

es la porción de camino que el rayo reflejado en G debe recorrer más que el reflejado en D para llegar á su punto de reunión; luego, cuando hayan llegado, habrán recorrido en suma la misma longitud de camino, y por consiguiente vibrarán en él de acuerdo (1).

“Pero no sucede así cuando la dirección de los rayos elementales  $Gk$  y  $Dl$ , que supongo concurren también en un punto infinitamente remoto, forma con la superficie un ángulo que no es igual á  $EDA$ ; porque no siendo tampoco igual á  $ID$  el intervalo

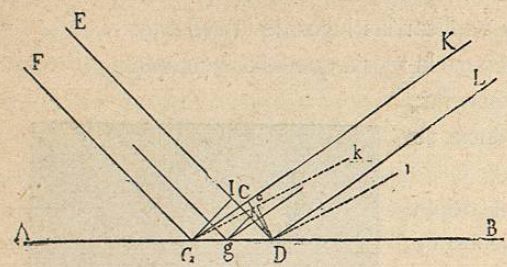


Fig. 555.—Teoría de la reflexión en el sistema de las ondas

$Gc$ , comprendido entre el punto G y el pie de la perpendicular  $Dc$ , los caminos recorridos por los rayos para llegar al punto de reunión serán asimismo desiguales y sus vibraciones en este punto más ó menos discordantes. Ahora bien, siempre se puede tomar el punto G á tal distancia del punto D que la diferencia entre  $Gc$  é  $ID$  sea igual á una semiondulación, lo cual establecerá una discordancia completa, en el punto de concurso, entre las vibraciones

reflejadas en  $Gk$  y  $Dl$ ; y como por otra parte éstas tienen intensidades iguales, se destruirán mutuamente, no habiendo por lo tanto luz propagada en esta dirección.

Los mismos principios sirven para explicar las leyes de la refracción, es decir, de la dirección que deben seguir las ondas luminosas cuando llegan á la superficie de separación AB (fig. 556) de dos medios en los cuales no se propaga la luz con la misma velocidad. Considerando dos rayos incidentes paralelos FG, ED, que llegan simultáneamente á G y á I, se ve que el segundo

tendrá que recorrer más que el otro el camino ID para llegar á la superficie. Tomando ahora los dos rayos refractados paralelos GK, DL, que parten de los mismos puntos G y D de la superficie, claro está que para llegar simultáneamente y de acuerdo á su punto de reunión (supuesto en el infinito), el primero tendrá que recorrer más que el segundo el camino GM. Si, pues, los caminos  $GM$  é  $IG$  se hallan precisamente entre sí en la misma relación que las velocidades de la luz en el segundo y en el primer medio, los dos rayos

llegarán uno á M y otro á D al mismo tiempo, y los dos rayos refractados GK y DL continuarán perfectamente acordes durante toda su marcha y así llegarán al punto de reunión. La misma condición llenarán sin duda todos los demás rayos elementales

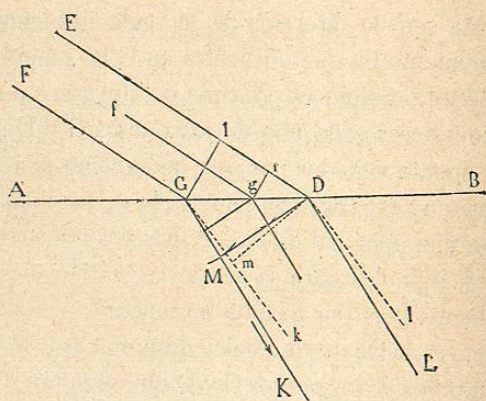


Fig. 556.—Teoría de la refracción

(1) También puede decirse que todos los rayos del haz comprendidos entre FG y ED, después de haber tocado los diferentes puntos de la superficie reflectora de G á D, llegarán á la vez á la recta D que será la envolvente de todas las ondas elementales y formará la onda reflejada. En este punto se detenía la demostración de Huygens; faltaba demostrar, como lo hizo Fresnel, que todos los rayos reflejados en otras direcciones se destruyen por interferencia, y que por lo tanto no hay luz perceptible sino siguiendo la dirección que da la ley de la reflexión. La misma observación podrá aplicarse más adelante á la demostración de la refracción.

emanados de los diversos puntos de la superficie AB que concurren en el mismo punto; sus ondulaciones se sobrepondrán exactamente y se agregarán unas á otras.

Así pues, los rayos que hayan penetrado en el segundo medio siguiendo una dirección tal que las perpendiculares ID, GM se hallen en la misma relación que las velocidades de la luz en los dos medios, producirán luz por efecto de su reunión. Ahora bien, ID es el seno del ángulo de reflexión, GM lo es del de refracción, y se ve que su relación es constante en la teoría de las ondas: es la misma ley de la refracción según resulta de la observación.

En esto también va Fresnel más adelante de lo que iba Huygens, pues no se limita á demostrar que la onda incidente y la refractada tienen direcciones angulares cuyos senos varían en relación constante, sino que, basándose en el principio de las interferencias, hace ver que dos rayos como  $Gk$  y  $Dl$  no estarán ya de acuerdo cuando siguen otra dirección cualquiera, pues cuando el uno parte del punto D, el otro no ha llegado todavía á  $m$ , hay discordancia, y como siempre se puede tomar dos rayos inmediatos de tal género que su diferencia de marcha sea una semiondulación, resulta necesariamente que ambos interfieren y se destruyen y que no hay ya luz propagada en su dirección.

Así pues, la teoría de las ondas da perfectamente cuenta de las leyes de la reflexión y de la refracción sin necesidad de que intervenga más hipótesis que la de la constitución misma de las ondulaciones que suscitan en el seno de un medio eminentemente elástico las vibraciones periódicas de las moléculas de los focos luminosos.

Este es el momento oportuno para insistir en un punto capital que establece una radical diferencia entre la teoría de la emisión y la de las ondas. Al explicar Newton la refracción diciendo que consistía en una atracción que los medios densos ejercen sobre las moléculas de la luz, se vió obligado á admitir que la velocidad de propagación de la luz es mayor en dichos medios, y por consiguiente en el agua debería ser dicha propagación más rápida que en el aire. En la teoría de las ondulaciones es enteramente contraria, como acabamos de ver. Refiriéndonos á la figura 556, las líneas ID y GM, que representan los senos de los ángulos de incidencia y de refracción, expresan también las velocidades relativas de la luz en el primero y en el segundo medio. Pues bien, si este último es el más refringente, por ejemplo, si los rayos refractados se aproximan á la perpendicular, es evidente que GM es menor que ID; en otros términos, que la luz se propaga con menos velocidad en el medio más refringente.

La experiencia se ha pronunciado por este punto decisivo. Ya hemos hecho mención de los resultados obtenidos separadamente por Foucault y por Fizeau y que prueban que la velocidad de la luz en el agua es menor que en el aire.

Así pues, la teoría de la emisión está por este concepto en abierta contradicción con la práctica. Más adelante encontraremos otro testimonio de la impotencia de esta teoría para explicar ciertos fenómenos que la teoría de las ondas explica en cambio victoriosamente.



## CAPITULO XIII

## DOBLE REFRACCIÓN DE LA LUZ

## I

## FENÓMENOS DE DOBLE REFRACCIÓN EN LOS CRISTALES DE UN EJE

Examinando Erasmo Bartholin, sabio médico danés que vivía en Copenhague á mediados del siglo XVII, ciertos cristales que un amigo suyo le había llevado de Islandia, se quedó muy sorprendido al ver que los objetos parecían duplicados cuando se los observaba al través de ellos. En 1669 advirtió tan singular fenómeno y describió en una Memoria especial todas sus circunstancias. Veinte años después, Huygens se dedicaba de nuevo al estudio de lo que luego se ha llamado *doble refracción*, formulaba sus leyes, y establecía su teoría con arreglo á los principios del sistema de las ondulaciones, cuyos primeros cimientos había echado aquel grande hombre.

Desde el descubrimiento de Bartholin y las observaciones de Huygens (que reconoció la misma propiedad en el cuarzo) se han estudiado en todas sus fases los fenómenos de igual índole, formando hoy su conjunto toda una rama de la óptica. Antes de describir los principales, recordemos lo que ocurre cuando cae un haz de luz sobre la superficie de un medio transparente como el agua ó el vidrio.

Al llegar á la superficie, una parte del haz luminoso se refleja con regularidad, de modo que da una imagen del objeto del que emana, y otra porción se refleja irregularmente en todos sentidos. Esto en cuanto á la luz que vuelve sobre su paso, ó si se quiere, que cambia de curso sin cambiar de medio. La otra parte del rayo de luz penetra en la substancia transparente, en la que se propaga sin variar de dirección si la incidencia es normal, ó donde se refracta, es decir, se desvía, si el rayo cae oblicuamente sobre la superficie. Pero en ambos casos el rayo continúa siendo simple, y lo es también cuando sale del medio transparente, de suerte que el ojo que lo recibe ve una sola imagen del foco luminoso. A pesar de esto, no siempre sucede todo del modo descrito. Hay substancias á través de las cuales procede un rayo de otra manera, pues se duplica y presenta, como Bartholin lo indicó por vez primera, dos imágenes del objeto en vez de una sola.

En los filones, en las calizas metamórficas y en las arcillas compactas se encuentra un mineral que cristaliza en romboedros sólidos de seis caras paralelógramas, muy transparente, incoloro, y cuya composición química le da á conocer como carbonato de cal con algunas partes de protóxido de manganeso. Los ejemplares más hermosos, que á veces tienen hasta diez centímetros de espesor, proceden de Islandia, por cuya razón se conoce el mineral de que hablamos con el nombre de *cristal ó espato de Islandia* (fig. 557).

Los cristales de esta clase se exfolian con la mayor facilidad en todas sus caras, de suerte que se les puede dar una forma rigurosamente geométrica, más cómoda para el

estudio de sus propiedades ópticas, y entonces el romboedro se compone de seis rombos iguales entre sí.

Cada uno de estos rombos tiene dos ángulos obtusos de  $101^{\circ} 55'$  y dos agudos de  $78^{\circ} 5'$ . Seis de los ocho ángulos sólidos que forman los vértices del cristal se componen de otro ángulo obtuso y de dos agudos: los otros dos, de tres obtusos. Supongamos que se enlacen estos últimos con una recta; esta diagonal del romboedro es de gran importancia por lo que respecta á los fenómenos de que vamos á ocuparnos, y se llama *eje óptico* del cristal por la causa que muy en breve veremos (1).

Describamos ahora los fenómenos de doble refracción, conforme se los puede observar fácilmente con un trozo de espato de Islandia. Cojamos un pedazo de este cristal, pongámosle sobre una línea escrita ó impresa, y mirando á través de él seremos testigos del fenómeno que tanto llamó la atención de Bartholin: cada letra se habrá duplicado. Notemos además que cada imagen aislada es menos negra que la letra misma; que ha tomado un color ceniciento, y

que lo que prueba que esto no depende de la absorción de la luz por el cristal es que dicho color se presenta negro allí donde están superpuestas las dos imágenes. Hasta las aristas del cristal vistas por refracción parecen dobles, y una línea trazada en el papel se divide en otras dos paralelas. Dirijamos un haz de luz solar sobre una de las caras; el rayo luminoso sale duplicado y forma en una pantalla dos imágenes diferentes, cuya distancia depende de la inclinación del rayo incidente sobre la cara del cristal.

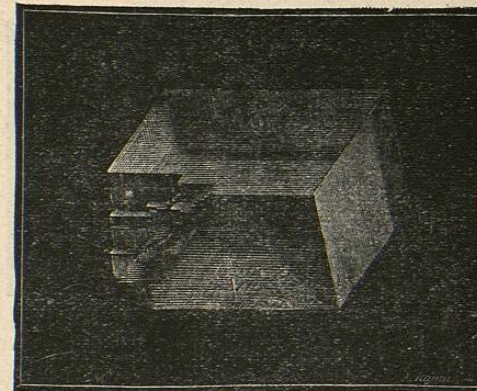


Fig. 557.—Fragmento de espato de Islandia

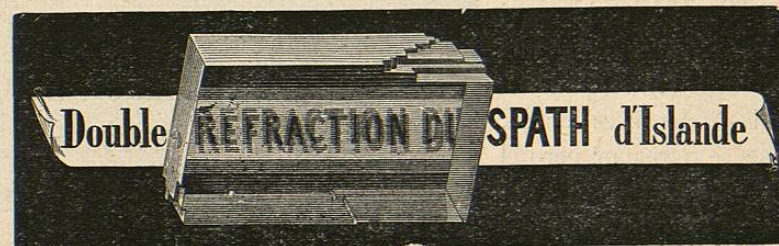


Fig. 558.—Imágenes dobles de objetos vistos al través de un cristal de espato de Islandia

Prosigamos adelante en el análisis del fenómeno, y para ello simplifiquemos el experimento, es decir, no examinemos más que un punto á la vez. Este punto, visto al través del cristal, parece doble. Demos al cristal una vuelta sobre sí mismo en sentido paralelo á las caras de incidencia y de emergencia. ¿Qué veremos entonces?

Una de las imágenes gira alrededor de la otra, y cuando el cristal ha descrito una

(1) No se debe considerar el eje óptico como una línea única. En un cristal hay tantos ejes que gozan de esta misma propiedad como líneas paralelas á la dirección de la diagonal del romboedro. En otros términos, aquí *eje* es sinónimo de dirección, y si se dice del espato de Islandia que es un *cristal de un eje*, consiste en que sólo hay una dirección respecto de la cual sea exacta la definición anterior.