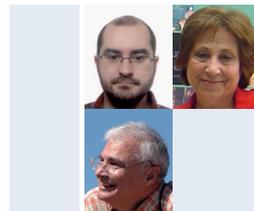


La estructura de las revoluciones científicas y el caso especial de la óptica



Esteban Moreno Gómez*

El CSIC en la Escuela. VACC-CSIC

M.ª Carmen Refolio y José M.ª López Sancho

El CSIC en la Escuela. IFF-CSIC

Palabras clave

Luz, onda, partícula, Kuhn, revolución, aula, historia, ciencia.

Resumen

En este trabajo exponemos el esquema propuesto por Kuhn sobre la estructura de las revoluciones científicas y lo utilizamos para presentar el caso especial de la historia de la óptica, en lo que se refiere a los modelos corpuscular y ondulatorio. El objetivo es poner de manifiesto la coexistencia de dos teorías totalmente diferentes, la corpuscular y la ondulatoria, señalando la diferencia entre el proceso de sustitución de un modelo por otro, como en el caso de el universo de Ptolomeo por el de Copérnico, y el de convivencia de dos representaciones aparentemente incompatibles del mismo fenómeno. La paradoja de la doble naturaleza, la corpuscular de Newton (1704) y la ondulatoria de Young (1801) todavía persiste. De Broglie extendió en 1924 esta doble naturaleza a todas las partículas, con su teoría de onda asociada. En la actualidad la naturaleza de la luz es objeto de importantes trabajos de investigación.

Introducción: Paradigma y ciencia normal

En 1962 Kuhn publicó *The Structure of Scientific Revolutions*. En esta obra expuso su modelo de evolución de las ciencias, acomodándolo en cierta medida al esquema de evolución cognitiva de Piaget. De acuerdo con este esquema las ciencias avanzan por sustitución de un modelo, bien establecido y aceptado por la comunidad científica, por otro elaborado para explicar nuevos resultados experimentales. Para explicar estos cambios de modelo científico Kuhn necesita introducir algunos conceptos nuevos que analizaremos a continuación.

.....
* E-mai del autor: esteban@orgc.csic.es.

En primer lugar define lo que llama **paradigma**, idea difícil de exponer, pero que podemos identificar como el conjunto de creencias, preguntas y formas de ver la realidad que determinan los preconceptos y la manera de pensar que caracterizan una sociedad en un momento determinado de su historia.

Kuhn explica cómo concibió la idea de paradigma como un elemento importante en el desarrollo del pensamiento cuando leyó la Física de Aristóteles y comparó sus conceptos de movimiento, materia y forma con los de Galileo y Newton. Le resultó evidente que la manera de pensar de Aristóteles no era el origen de la de Galileo y ni siquiera se podía considerar como la misma ciencia, tan diferentes eran ambas concepciones del mundo.

Para aclarar el concepto de paradigma kuhniano, podemos imaginar que trasladamos a una persona culta (en el sentido de conocedor de su cultura) de un momento histórico a otro, por ejemplo de principios del siglo XVI al siglo XVII en Europa. Como habitante del siglo XVI, tiene una percepción del mundo totalmente aristotélica, es decir, la Tierra es el centro del universo, el hombre es de naturaleza distinta a la de los demás animales, la naturaleza manifiesta horror al vacío, la materia de la que están hechos los objetos no determina las propiedades de los mismos, etc., además de admitir la existencia de fuerzas sobrenaturales para hacer funcionar el sistema solar. En cambio, cien años después la Tierra queda relegada al papel de simple planeta, el cuerpo humano es semejante al de los demás animales, no existe ninguna propiedad mística como la del horror al vacío, las fuerzas aparecen obedeciendo a leyes naturales fijas y las características de los materiales fijan el comportamiento de los objetos. Además hay que añadir la valoración que se tenía de saber leer y escribir, la consideración social de la mujer, el grado de acatamiento de las doctrinas de la iglesia y del poder del rey, que también definen el esquema de valores reinante en cada momento histórico, etc.

De acuerdo con Kuhn el paradigma así definido forma un cuadro que enmarca el pensamiento de manera que ayuda a entender el mundo en el que se vive, pero que a la vez limita la creatividad impidiendo que se salga fuera de él. Kuhn piensa que este efecto limitador alcanza también a los científicos de la época, idea en la que se han centrado la mayor parte de las críticas a su modelo. Debemos darnos cuenta que el concepto de paradigma se refiere exclusivamente al aspecto intelectual de las personas, es decir, a lo que los informáticos actuales llamarían el *software*. Esto quiere decir que si pudiésemos transportar a un recién nacido desde la época prehistórica a la sociedad del siglo XVII que estamos estudiando y lo educásemos en esa sociedad, no podríamos hallar ninguna diferencia con los demás ciudadanos de la época, niños nacidos más de cinco mil años después.

Como todos sabemos en el periodo que tratamos se produjeron importantes cambios en la estructura social y el origen de la autoridad con la primera revolución burguesa de Cromwell. Un mundo poblado por seres sobrenaturales que convivían con las personas y cuya presencia nadie ponía en duda, fue cambiando a medida que la arquitectura evolucionaba del gótico, con la luz del sol coloreada por las vidrieras a los espacios mucho más abiertos y menos misteriosos construidos para las personas del renacimiento y del barroco. Los cambios en la música y literatura también se produjeron en el mismo sentido, de manera que una persona de principios del siglo XVI se encontraría *desplazada*, en un paradigma extraño, cuando se encontrara en el siglo XVII.

En la sociedad científica, el concepto de *paradigma* va unido al concepto de ***ciencia normal***. Esta idea se refiere al conjunto de teorías, de modelos que se manejan, de explicaciones que se consideran válidas, de instrumentos de observación y medida, de los problemas que se investigan y de las características de las interpretaciones que se admiten. Como ejemplo Kuhn presenta el caso del mundo científico pre-copernicano, donde el lector puede identificar los rasgos distintivos que conformaban el paradigma. Volviendo a nuestro ejemplo, los científicos de principios del XVI se planteaban cómo podían describir con más precisión los movimientos de los planetas, para lo cual sólo tenían una respuesta: aumentar el número de epiciclos, ecuantes y deferentes (**Imagen 1**). En realidad, como el lector ha adivinado, estos elementos actúan como términos en una serie de Fourier de funciones trigonométricas, con lo que la precisión con que se pueden describir los movimientos es, en principio, tan grande como se desee.

Este tipo de pensamiento vertical no permite salir del paradigma en vigor y por lo tanto solo puede producir *ciencia normal*.

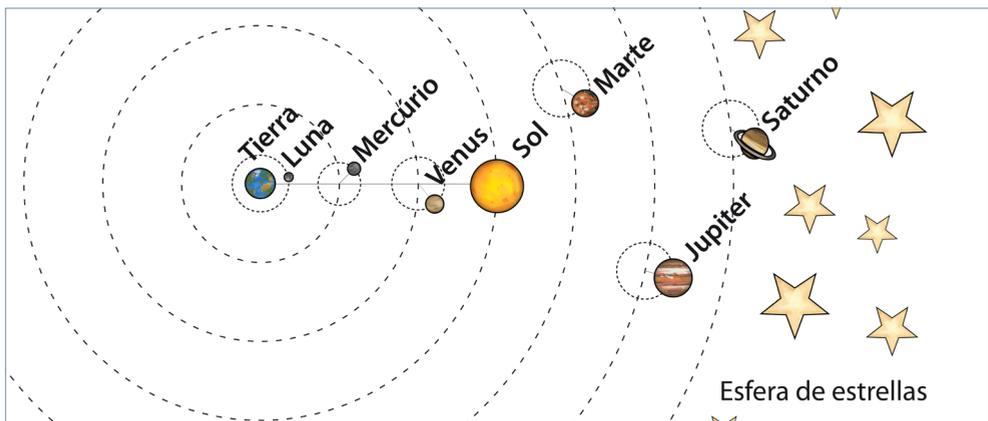


Imagen 1. Sistema de Ptolomeo modificado con epiciclos y deferentes.

La idea de la inconmensurabilidad

Podemos definir este término como el desequilibrio piagetiano que se produce cuando se descubren fenómenos imposibles de explicar dentro del paradigma de la ciencia normal, por mucho que se retoque el modelo. Este es el caso del descubrimiento de Galileo al estudiar las fases de Venus con su telescopio, ya que lo que observó no podía explicarse de ninguna manera con el esquema de Ptolomeo, por muchos epiciclos o ecuanes que se añadiesen (**Imagen 2**). Así surge el concepto de **anomalía** como el resultado de una observación incompatible con un modelo o esquema.

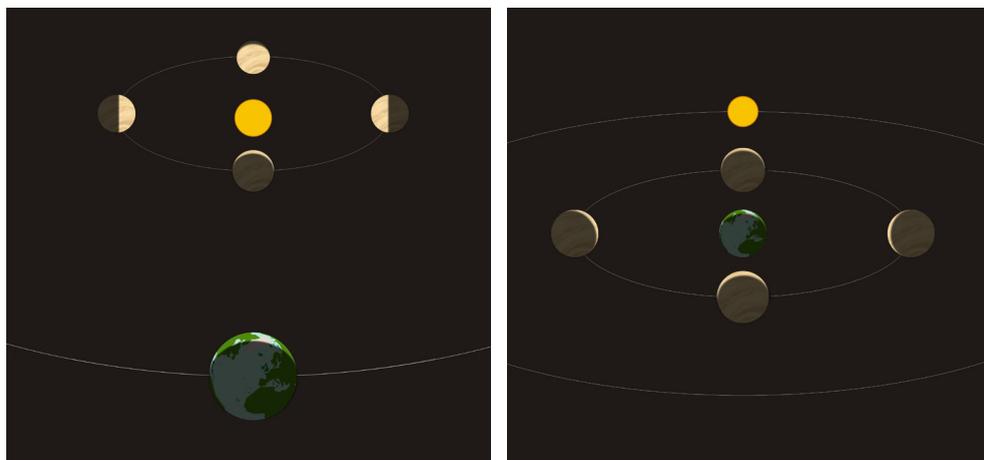


Imagen 2. Modelo Heliocéntrico y modelo geocéntrico.

Tres nuevos conceptos: **cambio de paradigma**, **revolución científica** e **inconmensurabilidad**. Cuando el número de *anomalías* va creciendo y se hace evidente la imposibilidad de explicarlas con el modelo imperante, por mucho que se fuerce, aparece la necesidad de cambiar de modelo. Cuando este cambio de modelo implica también **la modificación del paradigma** asociado decimos que se ha producido una **revolución científica**. Esto sólo ocurre cuando el modelo nuevo es esencialmente diferente al anterior, como lo son el geocéntrico y el heliocéntrico o el creacionismo y la evolución. En este caso Kuhn dice que los dos modelos son **inconmensurables**, como es el caso de la física de Aristóteles y la de Galileo que hemos citado antes.

Paul Feyerabend también utiliza el concepto de *inconmensurabilidad* entre teorías. Para este autor «dos modelos son inconmensurables cuando implican diferencias en la concepción de la naturaleza de la realidad». Así, el modelo en el que la masa

pueda transformarse en energía y la energía presente una masa es inconmensurable con el esquema de física clásica en el que ambas magnitudes son conceptualmente diferentes, con unidades distintas y distintos procesos de medida.

La historia de la óptica

Una vez presentado el esquema básico de Kuhn para modelizar las revoluciones científicas, vamos a repasar brevemente la parte de la historia de la óptica que se refiere a los modelos corpuscular y ondulatorio.

La propagación de la luz por el espacio es un fenómeno muy interesante, que fascina tanto a los niños como a los adultos. Es el principal medio por el que los seres humanos percibimos el mundo real en el que estamos inmersos, tanto el próximo como el que nos aporta información de la Luna, el Sol y el resto del universo. Además es muy sencillo experimentar con la luz, fácil de producir y de manipular, y las características elementales se deducen a partir de medidas tan sencillas como distancias y ángulos.

Aunque el mundo real se compone de espacio y tiempo, masa y energía e información, la óptica se estudia en sus comienzos como un fenómeno de propagación instantánea en el espacio. Esto se debe a que las velocidades que intervienen son tan elevadas que sólo es posible medirlas en el laboratorio a partir del siglo XIX, aunque se habían estimado indirectamente dos siglos antes.

El primero que describe la propagación de la luz introduciendo un modelo es Euclides, hacia el año 300 a.C. En el modelo de Euclides la luz se define como una *cosa* (en el sentido que le da Wittgenstein: algo que existe realmente), que puede presentar atributos o adjetivos, que refleja una propiedad de la luz (como la intensidad o el color), y que es capaz de realizar actos (acciones que se representan por verbos) como iluminar, propagarse, reflejarse, etc. Además, la naturaleza y propiedades de la luz son independientes de la fuente de la que provenga, ya se origine en el Sol, en la Luna, las estrellas, las luciérnagas, un fuego de leña o una lámpara de aceite. Esta característica es el resultado de numerosos experimentos, que nunca hallaron una propiedad que diferenciase los tipos de luz por las propiedades de su origen. Cuando los seres humanos transportaron por primera vez un fuego al interior de una cueva vieron, maravillados, que aparecía ante sus ojos una realidad que había estado oculta, que se reflejaban en el agua del lago interior y en la mica de las rocas y que todo aquel espectáculo desaparecía tan pronto como la hoguera se apagaba. Además cualquier objeto, si se calentaba lo suficiente, era capaz de emitir luz, lo que indica la existencia de una relación entre el calor y la luz.

Con Euclides nace el modelo de rayos, con los que se pueden entender los fenómenos de propagación y reflexión (**Imagen 3**).

Es fácil adivinar que la geometría de Euclides (compendio de sus propios descubrimientos así como de los conocimientos anteriores) se basa en el comportamiento de los rayos, que sin duda le inspiraron los conceptos de punto, línea y ángulo.

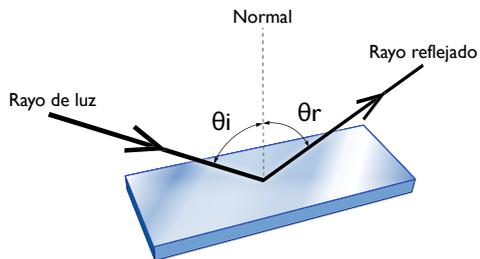


Imagen 3. Modelo de rayos aplicado a la reflexión de la luz en un espejo.

Por medio del modelo de rayos se pueden explicar fácilmente observaciones complicadas, como la formación de imágenes en espejos planos o en la superficie del agua (**Imagen 4**).

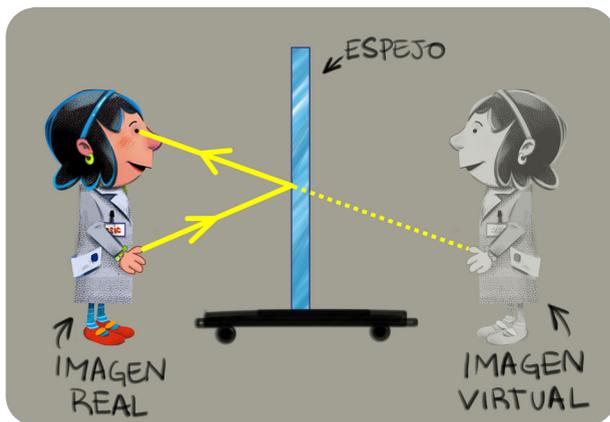


Imagen 4. Modelo de rayos aplicado en el reflejo de un objeto. A la derecha Narciso de François Lemoyne (1688-1737).

También puede aplicarse el modelo para explicar la producción de sombras y sus características de tamaño y forma (**Imagen 5**). Como se transmite en forma de rayos que coinciden con líneas rectas se pueden aplicar todas las propiedades y teoremas de la geometría. Esto permite no solo entender lo que ocurre,

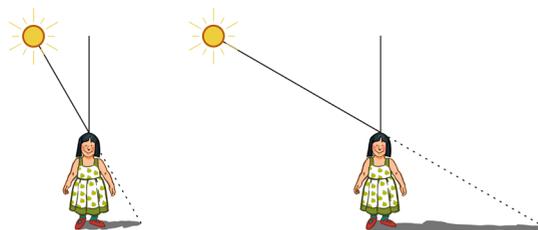


Imagen 5. Modelo de rayos aplicado a la producción de sombras.

sino predecir cómo se va a comportar la luz antes de haber realizado el experimento o la observación.

En primer lugar podemos utilizar un objeto cualquiera, un monigote de cartón, por ejemplo, para estudiar lo que ocurre cuando lo situamos frente a una pared iluminada por el Sol.



Imagen 6. Actividad para asimilar el modelo de rayos.

Inicialmente, antes de colocar nuestro monigote, la luz emitida por el Sol, tras viajar por el espacio, llega a la pared del colegio y la ilumina, se refleja en ella y parte entra en nuestros ojos, produciendo en nuestro cerebro la imagen de la pared iluminada.

Cuando situamos nuestro monigote entre el Sol y la pared, parte de la luz del Sol incide sobre el monigote y lo ilumina; la luz que incide en él se refleja y es captada en parte por nuestros ojos, produciéndose así la imagen del muñeco en nuestro cerebro.

Si estudiamos la situación atentamente veremos que la parte de luz solar interceptada por el monigote no ha podido llegar a la pared, provocando en ella una parte oscura, una sombra igual a la forma del muñeco.

Además, la forma de la sombra es independiente de la situación del observador, es decir, de nuestros ojos, y depende solamente de la posición del muñeco de cartulina respecto al Sol. Es fácil comprobar que la forma de la sombra depende exclusivamente de la manera en la que el monigote interfiere la luz solar, variando dicha forma desde una copia exacta del monigote hasta convertirse en una línea del grosor del cartón, cuando está de perfil. Este hecho, convenientemente estudiado y comprobado por los alumnos bajo la dirección del profesor, debe servir para estudiar las características de la proyección de un objeto de tres dimensiones sobre un plano.

Podemos humanizar más el muñeco realizando dos perforaciones en el lugar de los ojos, observando que la luz pasa por las dos perforaciones y rompe la sombra con dos zonas iluminadas en la pared (**Imagen 6**).

Conviene tener en cuenta que el modelo de producción de sombras es la base de las medidas del radio de la Tierra, utilizando el modelo de Tierra redonda y los cálculos posibles gracias a la geometría euclidiana.

Así lo hizo Eratóstenes, que sabía que el 21 de Junio (solsticio de verano), en Siena, el Sol iluminaba el agua de los pozos, por muy profundos que fuesen y los edificios no proyectaban sombra alguna. Esto implicaba que el Sol se encontraba exactamente en la vertical de la ciudad.

En cambio, en Alejandría, situada a unos 800 kilómetros más al Norte, ese mismo día un mástil clavado en el suelo proyectaba una sombra apreciable. Cuando llegó en 21 de junio Eratóstenes midió el ángulo que formaban los rayos del Sol con la vertical, que resultó ser de 7,2 grados (**Imagen 7**).

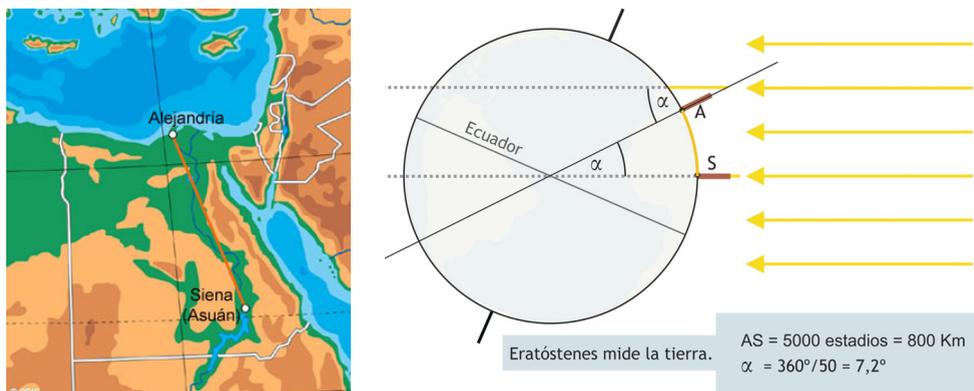


Imagen 7. Medida de Eratóstenes: situación de las ciudades y medida de la inclinación de los rayos solares.

Además mandó medir la distancia entre Siena y Alejandría, que suponía situadas en el mismo meridiano, y resultó que distaban unos 800 kilómetros (5000 estadios). Con esos datos y aplicando el modelo de Tierra aristotélico, es decir, suponiendo que:

1. La Tierra es perfectamente esférica.
2. El Sol se encuentra tan alejado que sus rayos podían considerarse paralelos.

Es fácil calcular la longitud de la circunferencia de la tierra por una simple proporción:

- Si a una distancia de 800 kilómetros le corresponde un ángulo de 7,2 grados, a la longitud total del meridiano le corresponderán 360 grados.
- De donde resulta que el radio del planeta es de 6.366,18 kilómetros, medida muy aceptable para la época.

También, utilizando el modelo de luz de Euclides podemos explicar la existencia del día y la noche y se puede calcular el tamaño de la Luna a partir de las dimensiones

de la sombra de nuestro planeta proyectada sobre la Luna durante los eclipses, y su distancia a nuestro planeta utilizando una moneda y aplicando las propiedades euclidianas de los triángulos semejantes (**Imagen 8**).

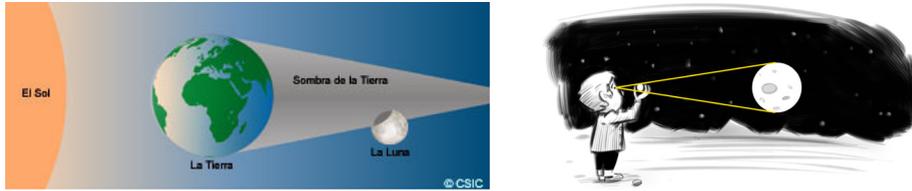


Imagen 8. Tamaño de la luna y su distancia a la tierra aplicando el modelo de rayos.

Todas estas determinaciones las realizaron los griegos poco después de que Euclides publicara su compendio de geometría. A partir de entonces, en tiempos de Aristóteles y Alejandro Magno, siempre irán unidas la óptica y la geometría.

Unos ciento cincuenta años después Ptolomeo estudia los fenómenos de refracción, también utilizando la óptica de rayos, aunque no llega a descubrir la ley a la que obedecen. Aunque conocía las matemáticas necesarias, los resultados de las medidas no eran suficientemente precisas o el paradigma de su época no era el apropiado para relacionar los senos de los ángulos con las propiedades de los materiales por los que se transmite la luz.

En los siglos X y XI, casi en tiempos de la vida del Cid, Alhazen estudió el aumento aparente de la imagen que producen las lentes, utilizando el modelo de rayos, lo que aumentó la valoración del modelo. Alhazen propone un modelo de ojo, basado en las observaciones de Galeno, explicando la función de cada uno de los elementos que realmente lo forman (**Imagen 9**).

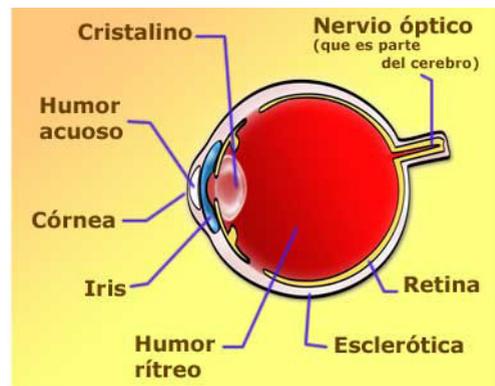


Imagen 9. Modelo de ojo y partes que lo componen.

Además Alhazen intuyó (por cierto, ¿qué es intuir?) que la luz no se propaga instantáneamente por el espacio, sino que lo hace con una velocidad finita.

Esta idea introduce un nuevo actor, el tiempo, en el escenario de la óptica. Pero estamos en plena Edad Media y la sugerencia permanecerá dormida hasta que no la despierte Galileo cuatro o cinco siglos después, ya en el Barroco.

En el siglo XIII, hacia 1220, Robert Grosseteste se interesa por una característica importante de la luz, el color. Hasta entonces se había supuesto que los distintos colores correspondían a rayos luminosos de naturaleza diferente, existiendo rayos rojos, verdes, azules o morados, pero Grosseteste, animado de un espíritu unificador siempre presente en los seres humanos, intenta simplificar las propiedades de la luz suponiendo, **erróneamente**, que el color es una sensación que se debe a la diferente respuesta el ojo a la intensidad del rayo. La intensidad nula o ausencia de luz correspondería al negro. Un rayo de intensidad débil produciría el violeta, aumentando la sensación al recibir rayos de intensidad creciente pasando por añil, azul, verde, amarillo, naranja y rojo. Si se aumenta aún más la intensidad del rayo lo veríamos blanco.

Poco después, hacia 1260, Roger Bacon estudia los efectos de las lentes y las imágenes que éstas forman cuando se mira a través de ellas, utilizando la combinación óptica de rayos-geometría, que se afirmaba así como el modelo aceptado para la luz. En 1300 un médico francés, Bernard de Gordon, inventa los anteojos correctores de miopía y presbicia que aparecen en obras pictóricas a partir de entonces (**Imagen 10**). Es un ejemplo de competencia, al aplicar el conocimiento contenido en el modelo de rayos a la resolución de problemas prácticos.

En 1604 Kepler (**Imagen 11**) elaboró un modelo óptico del ojo, como un instrumento óptico en el que la imagen formada por el cristalino y el resto del sistema óptico se proyectaba en la retina. Con este modelo explicó la miopía y la hipermetropía como defectos del poder de acomodación del cristalino, poniendo de manifiesto la utilidad de los modelos científicos.

Es fácil reproducir el modelo de Kepler del ojo, de una manera simplificada, utilizando una lupa (que hace el papel del cristalino) y una cartulina situada más alejada que el foco. Si oscurecemos la clase y proyectamos una imagen luminosa sobre una pantalla o la pizarra digital, nuestros alumnos verán la imagen invertida formada sobre su cartulina, que está situada en el lugar de la retina.



Imagen 10. Quevedo con anteojos. Retrato de Francisco de Quevedo y Villegas, Madrid, Instituto Valencia de Don Juan. (Juan Van der Hammen?). Tradicionalmente considerado copia de un retrato perdido de Velázquez.

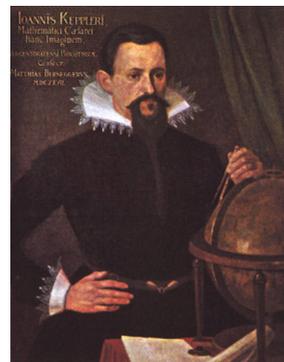


Imagen 11. Retrato de Johannes Kepler.

Kepler, además, determinó que la intensidad de la luz emitida por un cuerpo (energía por unidad de superficie) variaba inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, lo cual es un importante indicador de que los rayos podían ser en realidad chorros de partículas. Como la superficie de una esfera aumenta con el cuadrado del radio y el número de partículas es constante, la intensidad tiene que disminuir con el cuadrado de la distancia.

A finales del siglo XVI Galileo Galilei construyó un telescopio astronómico, basándose en una receta para fabricar anteojos. Cuando lo dirigió al cielo (fue la primera persona que miró al firmamento con un instrumento óptico que aumentaba la capacidad de observación del ojo), observó que el Sol presentaba manchas oscuras en su superficie, lo que le permitió darse cuenta de que giraba sobre sí mismo. Además observó que la luna no era una esfera perfecta sino que más bien se parecía a una Tierra más pequeña, con sus valles y sus montañas, que Júpiter tenía cuatro satélites y que las fases de Venus no se podían explicar con el modelo de Ptolomeo. Más adelante se vio que en realidad había muchos más satélites girando en torno a Jupiter, pero los cuatro descubiertos por Galileo fueron suficientes para imponer la más importante revolución científica Kuhniana. Las naves Voyager completaron su estudio, pero ya en 1979. En la actualidad otras naves espaciales estudian el planeta dentro de un proyecto llamado, como no, proyecto Galileo y el nuevo sistema de posicionamiento global europeo lleva, también, su nombre.

Existen anteojos de Galileo que se venden a un bajo precio porque producen una imagen derecha y, por lo tanto, no necesitan prismas de inversión. Están formados por un objetivo convergente y un ocular divergente y los niños suelen pasar un rato agradable utilizándolos. De esta manera se dan cuenta de que los descubrimientos más importantes pueden reproducirse muy fácilmente, una vez que nos los explican.

Asimismo Galileo, basándose en la sugerencia de Alhazen, intentó determinar la velocidad de la luz, utilizando un método que era apropiado sólo para velocidades muy pequeñas. Se situó en montecillo con un farol y envió a un amigo a un monte cercano, en cuya cima se situó con un farol igual al de Galileo. Ambos habían acordado que cuando Galileo moviese su luz verticalmente procederían a cubrir sus linternas. A continuación Galileo descubriría la suya y comenzaría a contar el tiempo recitando la numeración con una cadencia aproximada de un segundo (para ello disponían de un péndulo, cuyo movimiento habían estudiado): uno, dos, tres; cuando la luz llegase a los ojos de su amigo éste destaparía su farol y Galileo dejaría de contar. Dividiendo el doble de la distancia entre ambos investigadores por el tiempo transcurrido hallarían la velocidad de propagación. Así lo hicieron, pero a

Galileo no le dio tiempo ni siquiera a comenzar su cuenta. Y así llegaron a la conclusión de que la velocidad era, como mínimo, muy elevada para poderla determinar por ese procedimiento.

Es fácil repetir el experimento en el colegio, si se quiere que los alumnos tengan una experiencia directa de un experimento que no da los resultados para los que se diseñó (**Imagen 12**).

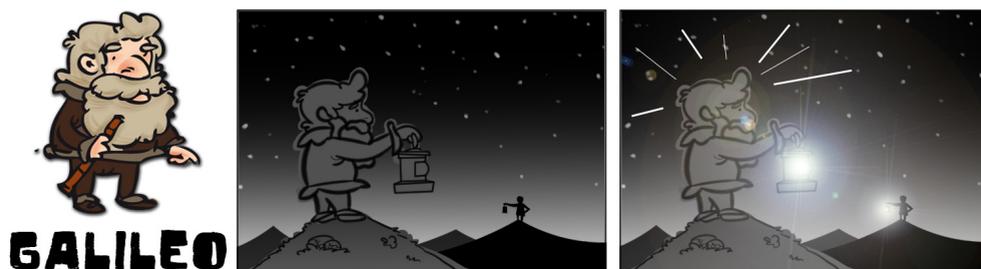


Imagen 12. Intento de medida de la luz por Galileo.

Así hemos llegado al siglo XVII, en un recorrido que comienza dos mil años antes y a lo largo del cual se ha asentado el modelo de rayos. Al revisar los hechos más relevantes de la óptica hemos experimentado una sensación propia de los historiadores: la de saber cuándo los científicos aciertan y cuándo se equivocan, no porque seamos más inteligentes sino simplemente porque sabemos más óptica que ellos. Pero no debemos olvidar que lo que hemos aprendido es, justamente, el resultado de sus trabajos de investigación.

Grimaldi y el modelo ondulatorio de la luz: La primera anomalía

Es difícil hacernos una idea del cambio producido en el mundo científico en sólo unos pocos años, desde la aparición del libro de Copérnico (*De Revolutionibus Orbium Coelestium* en 1543), y principios del siglo XVII, cuando comienza a investigar Grimaldi.

Como dijo Feynman muchos años después, los ángeles encargados de empujar a los planetas a lo largo de su órbita se habían quedado sin ocupación, sustituidos por fuerzas que tiraban de ellos hacia el Sol, en dirección perpendicular a la que ejercían los ángeles. Esas fuerzas, como las de cualquier otro tipo, se representaban ahora por flechas, utilizando el símbolo que había introducido Leonardo unos años antes. **El paradigma había cambiado (Imagen 13).**

Y en este nuevo ambiente intelectual nació y se formó Francesco María Grimaldi (1618-1663). Entre otras cosas estudió las dimensiones de las recién descubiertas montañas de la Luna.

Pero el descubrimiento que nos interesa aquí es el que se refiere a la primera observación que no se explica con el modelo de rayos: el resultado de pasar un haz de luz solar por una rendija muy fina, hecha perforando una cartulina con la punta de una cuchilla muy afilada. Aunque la publicación se realizó en 1665, suponemos que el experimento lo llevó a cabo hacia 1660, tres años antes de su muerte.

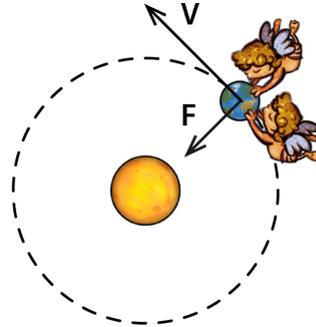


Imagen 13. «Los ángeles son sustituidos por fuerzas».

Podemos realizar este experimento con nuestros alumnos, sin más que practicar un corte muy delgado en una cartulina. Si hacemos pasar el haz de luz de un laser por la rendija y la proyectamos en una pared blanca, la figura que vemos no es la que predice el modelo de rayos, sino una serie de franjas claras y oscuras.

Así fue cómo Grimaldi encontró la primera *anomalía* que se oponía al modelo de rayos, ya que aplicando dicho modelo se predecía que el experimento de la rendija debía producir una franja luminosa única, pero nunca una serie de franjas paralelas (algunos historiadores de la ciencia piensan que Leonardo se había anticipado en el descubrimiento).

Además, el experimento es tan fácil de realizar que muy pronto se repitió en los laboratorios y los gabinetes de toda Europa, modificando la forma y el tamaño de las rendijas, aunque siempre debían mantenerse *pequeñas* (menores de una décima de milímetro). Grimaldi llamó al nuevo fenómeno *difracción* y lo explicó proponiendo que la luz estaba constituida por algo que ondulaba. Así, a mediados del siglo XVII nacía el modelo ondulatorio de la luz, apoyado también por Robert Hooke por esa misma época, aunque debemos puntualizar que ambos investigadores pensaban en ondas del mismo tipo que las del sonido, es decir, ondas longitudinales.

Respecto al concepto de difracción, introducido por Grimaldi, equivale exactamente al de interferencia y ambos términos se pueden utilizar indistintamente, tal como puntualizó Feynman en sus *Lectures on Physics*. Si se trata de dos fuentes se suele decir que existe interferencia y si el número de fuentes es muy elevado, como en una red, lo solemos llamar difracción.

Hasta el descubrimiento de la difracción por Grimaldi el modelo de corpúsculos propagándose en línea recta (rayos) constituyó la base de la *ciencia normal*, en el campo de la óptica. Esta primera anomalía inicia un periodo durante el cual los científicos se afanaron en encontrar una nueva teoría que explicase los fenómenos *normales* y, además, los de difracción. ¡La óptica ha entrado en crisis!

Newton unos años después, hacia 1666 (aunque lo publicó en 1704), estudió la dispersión de un rayo luminoso al pasar por un prisma. Un rayo de luz solar, limitado por una rendija practicada en las cortinas de su laboratorio se ensanchaba y daba lugar a una banda continua de colores que Newton dividió en siete bandas, los siete colores del arcoíris. Al conjunto de la banda de colores lo llamó *espectro* (**Imagen 14**).

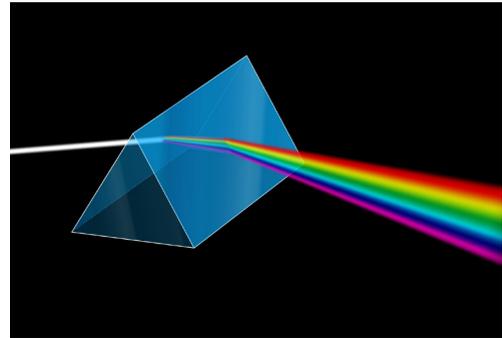


Imagen 14. Representación del espectro de colores obtenido por Newton.

Nosotros podemos repetir este experimento utilizando un proyector de diapositivas que reproduzca la rendija de luz del Sol y reproducirlo de la manera que se ha representado en la ilustración adjunta (**Imagen 15**).

Aunque él no lo sabía, el prisma y la pantalla sobre la que se proyectaba la luz constituían un instrumento nuevo, el espectroscopio, del que hablaremos más adelante.

Pero el hecho de que la luz se dispersase no constituía una anomalía importante para el modelo de rayos, aunque hubo que retocarlo. Puesto que una onda necesita para transmitirse un medio material que *ondule*, y la luz se transmite a través del espacio vacío como se había comprobado utilizando la bomba de Hooke o la cámara del barómetro de Torricelli.

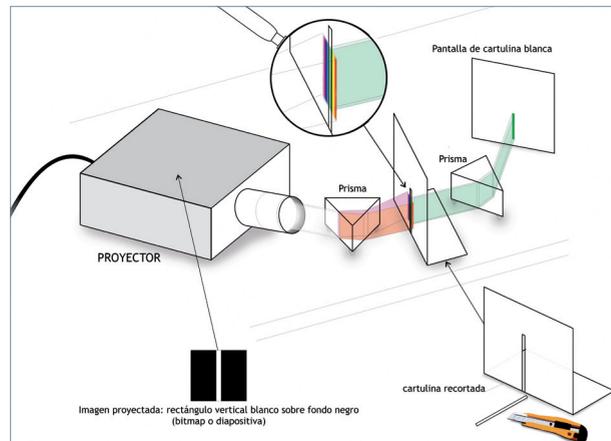


Imagen 15. Reproducción del experimento de Newton.

Newton rechazó el modelo ondulatorio y apoyó el corpuscular. Las partículas pueden transmitirse a través del vacío y viajar desde el Sol hasta la Tierra. Y redefinió el rayo de luz diciendo que estaba compuesto por un chorro de partículas (que luego se llamarían fotones) que se propagaban en línea recta y rebotaban elásticamente en la superficie de un espejo, como una bola de billar rebota en la banda de la mesa. Y para explicar la dispersión por el prisma bastaba admitir que había partículas de todos los colores del espectro, menos blancas. El blanco era la sensación que producían las partículas de los siete colores cuando llegaban a nuestro ojo.

El caso de la refracción era un poco más complicado, pero también se podía explicar con el modelo de partículas suponiendo que la velocidad de propagación de los fotones en los cuerpos transparentes era superior a la velocidad de la luz en el vacío o en el aire. En cambio la teoría ondulatoria requería que la velocidad de propagación de las ondas luminosas en un medio más denso que el aire fuese inferior a la velocidad con se desplazaba en el aire o el vacío.

Por esa razón la medida de la velocidad de la luz en los diferentes medios pasó a ser el *experimentus crucis*, es decir, el experimento que decidiría cual es la senda correcta en el cruce de los dos caminos, el del modelo corpuscular y el ondulatorio.

Y así, debido a la imposibilidad de que una onda material se propague sin un medio y al enorme prestigio de Newton, el modelo ondulatorio tuvo muchas dificultades para abrirse camino en las mentes de los científicos.

Continúan apareciendo anomalías

En 1669 Erasmus Bartholinus descubrió un fenómeno nuevo y espectacular; cuando se colocaba un cristal de espato de Islandia (calcita) sobre un papel con una línea dibujada la imagen de la línea se duplicaba (**Imagen 16**). Y si se giraba el cristal una imagen permanecía fija en tanto que la otra oscilaba en torno a la primera. La doble imagen que se forma se debe a un nuevo fenómeno llamado doble refracción o birrefringencia.

El rayo incidente se divide en dos rayos, uno llamado *ordinario*, que se comporta como lo haría el rayo refractado en cualquier cristal y produce la

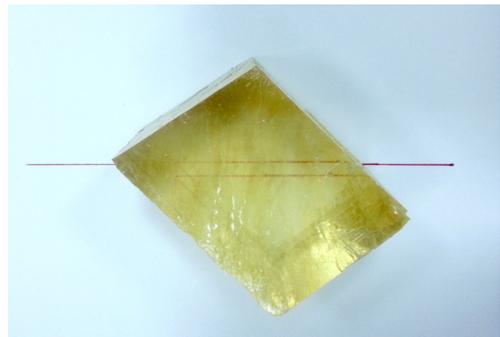


Imagen 16. Birrefringencia en calcita.

imagen inmóvil, y otro que recibe el nombre de *extraordinario*, que es el que cambia al girar el cristal y se mueve respecto al primero.

Para los seguidores de las dos teorías la explicación era la misma; los dos rayos viajaban por el espato con velocidades diferentes, con lo cual el ángulo de refracción era distinto dando lugar a la bi-refracción o birrefringencia. La única diferencia era que para los seguidores de Newton el rayo extraordinario era más rápido que el ordinario y para los partidarios de Huygens ocurría lo contrario. Al no poderse medir la velocidad de la luz en el espato existía razón para admitir una u otra teoría.

Si realizamos el experimento con nuestros alumnos veremos que entre las manipulaciones que llevan a cabo está, como hizo Batholinus, la de superponer dos cristales de espato y girar uno respecto a otro. El resultado de este experimento es difícil de explicar tanto dentro del modelo corpuscular como del modelo de ondas longitudinales, por lo que quedó en el limbo de las anomalías.

Pero, como hemos dicho, una de las ventajas que tenemos en este viaje por la historia de la óptica es que nosotros, al contrario de los que les ocurría a los descubridores, sí sabemos lo que sucede. Los dos rayos están polarizados en direcciones perpendiculares entre sí, propagándose el extraordinario a una velocidad inferior a la del ordinario. Pero para entender lo que hemos dicho hace falta adquirir algunos conceptos nuevos, lo que no se logró hasta la época de Faraday y Maxwell. Y sin esos conceptos es imposible explicar el proceso.

En 1656 tuvo lugar una de las aplicaciones prácticas de la ley del péndulo descubierta por Galileo hacia 1585. Basándose en ella Huygens diseñó un reloj con una precisión suficiente para utilizarse en los estudios astronómicos. Con este reloj se consiguieron mejores observaciones. En 1657 Huygens lo patentó y fue aplicado, casi inmediatamente, por los mejores fabricantes de relojes (sobre todo, en Londres), permitiendo que se pudiese determinar el tiempo por medio de un instrumento situado en el observatorio durante largos periodos de tiempo.

Unos diez años después, hacia 1676, Römer realizó el primer descubrimiento utilizando el reloj de Huygens. Observando el retraso en las apariciones de uno de los satélites de Júpiter (descubiertos por Galileo) determinó que la luz empleaba 22 minutos en recorrer el diámetro de la órbita terrestre (unos 300.000.000 km), de donde dedujo que la velocidad de la luz era del orden de los 270.000 kilómetros por segundo, lo cual es una buena estimación para la época (**Imagen 17**).

La determinación de la velocidad de la luz no inclina la balanza hacia una u otra teoría, aunque ya veremos que tiene importantes implicaciones en lo que se refiere al medio de propagación.

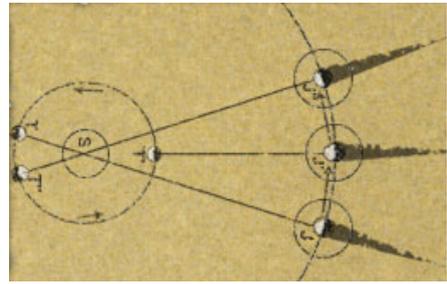


Imagen 17. Retrato de Rømer por Johann Georg Wolfgang (1662-1744). Dibujo de Rømer sobre el eclipse de lo por Júpiter.

Dos años después, en 1678, Huygens publica su modelo en el que presenta la luz como un fenómeno ondulatorio. Para entender el modelo de Huygens es necesario introducir dos conceptos nuevos, el de onda transversal y onda longitudinal, muy fáciles de entender.

Todos estamos habituados a la forma en que se pueden producir ondas transversales en una cuerda haciendo oscilar uno de sus extremos. El desplazamiento transversal se propaga a lo largo de la cuerda sin que haya desplazamiento de materia en esa dirección. Lo que ocurre es que se transmite energía de un extremo a otro de la cuerda, pero sin que exista propagación de materia (**Imagen 18**).

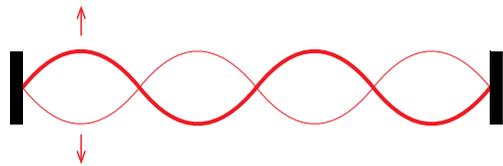


Imagen 18. Onda transversal.

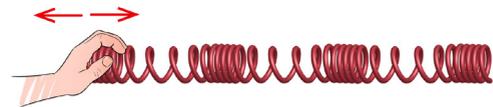


Imagen 19. Onda longitudinal.

Existen otro tipo de ondas, como las que son responsables de la propagación del sonido en el aire. Estas se producen cuando se comprime y se distiende un muelle sujeto por uno de sus extremos. En este caso lo que se propaga es un desplazamiento longitudinal de cada uno de los anillos del muelle y provoca la propagación de zonas de alta y baja presión que llegan sucesivamente al otro extremo del muelle o medio elástico (**Imagen 19**).

Con su modelo ondulatorio Huygens pudo explicar la reflexión y la refracción de la luz, así como el experimento de difracción de Grimaldi. Pero estos fenómenos eran explicables para el caso de ondas longitudinales como para el de ondas transversales, por lo que Huygens no pudo llegar a ninguna conclusión sobre la naturaleza de las ondas luminosas.

Así pues, el modelo ondulatorio explicaba todos los fenómenos conocidos salvo la propagación por el vacío y el modelo corpuscular explicaba la propagación por el vacío, la reflexión y la refracción, pero no podía justificar la difracción por una rendija.

En realidad el experimento de la doble refracción que Bartholinus observó en el espato de Islandia podría haber dilucidado el problema, ya que los dos rayos que aparecen en el cristal corresponden a dos ondas polarizadas, y sólo la ondas transversales pueden polarizarse. Pero ese descubrimiento lo realizó Étienne-Louis Malus hacia 1808, cuando Goya pintaba su Dos de Mayo, y nosotros nos encontramos todavía en 1678.

Así quedaron las cosas hasta 1752, año en el que Thomas Melvill utiliza el método del prisma de Newton para comparar, los colores en que se descompone un rayo de Sol, con los que resultan de la luz emitida por diversos metales cuando se introducen en la llama de un mechero. Para su asombro, cada metal emite una luz característica, en una serie de colores concretos y diferentes unos de otros, pudiéndose utilizar este procedimiento para identificarlos. Pero nadie pudo encontrar la razón. Quedaría para que Bohr y otros físicos del siglo XX elaborasen un modelo cuántico de átomo.

Además, este fenómeno se puede explicar con cualquiera de los dos modelos de luz existentes, por lo que no aportó nuevas pruebas al problema.

En 1801 aparece en escena Thomas Young, diseñando y realizando uno de los más famosos experimentos de la física: el experimento de las dos rendijas. Este experimento no es difícil de realizar en clase. Basta con hacer con una cuchilla dos cortes paralelos en una tarjeta de visita. Los dos cortes deben estar separados medio milímetro aproximadamente. Al iluminar la rendija con un rayo laser, preferiblemente verde o azul sobre la pared aparecerá la figura de interferencia más famosa en óptica (**Imagen 20**).

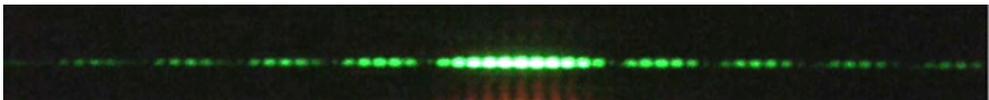


Imagen 20. Figura de interferencia.

La explicación que dio Young con su modelo de ondas es fácil de entender sumando amplitudes de las ondas generadas en cada una de las rendijas e imposible de entender con el modelo de Newton (**Imagen 21**).

Además, utilizando el modelo ondulatorio Young determinó la longitud de onda de la luz, de una manera sencilla. Esta longitud resultó ser del orden de los 500 nanómetros, 0.5 milésimas de milímetro.

Nuestro recorrido termina en 1808, con el experimento de Malus. Etienne-Louise Malus se encontraba en su casa de París observando el palacio de Luxemburgo a través de un cristal de espato de Islandia y se dio cuenta de que en una de las posiciones del cristal la luz reflejada en los vidrios de las ventanas no producía el rayo extraordinario típico de la doble refracción.

Rápidamente intentó explicar el fenómeno comparando las dos teorías y llegó a la conclusión de que la luz reflejada en las ventanas estaba polarizada. Para entender este fenómeno debemos introducir el nuevo concepto de la polarización, que existe únicamente en el caso de ondas transversales.

Si volvemos al ejemplo de la onda transversal producida en una cuerda, podemos distinguir el caso en que la oscilación tiene lugar en un plano bien determinado. Cuando esto ocurre decimos que la onda está polarizada y el plano en el que ocurre esta vibración recibe el nombre de plano de polarización.

Las ondas de luz que nos iluminan no están polarizadas, por lo cual tenemos que admitir que la reflexión de la luz la polariza; Malus determinó que la luz reflejada se encuentra polarizada en el plano paralelo al vidrio (**Imagen 22**).

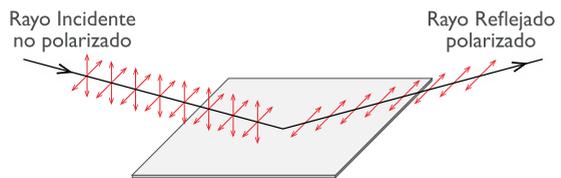
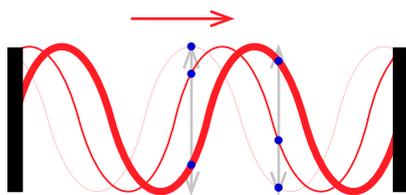


Imagen 22. Onda polarizada. La luz reflejada se comporta como una onda polarizada.

Y así llegó a la conclusión de que el espato divide al rayo incidente en dos rayos polarizados en planos perpendiculares, que corresponden a los rayos ordinario y extraordinario. Ambos rayos tienen diferentes velocidades de propagación y, por lo tanto, diferentes ángulos de refracción.

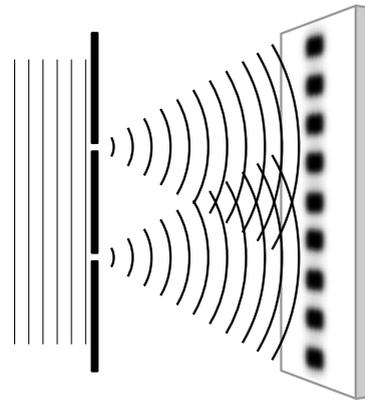


Imagen 21. Interferencia de ondas en el experimento de Young.

Como la luz reflejada en el vidrio de las ventanas del palacio estaban polarizadas previamente, en determinada posición sólo podía existir un rayo, lo que explicaba el fenómeno.

Pero las ondas transversales sólo se pueden conducir por un medio elástico, del que podemos inducir algunas propiedades a partir del conocimiento que tenemos de la propagación en este tipo de medios.

Una onda transversal en una cuerda se produce porque cuando separamos un trozo de su posición de equilibrio aparece una fuerza que tiende a restablecer la posición de reposo. Esta fuerza es de tipo elástico y su magnitud viene dada por el valor del módulo de Young. Cuanto mayor sea el valor de esa fuerza de recuperación mayor es la velocidad de propagación. Basándose en estos datos se llega a la conclusión de que el medio por el que se propaga la luz, al que los científicos de esa época llamaban *éter*, debía tener unas propiedades extraordinarias: tendría que ser un fluido sin viscosidad, transparente, no dispersivo, millones de veces más rígido que el acero pero sin masa. En resumen, una sustancia cuya existencia era difícil de admitir.

Así, si nos ponemos en el lugar de un estudiante de física de principios del siglo XIX, veremos que tendría que utilizar uno u otro modelo dependiendo del tipo de problema que le planteasen, pero seguía sin saber exactamente qué era realmente la luz.

En realidad esa pregunta nunca se ha resuelto y ni siquiera sabemos si debe plantearse dentro del contexto científico. La luz se comporta de una forma o de otra de acuerdo con las circunstancias del experimento. Más adelante vendrían Faraday y Maxwell que descubrirán la naturaleza electromagnética de la luz, sin resolver el enigma de su doble comportamiento.

Conclusiones

El esquema que hemos presentado de la historia de la óptica es, en realidad, una variación muy interesante del modelo de Kuhn de revolución científica, ya que no se produce ningún cambio de modelo como resultado de la crisis. La inconmensurabilidad de las dos teorías era tan pronunciada que resultó imposible sustituirlas por una nueva, por lo cual no se llegó a producir esa sustitución de modelos que es la esencia de las revoluciones científicas y ambas convivieron durante casi tres siglos.

Finalmente Einstein y de Broglie extendieron esta doble naturaleza de corpúsculo y onda a todas las partículas. Una vez comprobada experimentalmente la realidad del doble comportamiento, por medio de experimentos en los que se difractaban electrones, neutrones, protones e incluso átomos pequeños, se aceptó que todas las partículas podían presentar un comportamiento propio de corpúsculo o de onda, dependiendo de las circunstancias.

Esta unificación de los dos esquemas se ha convertido en la esencia del nuevo paradigma científico y la revolución científica de aceptar tan extraño comportamiento ha constituido la auténtica revolución científica de siglo XX, exportada de la óptica a toda la ciencia. Este año el premio Nobel de física se ha concedido por trabajos realizados en óptica cuántica, que es uno de los campos más interesantes de la ciencia. Pero esa es otra historia.

Referencias bibliográficas

MASON, F. STEPHEN. *A history of the Sciences*. Collier books. Toronto. 1962. 638 pp.

Grupo de extensión científica del IMAFF. *La medida del radio terrestre por Eratóstenes*. [En línea]: < <http://museovirtual.csic.es/descargas/archivos/eratostenes.pdf> >.

Grupo de extensión científica del IMAFF. *Sobre los tamaños y distancias del Sol y la Luna*. [En línea]: < <http://museovirtual.csic.es/descargas/archivos/dimension.pdf> >.

SANCHO LÓPEZ, JOSÉ M.ª; MORENO GÓMEZ, ESTEBAN; GÓMEZ DÍAZ, M.ª J. *La naturaleza de la luz*. [En línea]: < <http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz23.htm> >.

SANCHO LÓPEZ, JOSÉ M.ª; MORENO GÓMEZ, ESTEBAN; GÓMEZ DÍAZ, M.ª J. *La medida de la velocidad de la luz*. [En línea]: < <http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz1.htm> >.

Wikimedia Commons: François Lemoyne. *Narciso*. < http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fran%C3%A7ois_Lemoyne_001.jpg > . The Yorck Project.

Wikimedia Commons: Juan Van der Hammen. *Retrato de Francisco de Quevedo y Villegas, Madrid, Instituto Valencia de Don Juan*. < http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Retrato_de_Francisco_de_Quvedo.jpg > . PD-Art, PD-Old.

Wikimedia Commons: *Portrait of Johannes Kepler*. < <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:JKepler.png> > . PD-ART.

Wikimedia Commons: Jacob Coning. *Portrait of the Danish astronomer Ole Rømer*. < http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ole_Rømer.jpg > . Frederiksborg Museum.