

## 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

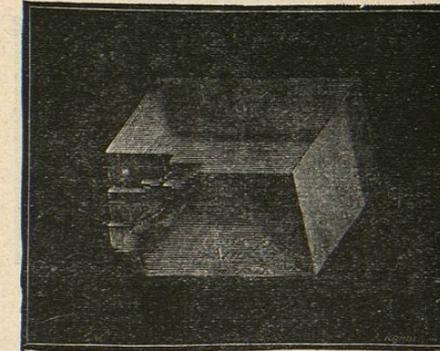


Fig. 557.—Fragmento de espato de Islandia

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.

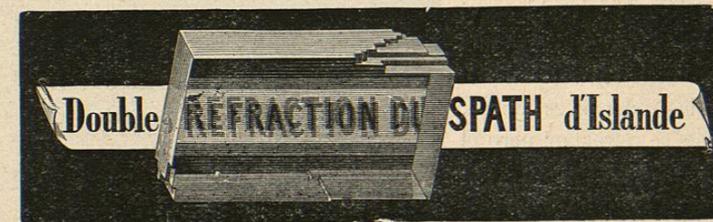


Fig. 558.—Imágenes dobles de objetos vistos al través de un cristal de espato de Islandia

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.

circunferencia entera, la imagen vuelve á colocarse en su posición primitiva, después de describir un círculo alrededor de la otra imagen inmóvil.

Cuando en vez de observar un punto se observa una línea recta, se advierte que, en dos posiciones diferentes del cristal, una de las líneas, que parece moverse paralelamente á la otra, llega á una desviación máxima; y que en otras dos posiciones, las imágenes parecen coincidir, coincidencia que es tan sólo aparente, porque si se ha marcado un punto en la línea observada, se ve la doble imagen de este punto, aun cuando

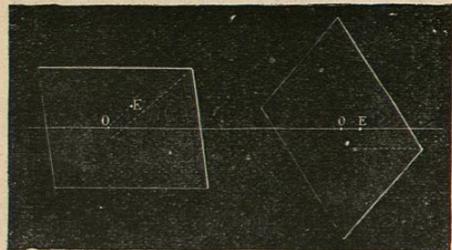


Fig. 559.—Posiciones de la imagen extraordinaria con respecto al plano de incidencia. Sección principal

las imágenes paralelas de las líneas estén superpuestas. En este caso, como en el precedente, se verifica la rotación de una de las imágenes alrededor de la otra. Digamos desde luego que se da el nombre de imagen *ordinaria* á la imagen inmóvil, y el de imagen *extraordinaria* á la que ejecuta su rotación alrededor de la primera. La razón de esto está en que el rayo refractado que produce la imagen inmóvil sigue en su camino las leyes de la refracción simple, tales cuales las han formulado Snelio y Descartes, al paso que el otro rayo no obedece á las mismas leyes (1). Esta diferencia característica de las dos imágenes se puede poner en evidencia de muchos modos. Hágase llegar un rayo de luz perpendicularmente á una de las caras del cristal, y se bifurcará al penetrar en el interior; pero uno de los rayos seguirá la dirección del incidente y tampoco se refractará á su emergencia: este es el rayo ordinario, el que obedece á la ley de Descartes. El otro rayo se desviará de la dirección del incidente, á su entrada en el cristal y á su salida; es el rayo que producirá la imagen extraordinaria.

Cuando la incidencia es oblicua, los dos rayos se refractan; pero el ordinario se desvía también, cualquiera que sea la posición del cristal, con tal que las caras de incidencia y de emergencia conserven una dirección paralela á la primitiva; en una palabra, su curso es el que seguiría al través de un pedazo de cristal de caras paralelas. No sucede lo propio con el otro rayo, con el que motiva la imagen extraordinaria, puesto que, según hemos visto, esta imagen gira alrededor de la primera, si se da vueltas al cristal paralelamente á sí mismo.

En este movimiento de la imagen extraordinaria ocurre una circunstancia que conviene notar. Puesto el cristal sobre una hoja de papel en la cual se haya marcado un

(1) En una palabra, por una parte, el rayo refractado extraordinariamente no se halla por lo común en el plano de incidencia; y por otra, la relación de los senos de los ángulos de incidencia y de refracción no permanece constante.

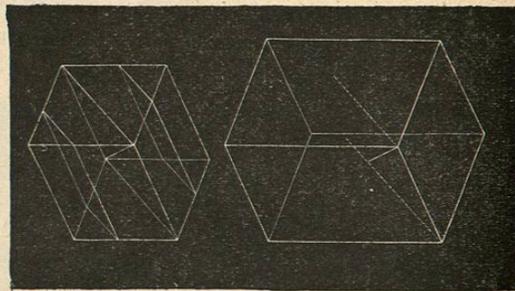


Fig. 560.—Secciones principales y eje óptico del espato de Islandia

punto, supongamos el ojo colocado en el plano de incidencia. El rayo refractado ordinario estará también en este plano, como lo indica la ley de simple refracción, y la imagen ordinaria O del punto se hallará en la línea II del plano de incidencia con el papel (fig. 559). Pero no sucederá así con la imagen extraordinaria E, y la línea que reúne las dos imágenes formará un ángulo con la II mencionada. Pero se observa que dicha línea OE continúa siempre paralela, durante el movimiento de rotación del cristal, á la bisectriz AD del ángulo obtuso de la cara paralela al plano del papel. Así es que cuando, á causa de dichos movimientos, la bisectriz se ha colocado paralelamente á II, la imagen extraordinaria misma se halla en esta línea, y los dos rayos refractados en el plano de incidencia.

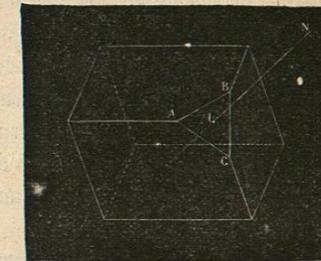


Fig. 561.—Sección artificial perpendicular al eje óptico

Así pues, entre las secciones que cortan el cristal perpendicularmente á una de sus caras, hay otra sección tal, que si el rayo incidente está contenido en ella, el extraordinario obedecerá á la primera ley de simple refracción, exactamente como el otro rayo. Dase á este plano el nombre de *sección principal*. Todo plano perpendicular á una de las caras del espato de Islandia, y paralelo á la pequeña diagonal del rombo, ó á la bisectriz del ángulo obtuso, es una sección principal de esta cara.

Toda sección principal es paralela al eje óptico, y esta condición basta; de suerte que si se cortase una cara artificial en el cristal, cualquier plano trazado perpendicularmente á esta cara y paralelo al eje óptico sería también una sección principal de la cara artificial. Por último, si se corta una cara artificial ABC (fig. 561) perpendicular al eje óptico NI, todo rayo que caiga en ella estará forzosamente en una sección principal, y los dos rayos refractados en el plano de incidencia. En este caso, la observación hace ver que, si el rayo incidente es normal á la cara artificial, no hay más que un rayo refractado. Tenemos, pues, una dirección en la cual desaparece el fenómeno de la bifurcación, no

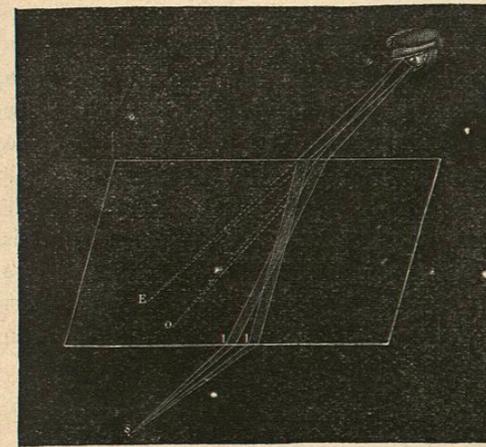


Fig. 562.—Cruzamiento de los haces luminosos que producen la imagen ordinaria y la extraordinaria

ocurriendo tampoco la doble refracción cuando el rayo incidente cae paralelamente al eje óptico.

Monge ha hecho un experimento singular, de muy fácil reproducción y que demuestra cuál es la marcha seguida en el cristal por los haces emanados de un punto luminoso para producir las dos imágenes ordinaria y extraordinaria del punto. Examinando la doble imagen de un punto S (fig. 562), situado á alguna distancia de la cara inferior, y pasando por debajo de esta cara una cartulina opaca *ab*, reconoció con sorpresa que la

imagen más distante de la cartulina es la primera que desaparece. He aquí cómo se explica este fenómeno. Un haz luminoso incidente SI se bifurca y da dos haces refractados, y por lo tanto produce, á la salida de la cara paralela, dos haces emergentes que divergen, y uno solo de los cuales puede penetrar en el ojo: supongamos que éste sea el que produce la imagen ordinaria O. Otro haz incidente, inmediato al primero, dará también dos haces emergentes, uno de los cuales penetrará en el ojo y producirá la imagen extraordinaria E. Como las caras del cristal son paralelas, cada haz emergente se compone de rayos paralelos á los del rayo incidente. Por consiguiente, puesto que los que producen las imágenes van á encontrarse en el ojo, es preciso que los haces refractados correspondientes se crucen en el cristal.

Así se explica el experimento de Monge; la cartulina empieza por interceptar el haz que produce la imagen más distante, y por lo tanto esta imagen, es decir, la extraordinaria E es naturalmente la primera que debe desaparecer.

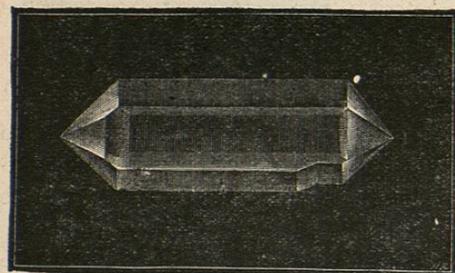


Fig. 563.—Cristal de roca

Tales son las circunstancias más notables que constituyen el fenómeno de la doble refracción. Las leyes que rigen este fenómeno son demasiado complejas para que podamos explicarlas en una obra tan elemental como el MUNDO FÍSICO; pero trataremos de dar en breves líneas una idea de la diferencia que existe entre la simple y la doble refracción.

Hemos dicho ya que el haz ordinario sigue las dos leyes de Descartes; es decir, que el rayo refractado está siempre en el plano de incidencia, y que si se hace variar el ángulo de incidencia, la relación que existe entre su seno y el del ángulo de refracción es siempre constante. El haz extraordinario no sigue la primera de estas leyes sino cuando el rayo incidente está en una sección principal. Tampoco sigue en modo alguno la segunda, de suerte que la relación de los senos, lo que se llama índice de refracción, varía según el ángulo que el rayo incidente forma con el eje óptico del cristal. Si este ángulo es nulo, ó si el haz incidente es paralelo al eje óptico, la doble refracción desaparecerá en estos casos solamente; una de las imágenes se confunde con la otra, habiendo igualdad entre los índices ordinario y extraordinario de refracción. Cuanto mayor es el ángulo, más va creciendo la desigualdad de estos índices, llegando á su máximo cuando el haz incidente tiene una dirección perpendicular al eje óptico.

En el espato de Islandia, único cristal dotado de la doble refracción que hemos examinado hasta aquí, el índice de refracción del rayo ordinario es mayor que el del rayo extraordinario. Lo contrario acontece si se consideran ciertas substancias birrefringentes, por ejemplo el cristal de roca. ¿De qué dimana esta diferencia? Para exponer su causa, sería preciso desarrollar la teoría entera de la refracción simple y doble en el sistema de las ondulaciones; demostrar que la refracción tiene por origen la diferencia de velocidad que experimentan las ondas de éter al pasar de un medio á otro más refringente; que el rayo ordinario procede como si se moviese en un medio homogéneo no cristalizado, al paso que el extraordinario se propaga con más ó menos facilidad según que se mueva en esta ó en la otra dirección relativamente á la orien-

tación de las moléculas cristalinas. En el espato de Islandia, el rayo extraordinario es el dotado de mayor velocidad, sucediendo lo contrario en el cristal de roca.

De aquí proceden los nombres de cristales *positivos* y cristales *negativos* dados á las substancias dotadas de doble refracción, según que se las clasifique en la una ó en la otra categoría, teniendo las primeras por tipo el cristal de roca, y las segundas el espato de Islandia.

La turmalina, el rubí y la esmeralda son cristales negativos; el cuarzo—nombre mineralógico del cristal de roca,—el sulfato de potasa y de hierro, el hiposulfato de cal y el hielo figuran en el número de los cristales positivos.

## II

### DOBLE REFRACCIÓN EN LOS CRISTALES DE DOS EJES

Prodúcese también la doble refracción en toda una clase de substancias cristalinas, designadas con el nombre de *cristales de dos ejes*. El topacio, la aragonita, el sulfato de cal, el talco, el feldespato, la perla y el azúcar son cristales de dos ejes: en cada cristal de esta clase hay dos direcciones distintas por las cuales pasa el rayo sin bifurcarse; estas dos direcciones son los *ejes ópticos* del cristal. Pero hay una diferencia esencial entre los fenómenos de doble refracción en los cristales de un eje y los de los cristales de dos ejes. En los primeros, uno de los dos rayos refractados sigue las leyes de la refracción simple; en los segundos, los dos rayos son extraordinarios: ninguno de ellos sigue la ley de Descartes. Un experimento de Fresnel lo demuestra así sencillamente. Se divide un topacio en muchos fragmentos, cada uno de éstos con la forma de láminas de caras paralelas, pero tallados en diferentes sentidos; y después de pegar dichos fragmentos por sus caras planas, se da al conjunto la forma de un paralelepípedo. Mirando entonces al través de él una línea recta paralela á la arista refringente, se ven dos imágenes de la línea, cada una de las cuales es una mixta cuyas diversas partes corresponden á los fragmentos del topacio; ahora bien, si uno de los sistemas de rayos refractados siguiese las leyes de Descartes, la imagen que resultaría sería una línea recta, porque la dirección de los rayos en el prisma sería entonces independiente de la dirección de los ejes ópticos en cada pedazo de los que le componen. La experiencia prueba, pues, que los dos rayos son extraordinarios. En breve veremos (artículo III del capítulo XIV) otro medio de distinguir los cristales de uno y de dos ejes.

Terminemos lo que teníamos que decir acerca de la doble refracción, enumerando los medios refringentes en que no se presenta esta clase de fenómenos, ó que están dotados de la refracción simple. Estos medios son ante todo los gases, los vapores y los líquidos: y entre las substancias que han pasado del estado líquido al sólido, aquellas cuyas moléculas no han adquirido una estructura cristalina regular, como, por ejemplo, el cristal, la cola, la goma y las resinas; por último, los cristales cuya forma primitiva es el cubo, el octaedro regular y el dodecaedro romboidal. Debemos añadir que los cuerpos pertenecientes á estas dos últimas categorías pueden adquirir la propiedad de la refracción doble cuando se los somete á compresiones ó á dilataciones violentas, ó bien cuando se calientan desigualmente sus diferentes partes.

Ciertos sólidos pertenecientes al reino vegetal ó al reino animal, como el asta, la pluma y el nácar, están también dotados de doble refracción.