

oscuras, y por último dos series de espectros superpuestos cada vez más extendidos y más bajos de color. Una red de mallas cuadradas da, además de la línea brillante central y de dos series de espectros más extendidos que los de la red de mallas paralelas, una multitud de pequeños espectros en los cuatro ángulos irradiando hacia el centro. Newton había adivinado la identidad de los fenómenos de difracción por las aberturas pequeñas, como se desprende del siguiente párrafo de su *Optica*: "Mirando el sol á través de una pluma ó de una cinta negra puesta muy cerca del ojo, se verán muchos arcos iris, porque las sombras que las fibras ó los hilos proyectan en la retina tienen en sus contornos idénticas franjas de colores.", También se observan franjas de esta clase mirando la luz de una bujía con los ojos entornados, pues al juntarse las pestañas forman las mallas de una red irregular.

Los físicos apelan á la interferencia de los rayos luminosos para explicar los brillantes colores que se notan en ciertos cuerpos cuya superficie está cubierta de una multitud de finísimas estriás; las plumas de algunas aves, la superficie del nácar se componen de gran número de rayas que reflejan todos los colores del prisma. Habiendo tenido Bréwster ocasión de adherir un trozo de nácar á un goniómetro con una mezcla de resina y cera, quedóse sorprendido al ver que la superficie de la cera brillaba con los colores prismáticos del nácar; repitió el experimento con varias sustancias, como arsénico rojo, metal fusible, plomo, estaño y cola de pescado, y siempre vió aparecer los mismos colores. El inglés John Barton tuvo la idea de aplicar á otros cuerpos esta propiedad de las superficies estriadas, y al efecto talló en facetas

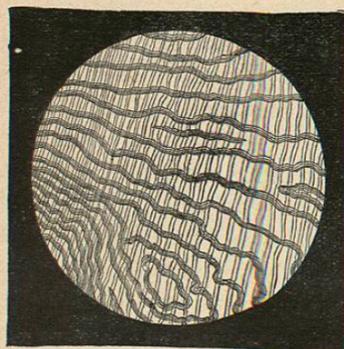


Fig. 550.—Estrías del nácar de la perla vistas con el microscopio

muy finas botones de acero y varios dijes que á la luz del sol, de las bujías ó del gas, presentaban dibujos que brillaban con todos los matices del prisma. "Los destellos del diamante, dice Bréwster, apenas ofuscan el brillo de estos colores.",

Véase ahora otro caso de observación que parece tener conexión con los fenómenos de interferencia, según lo ha explicado Babinet.

"Para disfrutar de la vista de este fenómeno, dice A. Nécker al describirlo, es preciso situarse al pie de una colina interpuesta entre el observador y el sitio por donde el Sol sale ó se pone. De este modo se está enteramente á la sombra; el borde superior de la colina ó montaña está cubierta de bosque ó de árboles ó malezas sueltas, que proyectan sus oscuros contornos sobre un cielo perfectamente claro y brillante, excepto por el sitio mismo por donde el Sol está á punto de asomar ó acaba de desaparecer. Allí todos los árboles y matorrales que orlan la cúspide parecen de viva y nítida blancura, y brillan con extraordinario esplendor, por más que se destaquen sobre un fondo tan luminoso y brillante como lo está siempre la parte del cielo inmediata al Sol. Los menores detalles de las hojas y de las ramitas se ostentan en toda su delicadeza, pareciendo los árboles y los bosques hechos de purísima plata con todo el arte del más hábil operario. Las golondrinas y demás aves que cruzan volando esta misma región semejan chispas de deslumbradora blancura.",

Vese, pues, que, para el que sabe observar, la Naturaleza tiene una magnificencia con la que ni remotamente puede competir la habilidad de los experimentadores más inge-

niosos. Lo que constituye el mérito del sabio no consiste precisamente en reproducirla, en multiplicar los fenómenos cuyo conjunto nos ofrece la Naturaleza, sino en descubrir las causas de las cosas, las leyes de sus manifestaciones, á fuerza de paciencia, de sagacidad y de genio. Bajo este punto de vista, la historia de la física es indudablemente uno de los más bellos títulos de gloria del humano espíritu.

## IV

## ANILLOS DE COLORES DE LAS LÁMINAS TENUES

Los fenómenos más brillantes y maravillosos no son siempre los que requieren aparatos costosísimos y complicados para su reproducción, ni tampoco mucho aparato y preparativos. ¿Quién no se habrá entretenido cuando niño en hacer y despedir al aire, con un poco de agua de jabón y una pluma ó una paja, esas leves burbujas de forma tan bonita y tan pura, y de tan varios y delicados colores?

Al principio, cuando la esfera líquida sólo tiene escaso diámetro, la película que limita sus contornos es incolora y transparente. Mas, poco á poco, el aire que se insufla en su interior comprime por igual todas las partes de la superficie cóncava y agranda el diámetro á expensas del espesor; entonces comienza á aparecer una serie de colores, tenues al principio y luego más vivos, que nacen unos á continuación de otros y que forman con su mezcla una porción de tintas irisadas, hasta el momento en que la burbuja, disminuyendo de espesor, no ofrece ya bastante resistencia á la acción del gas que contiene. Entonces se presentan en el vértice algunas manchas negras, y poco después la pompa revienta.

Este experimento tan sencillo, este juego infantil, que ofrece tantos atractivos á los ojos del artista aficionado á los colores, no es menos ameno é interesante á los del sabio. Newton le consagró largo estudio y meditaciones, y desde aquel grande hombre los colores de la pompa de jabón ocupan un puesto legítimo entre los más curiosos fenómenos de óptica. A decir verdad, no pasa de ser un caso particular de toda la serie de fenómenos que se observan siempre que la luz se refleja y refracta sucesivamente en las superficies que limitan las láminas tenues de los cuerpos transparentes. Los sólidos, los líquidos y los gases son también á propósito para esta clase de experimentos. Los cristales que se exfolian en hojas sumamente tenues, como la mica, el yeso, el talco, el vidrio soplado en esfera muy delgada, la superficie del acero recocido, cubierta de una capa de óxido, presentan colores irisados enteramente iguales á los de la pompa de jabón. Los vivos matices que adornan las alas membranosas de las libélulas, los que se notan en los fragmentos de vidrio expuestos largo tiempo á la humedad y en la superficie de las aguas grasientas, pertenecen á la misma serie de fenómenos, que se estudian en física bajo la denominación común de *anillos de colores de las láminas tenues*.

Antes de decir cuál es la causa de esta descomposición de la luz en sus colores simples, procuraremos dar una idea de las condiciones en que ocurre, y de las leyes que rigen para la sucesión de estos matices, tan cambiantes y movibles á primera vista.

Sigamos á Newton en sus memorables experimentos. El punto de partida del gran físico fué la observación siguiente:

"Habiendo comprimido fuertemente, dice en su *Optica*, dos prismas uno contra otro, para lograr que sus lados (que por casualidad eran un tanto convexos) se tocaban mutuamente, vi que el sitio por donde se tocaban se volvía de pronto transparente

como si en aquel sitio hubiesen formado una sola pieza de vidrio. Porque, cuando la luz caía sobre el aire comprendido entre los dos prismas tan oblicuamente que se reflejaba en su totalidad, parecía que en el punto de contacto se transmitía enteramente. Mirando con atención dicho punto, se veía á modo de una mancha negra y oscura, parecida á un agujero á través del cual aparecían distintamente los objetos colocados al otro lado.,,

Newton hizo girar los prismas alrededor de su eje común, y vió aparecer poco á poco en torno de la mancha transparente una serie de anillos alternativamente brillantes y oscuros, colorados de diferentes matices. Para darse mejor cuenta del modo cómo se producían estos anillos, empleó dos cristales, uno plano y otro convexo en sus dos caras (fig. 551), ambos de un gran radio de curvatura. Luego los aplicó uno contra otro, la cara convexa contra la plana, apretándolos suavemente: en esta posición los dos cristales dejaban entre sí, alrededor del

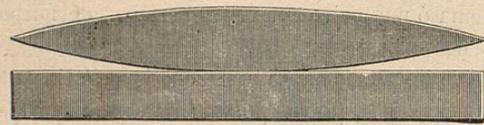


Fig. 551.—Lámina tenue comprimida entre dos cristales uno plano y otro convexo. Experimento de los anillos colorados de Newton.

Newton hizo girar los prismas alrededor de su eje común, y vió aparecer poco á poco en torno de la mancha transparente una serie de anillos alternativamente brillantes y oscuros, colorados de diferentes matices. Para darse mejor cuenta del modo cómo se producían estos anillos, empleó dos cristales, uno plano y otro convexo en sus dos caras (fig. 551), ambos de un gran radio de curvatura. Luego los aplicó uno contra otro, la cara convexa contra la plana, apretándolos suavemente: en esta posición los dos cristales dejaban entre sí, alrededor del punto central de contacto, un menisco muy delgado, una capa de aire, cuyo espesor, nulo al principio, iba creciendo insensiblemente. He aquí los fenómenos que observó:

Recibiendo la luz reflejada en una dirección casi normal á la superficie plana de la capa de aire, vió que se formaba alrededor del punto de contacto una serie de anillos de varios colores, concéntricos y cada vez más apiñados á medida que se alejaban del centro. Cada color aparecía al principio como un círculo de tinta uniforme que se ensanchaba por la presión hasta que, saliendo del centro un nuevo color, transformaba el primero en un anillo de colores. En el centro mismo apareció en último término una mancha oscura.

Véase ahora el orden y los colores de dichos anillos, representados en la figura 552. Los colores están indicados á partir del centro O.

- De O á A negro, azul, blanco, amarillo, rojo;
- A—B morado, azul, verde, amarillo, rojo;
- B—C púrpura, azul, verde, amarillo, rojo;
- C—D verde, rojo;
- D—E azul-verdoso, rojo,
- E—F azul-verdoso, rojo claro;
- F—G azul-verdoso, blanco-rojizo.

Si en lugar de recibir la luz reflejada en las dos superficies de la lámina tenue, se mira al través de los dos vidrios la luz del cielo, vese también una serie de anillos de colores, aunque más desvaídos que los de los anillos vistos por reflexión. Además, el orden de los colores es enteramente distinto, y en lugar de una mancha negra en el centro aparece una blanca. He aquí la serie de las tintas que forman los anillos vistos por transmisión:

- Blanco, rojo-amarillo, negro, morado, azul;
- Blanco, amarillo-rojo, morado, azul;
- Verde, amarillo-rojo, verde-azul, rojo;
- Verde-azulado;
- Rojo, verde-azulado,
- Rojo.

Comparando esta segunda serie con la primera, se ve que las tintas que ocupan el mismo orden en los dos sistemas de anillos son precisamente complementarias, de suerte que la luz transmitida y la luz reflejada en un mismo punto de la capa de aire dan reunidas luz blanca. Esta consecuencia de los dos experimentos ha sido comprobada por Young y Arago, quienes, habiendo colocado los dos cristales de modo que las luces reflejadas y transmitidas llegasen al ojo á la vez y con la misma intensidad, vieron que desaparecían los anillos.

Newton se valió de las luces simples del espectro para observar los anillos. En este caso divisó por reflexión anillos alternativamente negros y luminosos, presentando los

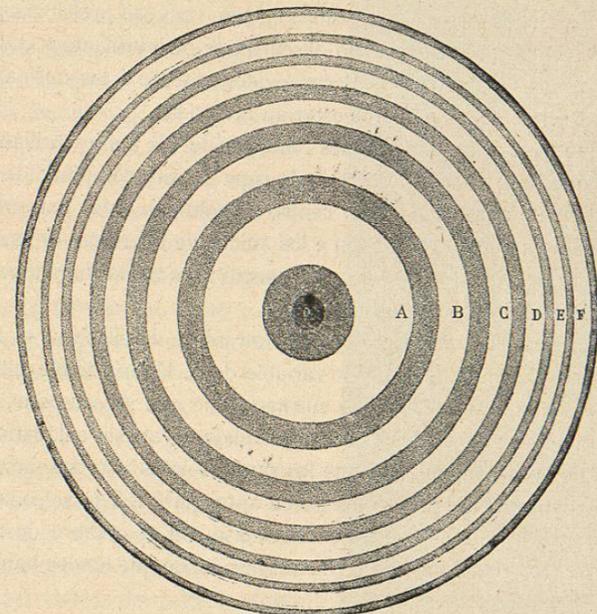


Fig. 552.—Anillos colorados de Newton

segundos el matiz de la luz simple empleada. Pero los diámetros de los anillos variaban de dimensión según el color de la luz, y se dilataban al pasar del morado al rojo. Desde este momento se comprende en qué consiste que los anillos obtenidos con la luz blanca sean irisados. Cada uno de los distintos colores de que está formada dicha luz produce su serie de anillos; pero como las dimensiones son diferentes, la superposición no es exacta, los anillos oscuros desaparecen porque los cubren varios matices de luz, excepto en el centro, y solamente donde estos matices se mezclan en proporción conveniente aparece el único anillo de luz blanca anteriormente observado. Si se pone agua entre los dos cristales, vuelven á aparecer los anillos, pero más pequeños, más juntos y de matices más débiles. Por último, si en vez de un medio líquido ó gaseoso es el vacío el que forma la lámina tenue entre los dos cristales, se ven asimismo anillos de colores que no presentan diferencia apreciable con los que da el aire.

Newton no se limitó, con su sagacidad y precisión habituales, á comprobar estos casos y otros en cuyos detalles no podemos entrar, sino que procuró averiguar la ley á que obedecía la formación de dichos anillos, logrando así enlazar con el mismo principio los variados fenómenos que hemos descrito al principio de este capítulo, los colores iri-

sados de las pompas de jabón y de las láminas tenues de todos los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos. Midió con cuidado los diámetros de los anillos sucesivos obtenidos con la luz simple, en el momento en que la mancha negra del centro indicaba que había contacto entre los cristales, y en virtud de las relaciones geométricas que enlazan los diámetros con los espesores de la lámina tenue, dedujo estos mismos espesores, formulando las leyes siguientes:

*Los cuadrados de los diámetros de los anillos brillantes vistos por reflexión son entre sí como la serie de los números impares 1, 3, 5, 7, 9.....*

*Los cuadrados de los diámetros de los anillos oscuros son entre sí como la serie de los números pares 2, 4, 6, 8.....*

En cuanto á los anillos vistos por transmisión, como ocupan posiciones precisamente inversas, estando reemplazado cada anillo oscuro por otro brillante y cada uno de éstos por uno oscuro, sus diámetros obedecen evidentemente á las mismas leyes, pues de lo contrario las series de los números estarían invertidas.

Esto por lo que toca á las dimensiones relativas de los anillos brillantes y de los oscuros. Por lo que hace á los espesores de la capa de aire comprendida entre los vidrios, van naturalmente aumentando del centro de contacto á las extremidades; pero si se buscan los valores que corresponden á los anillos de diferentes órdenes, se ve que son entre sí como los números impares con respecto á los anillos luminosos, y como los pares relativamente á los negros ú oscuros.

Estas leyes tan sencillas son generales. Newton infirió de ellas que el fenómeno de los anillos de colores depende del espesor variable de la lámina tenue interpuesta entre los dos vidrios, de la naturaleza de la substancia de que se compone, y de ningún modo de los vidrios entre los cuales está comprendida. Trató de enlazarlo con la teoría de la emisión de la luz, suponiendo que los rayos solares al propagarse experimentan cambios periódicos que tan pronto los hacen aptos para reflejarse como para transmitirse. Esta teoría es la que se conoce en la ciencia con el nombre de teoría de los accesos, accesos de fácil reflexión y de fácil transmisión, de que hemos hablado ya en el capítulo anterior.

Hoy, que la teoría de las ondulaciones ha prevalecido, el fenómeno de los anillos colorados se explica del modo más sencillo por el principio de las interferencias. Un rayo de luz que penetra hasta la primera superficie de la lámina, se refleja y transmite parcialmente hasta la segunda superficie, en la cual se refleja de nuevo. Los dos rayos contiguos así reflejados en cada superficie interfieren, es decir, se destruyen ó se agregan uno á otro, según que el retraso del segundo equivalga á un número impar de semilongitudes de onda ó á un número par de estas mismas longitudes. De aquí resulta obscuridad en el primer caso, y por el contrario, luz en el segundo, ó bien anillos oscuros y anillos luminosos. El análisis, aplicado á este caso tan interesante de la teoría de las ondas, permite deducir de nuevo las leyes de los diámetros y de los espesores, tal cual Newton las comprobó primeramente por la experiencia. Como las longitudes de onda varían según la naturaleza de la luz simple, y disminuye del rojo al morado, se ve que los anillos de este último color deberían ser más compactos que los del primero. Ahora bien, ¿cómo puede ser aplicable esta teoría al fenómeno de los colores de las pompas de jabón, colores tan variables, tan movibles, y que continuamente se mezclan y se funden unos en otros? Newton fué también quien demostró la identidad de los anillos de colores obtenidos con los vidrios y de los anillos que aparecen en las pompas.

Para estudiar los segundos, cuidó de poner la burbuja de jabón á cubierto de la agitación del aire exterior, que haciendo variar con irregularidad el espesor de aquella, parece confundir sus colores é impide observarlos con exactitud. "Tan luego como solté una burbuja, dice, la cubrí con una campana de cristal muy transparente, y por este medio sus colores aparecían en un orden muy regular como otros tantos anillos concéntricos que rodeaban la parte superior de la burbuja." Cuando se toman estas precauciones se ve cómo aparecen los anillos de colores en el vértice de la pompa de jabón, dilatándose lentamente á medida que el agua va escurriendo hacia la parte inferior de la burbuja haciéndola más delgada, hasta que, descendiendo ellos á su vez, acaban por desaparecer. La figura 553 representa la disposición de estas bandas coloradas. El fenómeno, por tal manera regularizado, pierde gran parte de su belleza á los ojos del artista; pero, como se comprenderá, gana mucho en interés bajo el punto de vista de la ciencia.

Véase, según Newton, el orden exacto de los anillos de colores tal como los vió sucederse desde la primera coloración de la burbuja hasta su desaparición:

Rojo, azul; rojo, azul; rojo, azul; rojo, verde; rojo, amarillo, verde, púrpura; rojo, amarillo, verde, azul, morado; rojo, amarillo, blanco, azul, negro.

Ahora bien, si se compara esta serie con la de los colores de los anillos obtenidos con los dos vidrios del primer experimento, se reconoce que están exactamente colocados en sentido inverso. Y así debía ser, si la misma causa produce iguales efectos. En su origen, la pompa es demasiado gruesa para que aparezcan los colores; es incolora. Poco á poco su espesor va disminuyendo, de suerte que al fin del fenómeno debe aparecer el negro correspondiente al menor espesor, del propio modo que la mancha negra de los primeros anillos se halla en el punto en que los dos vidrios están en contacto.

Todo cuanto acabamos de decir se refiere á los colores vistos por reflexión. Una vez formada la burbuja se la debe observar de suerte que refleje á la vista la luz de un cielo blanquecino, y para distinguir mejor los anillos y los colores se pone por detrás un fondo negro. Pero asimismo se puede observar la burbuja de jabón mirando á su través la luz del cielo. También se forman entonces anillos de colores, pero de brillo más débil, y sus colores sucesivos son complementarios de los que da la luz reflejada. Fácil es cerciorarse de este hecho, que hemos observado ya en los anillos obtenidos en la superficie de dos vidrios. Si mientras se contempla la burbuja á favor de la luz de las nubes reflejada en el ojo, el color de su circunferencia es rojo, otro observador, mi-

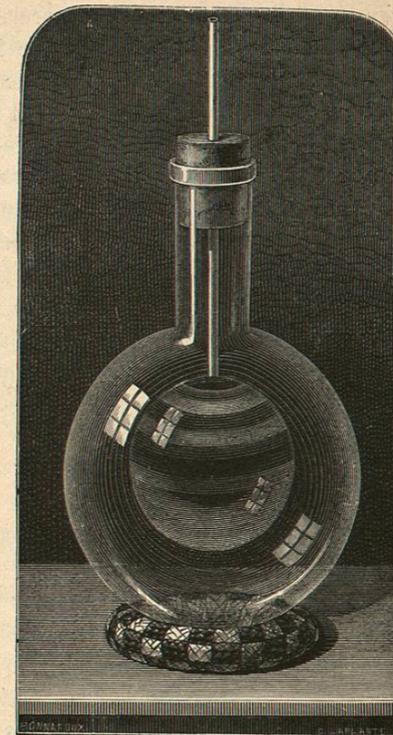


Fig. 553.—Anillos colorados de las láminas tenues  
Burbuja de jabón

rando las nubes al través de la burbuja, verá azul su circunferencia. Por el contrario, si el contorno de la pompa es azul con una luz reflejada, parecerá rojo con otra transmitida.

Ahora es ya fácil comprender por qué la pompa de jabón observada al aire libre presenta en los colores irisados de su superficie esa irregularidad, esa movilidad, esa perpetua mezcla de tintas que hacen de ella uno de los fenómenos más bellos debidos á la descomposición de la luz por interferencia. La agitación del aire alrededor de la pompa, unida á la falta de homogeneidad del agua de jabón en varios puntos y á lodesigual de la evaporación, producen en la película líquida una multitud de corrientes, que contrariando en todos sentidos la acción de la gravedad, impiden que el agua descienda por zonas regulares á la parte inferior de la burbuja. Su espesor varía de un punto á otro en diferentes sentidos, y como de él depende la formación de las tintas, éstas se reparten del modo más variado. En cambio, como en un frasco tapado el aire está saturado de vapor de agua, no hay evaporación ni agitación de aire, y los anillos aparecen con la regularidad que indica el cálculo.

Olvidábasenos decir que las leyes deducidas por Newton para los anillos proporcionan un medio de calcular el espesor de la lámina líquida en los puntos en que tal ó cual color aparece. Este espesor es mínimo en los sitios en que se ven las manchas negras; viniendo á ser entonces la diezmilésima parte de un milímetro. Resulta de aquí que, si se pudiera formar una pompa de jabón que tuviera en todas sus partes este espesor, sería totalmente invisible.

## V

## TEORÍA DE LAS ONDULACIONES. — REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ

En el artículo II del capítulo anterior hemos visto cómo explicaba Newton los fenómenos de reflexión y refracción en el sistema de la emisión. Tratemos ahora de dar una idea del modo cómo se los explica en el sistema de las ondas.

La explicación completa de estos fenómenos está basada en dos principios llamados, el uno *principio de Huygens ó de las ondas envolventes*, y el otro *principio de las interferencias*, que, siguiendo á Th. Young y á Fresnel, hemos expuesto al principio de este capítulo.

En una obra tan elemental como la presente no podemos abrigar la pretensión de desarrollar en toda su extensión la serie de demostraciones y consideraciones necesarias para comprender la explicación teórica de los principales fenómenos de la Óptica. Sin embargo, parécenos cuando menos posible hacer apreciar su enlace.

El principio de Huygens consiste en que el movimiento de una onda luminosa en sus desarrollos sucesivos se puede considerar á cada momento, en un punto cualquiera de su superficie, como la resultante del movimiento que le precede. He aquí la definición exacta que Fresnel da de dicho principio:

*Se pueden considerar las vibraciones de una onda luminosa en cada uno de sus puntos como la suma de los movimientos elementales que enviarían á él en el mismo instante y obrando aisladamente todas las partes de esta onda consideradas en cualquiera de sus posiciones anteriores.*

Siendo O (fig. 554) el punto luminoso del que emanan las ondas sucesivas, consideremos una de éstas cuando ha llegado á AB. Al cabo de un espacio de tiempo dado,

se propagará hasta A'B'. Según el principio de Huygens, podemos considerar el movimiento vibratorio de cada uno de los puntos de la superficie de la onda A'B' como si procediera directamente del punto luminoso ó como si lo determinase la acción aislada de los puntos de la onda AB, á cada uno de los cuales se le mira como un centro de conmoción. Todas las ondas elementales emanadas de los puntos de AB, como *mn*, son esféricas, puesto que se supone al medio homogéneo y tienen por envolvente común la onda A'B'.

Este principio bastaba á Huygens para explicar las leyes de la reflexión y de la refracción según las estableció la experiencia, pero la teoría quedaba incompleta y Fresnel la terminó con toda precisión, haciendo intervenir, como veremos, el principio de la interferencia de las ondas luminosas.

Tomaremos por guía al mismo Fresnel, no en la demostración general rigurosa que ha hecho de la reflexión y refracción en el sistema de las ondas, sino en la exposición más sencilla y elemental que ha escrito para el suplemento á la Química de Thompson.

“Sean ED y FG (fig. 555) dos rayos incidentes emanados del mismo centro de ondulación, que supongo situado á distancia infinita, de suerte que dichos rayos son paralelos entre sí; sea AB la superficie reflectora; tracemos desde el punto G la recta GI, perpendicular á los rayos ED y FG: esta será la dirección de la onda incidente en el momento en que encuentra en G la superficie reflectora. Según el principio de Huygens, podemos considerar cada uno de los puntos G y D sucesivamente agitados por esta onda como si á su vez fuesen otros tantos centros de conmoción que, obrando aisladamente, enviasen rayos en una infinidad de direcciones y con distintas intensidades. Sería sin duda alguna muy difícil de descubrir la ley de las variaciones de su intensidad alrededor del punto radiante, mas por fortuna no tenemos necesidad de ello: porque, cualquiera que sea esta ley, es evidente que hallándose en casos absolutamente análogos los rayos elementales partidos de los puntos G y D que seguirán direcciones paralelas, deberán tener la misma intensidad é igual dirección de movimiento oscilatorio. Pues bien, este principio nos basta para juzgar la dirección en que pueden propagarse las vibraciones resultantes de la reunión de los rayos elementales. En efecto, consideremos la onda reflejada á una distancia infinitamente grande de AB con relación al intervalo GD y á otros intervalos del mismo género; sean GK y DL dos rayos elementales reflejados, concurrendo hacia un mismo punto de esta onda; rayos que serán paralelos á causa de la distancia infinita á que se halla situado dicho punto. Supongo el ángulo KGB igual al ángulo EDA; claro está que las vibraciones traídas por los rayos GK y DL á su punto de reunión concordarán perfectamente; y en efecto, si á causa de la igualdad de estos ángulos se traza la perpendicular DC á GK, los dos triángulos GCD é IDG serán iguales, y por consiguiente GC lo será también á ID. Pero ID es la porción de camino que el rayo incidente ED ha recorrido más que FG para llegar á la superficie; y GC

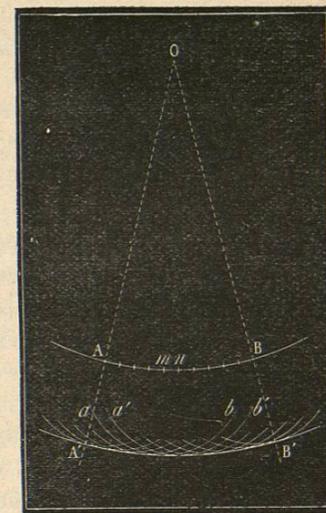


Fig. 554.—Principio de Huygens ó de las ondas envolventes