la onda resultante en cualquier punto y cualquier instante está regida por el principio de superposición”.</i>	Considera solo el aspecto operativo como <i>superposición de ondas</i>
Alonso	<i>“Característica del movimiento ondulatorio, ocurre cuando dos o más movimientos ondulatorios coinciden en el espacio y en el tiempo”.</i>	
Resnick	<i>“Efecto que se produce cuando ondas idénticas que proceden de dos fuentes se traslapan en un punto en el espacio, dando como resultado una onda combinada cuya intensidad puede ser mayor o menor que la suma de las intensidades de las dos ondas”</i>	Análisis más profundo, considera la <i>intensidad de la radiación resultante, en cada punto del espacio</i> . Involucra implícitamente el <i>concepto de coherencia</i>
Hecht	<i>“Interacción de dos o más ondas de luz que producen una irradiancia resultante, la cual se desvía de la suma de las irradiancias componentes”.</i>	
Landsberg	<i>“Se produce interferencia de ondas cuando al actuar conjuntamente, la intensidad de la onda resultante no es un valor constante igual a la suma de intensidades de cada una de ellas, sino que puede ser mayor o menor, dependiendo de la diferencia de fases”.</i>	

Tabla N° 5: Definición del concepto de difracción

Autor	Definición de difracción	Características de la definición
Serway	<i>“Fenómeno que ocurre cuando la luz que atraviesa una rendija angosta, comparable a la longitud de onda de la luz, se esparce en regiones que quedarían en la sombra si la luz se desplazara en línea recta. Se observa un patrón de difracción formado por zonas iluminadas y zonas oscuras, similar a lo que ocurre con un patrón de interferencia”.</i>	Esparcimiento de la luz, formando un patrón de zonas iluminadas y oscuras.
Resnick	<i>“Desviación hacia una nueva dirección de las ondas que encuentran un objeto (barrera o abertura) en su camino, cuyo tamaño es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda. En esa región se observa un patrón de difracción formado por zonas iluminadas y zonas oscuras”.</i>	
Young	<i>“Efectos de la interferencia debidos a la combinación de muchas ondas luminosas. Cada parte infinitesimal de una abertura actúa como una fuente de ondas y el patrón resultante de luz y oscuridad es producto de la interferencia entre las ondas que proceden de estas fuente”.</i>	La difracción es el producto de la <i>interferencia de muchas ondas</i> que provienen de cada parte infinitesimal de una abertura, y forman un patrón de zonas iluminadas y oscuras.
Hecht	<i>“Fenómeno que ocurre cuando se altera una región del frente de onda, en amplitud o fase, al encontrarse con un obstáculo transparente u opaco. Los segmentos del frente de onda que se propagan más allá del obstáculo interfieren produciendo una particular distribución de densidad de energía conocida como patrón de difracción. No hay distinción física significativa entre interferencia y difracción”.</i>	
Landsberg	<i>“La difracción se refiere a los fenómenos de contorno de los impedimentos tales como pantallas y bordes de diafragmas. Se producen cuando una parte del frente de onda viajera interrumpe su acción a consecuencia de que la luz se propaga entre obstáculos que tapan parte del frente de onda”.</i>	Fenómenos de <i>contorneo</i> alrededor de bordes. Hacen referencia a la <i>alteración del frente de onda</i> por la presencia de obstáculos en la propagación del mismo.
Tipler	<i>“Desviación que sufren las ondas alrededor de los bordes o esquinas, que se produce cuando una porción de un frente de ondas se ve cortado o interrumpido por una barrera u obstáculo”.</i>	
Alonso	<i>“La difracción se observa cuando se distorsiona una onda por un obstáculo cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda de aquélla. Se puede impedir el paso de una pequeña porción de la onda con un obstáculo, o se puede dejar pasar una pequeña porción de la onda a través de pequeños orificios o ranuras”.</i>	

Síntesis del análisis de contenido

Dos de los textos considerados (Hecht y Landsberg) presentan una introducción histórica exhaustiva, aproximadamente diez páginas, que permite al lector comprender la construcción de las teorías sobre la luz y el papel de la experimentación en el desarrollo de las mismas. Se trata de textos específicos de Óptica, utilizados generalmente en la carrera de Licenciatura en Física. Del resto, solamente dos (Resnick y Tipler) presentan una breve síntesis de aspectos históricos, de una ó dos páginas, cuando definen luz a partir del espectro electromagnético y se refieren a la naturaleza de la misma.

El orden de presentación y exposición de los temas es similar en seis de textos analizados (Young, Resnick, Tipler, Serway, Alonso y Hecht). Se inicia con la óptica de principios del siglo XX, estableciendo la naturaleza de la luz como una onda electromagnética que puede propagarse en el vacío y se estudian sus características desde este modelo. Se abordan en primer lugar los fenómenos de la reflexión, refracción, colores, arco iris, etc. que en el siglo XVII se habían interpretado desde aquellas teorías pautadas por el principio de propagación rectilínea de la luz. El desarrollo temático continúa delimitando el ámbito de la óptica geométrica y de la óptica ondulatoria y abordando luego la formación de imágenes por lentes, espejos y sistemas ópticos desde el modelo simplificado de rayos. Por último, se estudian aquellos fenómenos que violan la propagación rectilínea de la luz y que tuvieron que esperar dos siglos para ser reconocidos y explicados: los fenómenos de interferencia y difracción. En síntesis, con la teoría ondulatoria del siglo XX se abordan y explican los fenómenos ópticos en un orden similar a la génesis de su desarrollo en la historia de la óptica, pero se plantea (con justificación adecuada) un cambio de paradigma a mitad del desarrollo de los contenidos, en el estudio de la óptica geométrica, para retomar luego el modelo ondulatorio en el estudio de la interferencia y difracción. La única diferencia observada entre los textos consiste en el momento de la secuencia en el cual se abordan los fenómenos relacionados con la polarización de la luz, aunque en todos los casos se realiza una introducción a la misma al presentar el modelo ondulatorio y definir onda plana polarizada.

Solamente uno de los textos analizados (Landsberg) aborda los fenómenos de interferencia y difracción inmediatamente después de considerar luz como onda electromagnética y presentar el modelo ondulatorio. Luego de un estudio exhaustivo de la interferencia y difracción, fundamenta con criterios experimentales la posibilidad de utilizar un modelo simplificado, óptica de rayos, para abordar los fenómenos de reflexión y refracción de la luz. En síntesis, con la teoría ondulatoria del siglo XX se abordan en primer lugar los fenómenos que son característicos de este paradigma y en segundo lugar aquéllos que se explicaban originalmente con la propagación rectilínea de la luz y que ahora se pueden interpretar desde un modelo simplificado de la teoría ondulatoria.

Todos los textos delimitan el ámbito de la óptica geométrica y la óptica ondulatoria, aunque uno de ellos (Young) solo menciona la adecuación del modelo de rayos. El resto establece un criterio experimental para delimitar el ámbito de validez del modelo de rayos o de la propagación rectilínea: $\lambda \ll d$. Tres de los textos (Serway, Resnick y Hecht) analizados presentan y explican este criterio experimental con una definición cualitativa de difracción a partir de diagramas de frentes de onda y rayos para aberturas del tamaño de λ , antes de desarrollar el tema de óptica geométrica.

En la muestra considerada, la definición de *interferencia* se encuentra dividida en dos clases: enunciados que consideran solo el aspecto operativo como superposición de ondas (Tipler, Serway, Sears, Alonso) y enunciados que implican un análisis más profundo sobre la intensidad de la radiación resultante e involucran implícitamente el concepto de coherencia (Hecht, Resnick, Landsberg). La definición de *difracción* también se encuentra dividida en dos categorías: enunciados que describen el fenómeno como desviación de la propagación rectilínea y formación de patrones de intensidad (Serway, Resnick, Tipler) y enunciados que describen el fenómeno considerando la alteración del

frente de onda por la presencia de obstáculos en la propagación del mismo (Hecht, Alonso, Young, Landsberg).

Solamente dos de los textos analizados (Hecht y Landsberg), específicos en el tema óptica y utilizados por alumnos de Licenciatura, presentan un estudio detallado acerca de la coherencia. Este análisis involucra las dimensiones del sistema experimental, las características de emisión de la fuente y la respuesta del ojo como sensor a las distintas magnitudes físicas involucradas.

Reflexiones finales

A partir del análisis de la evolución histórica de los conceptos de difracción e interferencia y algunas características de su transposición didáctica, como el lugar que ocupan dentro del desarrollo lógico de contenidos que proponen diferentes textos didácticos y la exhaustividad y profundidad de su tratamiento, surgen las siguientes reflexiones:

Si Huygens, no pudo “ver” el fenómeno de la difracción como un nuevo fenómeno que podía ser explicado desde una teoría ondulatoria a causa de su particular interés en explicar la propagación rectilínea de la luz; si Newton impuso el peso de su autoridad contra toda teoría ondulatoria a causa de que con ella no veía explicación posible a la verdad experimental de que la luz se propaga en línea recta, ¿Cómo pretendemos que los alumnos experimenten en el transcurso de unas pocas clases ese salto conceptual que en la historia de la naturaleza de la luz llevó casi dos siglos? La similitud en la evolución de las ideas se puede interpretar desde el enfoque de Galili (2014), quien considera que a cada momento de la historia, la teoría dominante de la luz se puede representar con una estructura triádica denominada *disciplina-cultura* (DC). Estaría formada por un núcleo (fundamentos del modelo paradigmático), un cuerpo (fenómenos explicados, experimentos y desarrollos tecnológicos) y la periferia (elementos que contradicen y cambian el núcleo), unos dentro de otros. Así, en una estructura DC de la teoría luminosa de rayos del siglo XVII, los fenómenos de interferencia y difracción se ubicarían en la periferia, mientras que la propagación rectilínea y las leyes de reflexión y refracción estarían en el núcleo. Al igual que los científicos en la historia de la ciencia, los alumnos se resisten a cuestionar y cambiar los elementos que componen el núcleo de la estructura, para construir otra distinta en la cual esos fenómenos de la periferia pasen a integrar el cuerpo (fenómenos explicados)

Es frecuente que los fenómenos de interferencia y difracción se estudien después de haber abordado los fenómenos de reflexión y refracción de la luz y formación de imágenes con un modelo simplificado basado en el concepto de “rayo luminoso” (Young y Freedman, 2013; Serway y Jewett, 2005; Tipler, 1996). ¿Cómo pretendemos que nuestros alumnos “piensen” desde la óptica ondulatoria para dar respuesta a los fenómenos de interferencia y difracción inmediatamente después de “adiestrarlos” en realizar marcha de rayos para explicar la formación de imágenes en óptica geométrica? Tampoco podemos asombrarnos de que más tarde confundan un patrón de interferencia con una región de sombra y penumbra, si han explicado satisfactoriamente este efecto considerando que la fuente no es puntual sino extensa y que la luz se propaga en forma rectilínea. Efectivamente, el alumno usa el modelo más sencillo, el que ha resultado tan exitoso en la explicación de fenómenos de su vida cotidiana y del comportamiento de sistemas experimentales en su enseñanza formal, tales como fuente común-orificio/obstáculo-pantalla, o fuente común-lente-pantalla (formación de sombras y penumbras y formación de imágenes reales y virtuales).

Desde una teoría cognitivista de aprendizaje diríamos que los estudiantes han logrado desarrollar un esquema de acción efectivo basado en la propagación rectilínea de la luz para explicar distintos fenómenos del ámbito de la óptica geométrica, ¿Cómo abordarían ahora esos alumnos un sistema experimental del mismo tipo (fuente-obstáculo/orificio-pantalla) si las dimensiones del obstáculo u orificio son mucho más pequeñas y se consideran fuentes de características distintas?

¿Por qué ahora se distingue entre fuente común y fuente láser? Estos cambios planteados en el sistema experimental, ¿son suficientes para actuar como detonantes de un cambio de paradigma? Consideramos que en esta instancia un cambio de paradigma por parte de los alumnos necesariamente trae aparejado un análisis mucho más exhaustivo del sistema experimental, en cuanto a las dimensiones involucradas, las características de la fuente que emite y la respuesta del ojo como detector de intensidad luminosa. Si bien los textos analizados son claros en cuanto a las dimensiones del sistema experimental para delimitar el ámbito de la óptica geométrica y de la óptica ondulatoria, en general (a excepción de Hecht y Landsberg) no relacionan lo suficiente las condiciones de coherencia con las características de la fuente y las dimensiones del sistema experimental y no analizan el rol del ojo como sensor de los patrones de interferencia y/o difracción. Surge así la necesidad de la referencia permanente a las situaciones experimentales.

La orientación del docente es fundamental para la interpretación correcta de las distintas representaciones de los textos y de algunas debilidades en la transposición didáctica. Como ejemplo: el principio de Huygens estaba en sus orígenes sustentado en oscilaciones mecánicas del éter, concepto que estuvo presente en la historia de la naturaleza de la luz muchos siglos antes. El abandono del éter fue un proceso muy lento que culminó en el siglo XX y significó también la separación del pensamiento científico del materialismo mecanicista. ¿Cómo lograr entonces en el corto lapso impuesto por el currículo, que el alumno abandone sus concepciones mecanicistas para pensar en términos de conceptos abstractos como los de campo eléctrico y magnético? Justamente en este aspecto se han detectado dificultades con la interpretación del diagrama de onda electromagnética: los alumnos atribuyen extensión espacial a la amplitud del campo eléctrico (Ambrose et al., 1999; Mc Dermott, 2001), lo cual sugiere una concepción mecanicista ¿Cómo lograr que no piense en oscilaciones mecánicas de alguna sustancia en la abertura de la rendija si tiene que imaginarse el espacio vacío de la ranura como múltiples emisores para considerar luego la interacción de la radiación emitida por éstos? Algunos textos no explicitan lo suficiente el sentido actual del Principio de Huygens y presentan gráficos que, al tratar de simplificar el tratamiento de para la comprensión del alumno, obstaculizan de cierta manera ese salto conceptual. Como ejemplo, el gráfico de la figura N° 10 utiliza explícitamente puntos para poner de manifiesto que cada parte de la rendija actúa como una fuente puntual de ondas luminosas. Es aquí donde resulta fundamental la mediación del docente para contextualizar las representaciones o gráficos que se utilicen.

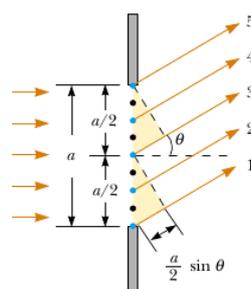


Figura N° 10: trayectoria de los rayos luminosos en una rendija angosta (Serway, 2005)

En relación a las posibilidades de experimentación, hoy en día se dispone fácilmente de fuentes con alto grado de coherencia, como los láseres, que permiten visualizar sin inconvenientes en el laboratorio patrones de difracción e interferencia, a diferencia de las enormes dificultades experimentales existentes en el siglo XVI. Los alumnos disponen así de amplias posibilidades para observar y distinguir patrones de difracción e interferencia y poner a prueba en el laboratorio las predicciones del modelo ondulatorio referidas a estos fenómenos. Se puede plantear una secuencia didáctica de tipo experimental, que se inicie con el uso de una fuente ideal como el láser y se vaya complejizando al considerar distintas fuentes convencionales, sus características de emisión, las características del sensor (el ojo o el fotómetro) y las dimensiones de todo el sistema experimental involucrado.

En una propuesta didáctica como la mencionada anteriormente, que contempla la progresividad en la construcción del conocimiento científico, se puede incorporar actividades basadas en la historia y filosofía de la ciencia, que lleven a reflexionar sobre aquellos aspectos históricos que guardan relación con la actividad que están realizando. Sería interesante, por ejemplo, que en esta instancia pudieran analizar la descripción de las experiencias de Grimaldi y Hooke en el siglo XVI y justificar desde su conocimiento actual la necesidad de tantos cuidados experimentales, tales como el oscurecimiento total de un cuarto, el aprovechamiento máximo de la luz solar, un orificio lo más pequeño posible para que entre luz, etc. Además de constituirse en una actividad de aprendizaje para el análisis de las condiciones de coherencia de un sistema experimental, se pretende evitar un planteamiento empirista que introduce los experimentos sin tener en cuenta el problema histórico que los motivó y las sucesivas hipótesis que se plantearon en su interpretación.

Para concluir, la hipótesis de una similitud entre las preconcepciones de los alumnos y las concepciones vigentes a lo largo de la historia permite reconocer las dificultades de los estudiantes a partir de las resistencias, de los obstáculos que se manifiestan a lo largo de la historia de la ciencia. Favorece la selección de contenidos fundamentales de la disciplina en función de los conceptos estructurantes para introducir nuevos conocimientos y superar obstáculos epistemológicos (Solbes y Traver, 1996) y permite identificar los problemas significativos que debería abordar el estudiante. Desde este punto de vista y sin dejar de lado la influencia del pensamiento de sentido común y de la educación formal, consideramos que sería factible superar las dificultades detectadas en el cambio de paradigma entre el modelo de rayos y el modelo ondulatorio de la luz y en la conceptualización de los fenómenos de interferencia y difracción, a través de propuestas didácticas que en su diseño tengan en cuenta:

- la evolución histórica de los conceptos como indicador de las dificultades que podrían presentar los alumnos en su propia construcción de los conceptos,
- los aciertos y las debilidades de la transposición didáctica que realizan los distintos libros de texto, en cuanto a la lógica de su desarrollo conceptual, la profundidad del abordaje de los conceptos, etc.
- la potencialidad del ámbito del laboratorio para la elaboración de actividades destinadas a llamar la atención de los alumnos sobre los aspectos experimentales que condicionan el ámbito de validez de ambos modelos, sobre las condiciones de coherencia necesarias para visualizar los patrones de intensidad y sobre el rol del ojo como detector de estos patrones.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los árbitros sus valiosos aportes y sugerencias.

Bibliografía

Alonso, M., Finn, E. (1976). *Física. Volumen II: campos y ondas*. Fondo Educ. Interamericano. Mexico.

Ambrose, B., Schaffer, P., Steinberg, R., & Mc Dermott, L. (1999). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, 67(2), 146–155.

Araujo, S., da Silva F. (2009). A teoría ondulatoria de Huygens em livros didáticos para cursos superiores. *Ciência & Educação*. 15 (2), 323-41.

Arons, A. (1970). *Evolución de los conceptos de la física*. Mexico. Edit. Trillas.

- Sílvia, B.; Pesa, M. (2012). El aprendizaje de los fenómenos de interferencia luminosa. Actas VIII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências. Campinas. Brasil.
- Colin, P., & Viennot, L. (2001). Using two models in optics: Students' difficulties and suggestions for teaching. *Physics Education Research: A Supplement to the American Journal of Physics*, 69(7), 36-44.
- Disessa, A. (1982). Unlearning aristotelian Physics: A study of knowledge-based learning. *Cognitive Science*, 6, 37- 75.
- Feher, E., Rice, K. (1985). *A comparison of teacher-student conceptions in optics*. Memorias del Primer Seminario de Cornell sobre Misconceptions, pp. 108-117.
- Galili, I. (2014). Teaching Optics: A Historico-Philosophical Perspective. Chapter 4. International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching, DOI 10.1007/978-94-007-7654-8_4 (pp. 97-128)
- Goldberg, F., McDermott, L. (1987). An investigation of student understanding of the real image formed by converging lens or concave mirror. *Am Jour of Phys.* 55(2), 108-119.
- Gribbin, J. (2003). *Historia de la ciencia (1543-2001)*. Edit. Crítica. Barcelona.
- Grimaldi, F. (1665), *Physico-Mathesis De Lumine Coloribus Et Iride*. Source gallica.bnf.fr / Université Paris Sud.
- Guesne, E. (1985). *Children's ideas in Science -Light*, Open University Press, Milton Keynes, U.K.,
- Hecht, E., Zajac, A. (2000). *Optica*. Edit. Addison-Wesley Iberoamericana S.A.
- Halliday, D., Resnick, R., Krane, K. (1998). *Física*, Vol. 2. Editorial CECSA. México.
- Hull, L. (2011). *Historia y Filosofía de la ciencia*. Editorial Crítica. Barcelona.
- Huygens, C. (1690). *Traité de la lumière*. Edición 1920 digitalizada. Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France.
- Krapas, S.; Pessôa G., Uzêda D. (2011). O tratado sobre a luz de Huyguens: comentarios. *Caderno Bras. Ensino Física*, 28(1),123-151.
- Landsberg, G. S. *Óptica*. (1983). Primer Tomo. Traducción al español. Editorial Mir.
- Leivas, C. (2007). A teoría óptica de Hobbes. *Princípios*, Natal, 14(21), 39-53.
- Matthews, M. (1994). Historia, filosofía y enseñanza de las ciencias: la aproximación actual. *Enseñanza de las ciencias*. 12 (2), 255-27.
- Maurines, L. (2010). Geometrical Reasoning in Wave Situations: The case of light diffraction and coherent illumination optical imaging. *International Journal of Science Education*. 32(14), 1895-1926.
- McDermott, L. (2001). Oersted Medal Lecture 2001: Physics Education Research. The Key to Student Learning. *American Journal of Physics*. 69 (11), 1127-1137.
- Munari, A. (1994). Jean Piaget. *Revista Perspectivas*. UNESCO: Oficina Internacional de Educación. París. 24(1-2), 315-332.

- Pesa, M. (1997). *Concepciones y preconcepciones referidas a la formación de imágenes*. Tesis doctoral.
- Pesa, M.; Colombo L. (1993). Paralelismo entre los modelos precientíficos e históricos en la óptica - implicancias para la educación. *Cad. Cat. Ens. Fís.*, 10(2),128-136.
- Pesic, P. (2007). *El cielo en una botella*. Historia de la pesquisa sobre el azul del firmamento. Edit. Gedisa. Barcelona.
- Piaget, J. (1975). *Introducción a la epistemología genética. El pensamiento físico*. Ed. Paidós. Buenos Aires.
- Piaget, J.; García, R. (2004). *Psicogénesis e historia de la ciencia*. Siglo XXI Editores. Mexico.
- Porta, L.; Silva, M. (2003). La investigación cualitativa: El Análisis de Contenido en la investigación educativa. Recuperado de www.uccor.edu.ar/paginas/REDUC/porta.pd. Septiembre de 2015.
- Scheaffer, S. (2011). *Trabajos de Cristal. Ensayos de historia de la ciencia. 1650-1900*. Ediciones de historia S.A. Madrid.
- Serway R., Jewett J. (2005). *Física*. Volumen II. Ed. Thomson.
- Solbes, J.; Traver, M. (1996). La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química. *Enseñanza de las Ciencias*. 14(1), 103-112.
- Solís, C.; Selles, M. (2005). *Historia de la Ciencia*. Editorial Espasa Calpe S. A. España.
- Tipler, P. (1996). *Física*. Edit. Reverté S. A. España.
- Welti, R. (2013). *La explicación del azul del cielo. Una aventura del pensamiento*. Edit. Vesperi Refulgens. Rosario. Argentina.
- Westfall, R. (2006). *Isaac Newton: una vida*. Ed. Akal S.A. Madrid. Disponible en <http://books.google.com.ar/books>.
- Wosilait, K., Heron, P. R. L., Schaffer, P. S., & Mc Dermott, L. (1999). Addressing students' difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light. *Physics Education Research: A supplement to the American Journal of Physics*, 67(7), 5–15.
- Young, H., Freedman, R. (2013). *Física Universitaria*. Vol 2. Editorial Pearson.
- Zajonc, A. (1994). *Atrapando la luz*. Historia de la luz y de la mente. Edit. Andrés Bello.

Recibido em: 08.10.2015

Aceito em: 03.12.2015