

ta 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 141. 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, véase 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. Hé aquí la serie de las diferentes tintas que forman los anillos vistos por trasmisión:

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 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 irisados 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 trasmisión, como ocupan posiciones precisamente inversas, estando reemplazado cada anillo oscuro por otro brillante y cada uno de estos 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 ó oscuros.

Estas leyes tan sencillas son generales.

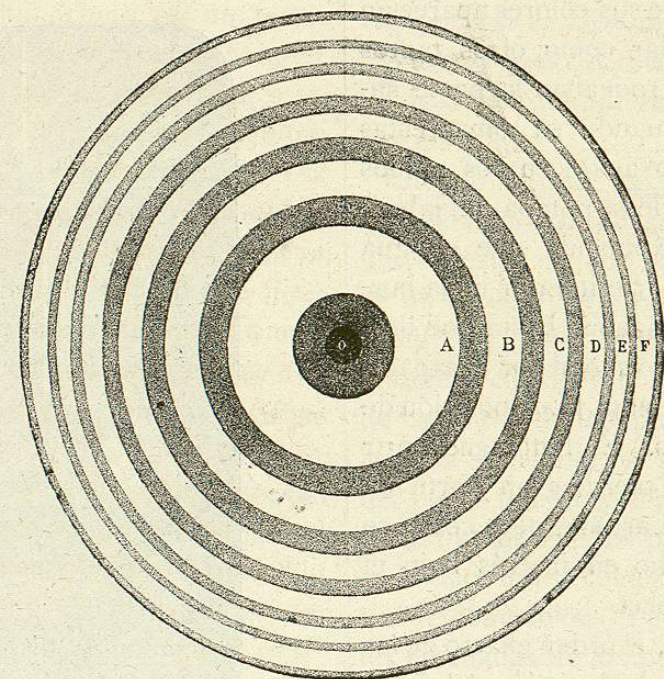


Fig. 141.—Anillos coloreados de Newton.

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 sustancia 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 trasmisión, de que hemos hablado ya en el capítulo anterior.

Hoy, que la teoría de las ondulaciones ha prevalecido, el fenómeno de los anillos de colores se explica del modo más sencillo por el principio de las interferencias. Un rayo de luz que penetra hasta la primera parte de la lámina, se refleja y trasmite 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 oscuridad 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 disminuyen 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 jabon á cubierto de la agitacion del aire exterior, que haciendo variar con irregularidad el espesor de aquella, parece confundir sus colores é impide observarlos con exactitud. «Tan luégo como solté una burbuja, dice, la cubrí con una campana de cristal muy transparente, y por este medio sus colores aparecian en un órden 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 jabon, dilatándose lentamente á medida que el agua va escurriendo hácia la parte inferior de la burbuja haciéndola más delgada, hasta que descendiendo ellos á su vez, acaban por desaparecer. La figura 142 representa la disposicion de estas bandas coloreadas. 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.

Veáse, segun Newton, el órden exacto de los anillos de colores, tal como los vió sucederse desde la primera coloracion de la burbuja hasta su desaparicion:

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 debia 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 reflexion. 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 jabon mirando á su través la luz del cielo. Tambien se forman entónces 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

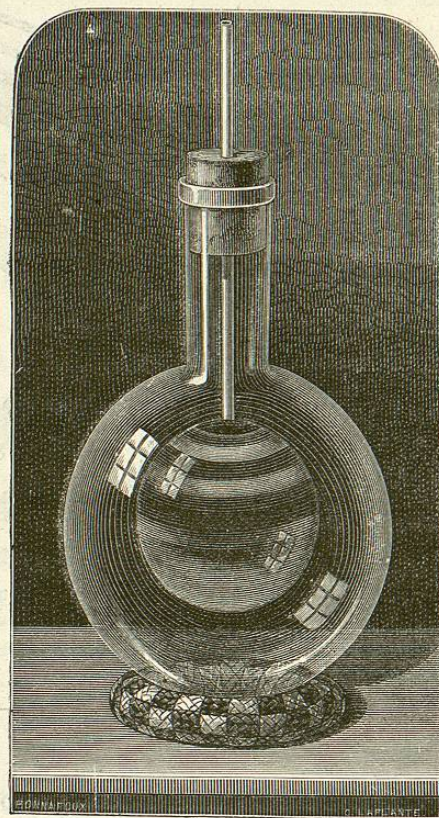


Fig. 142.—Anillos coloreados de las láminas ténues  
Burbuja de jabon

hemos observado ya en los anillos obtenidos en la superficie de dos vidrios. Si miéntas 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, mirando 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 jabon 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 descomposicion de la luz por interferencia. La agitacion del aire alrededor de la pompa, unida á la falta de homogeneidad del agua de jabon en varios puntos y á lo desigual de la evaporacion, producen en la

película líquida una multitud de corrientes, que contrariando en todos sentidos la accion de la gravedad, impiden que el agua descienda por zonas regulares á la parte inferior de la burbuja. Su espesor varia de un punto á otro en diferentes sentidos, y como de él depende la formacion de las tintas, estas se reparten del modo más variado. En cambio, como en un frasco tapado el aire está saturado de vapor de agua, no hay evaporacion ni agitacion 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 entónces la diezmilésima parte de un milímetro. Resulta de aquí que si se pudiera formar una pompa de jabon que tuviera en todas sus partes este espesor, sería totalmente invisible.

## V

## TEORÍA DE LAS ONDULACIONES. — REFLEXION Y REFRACCION DE LA LUZ

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

La explicacion completa de estos fenómenos está basada en dos principios, llamados el uno, *principio de Huygens ó de las ondas envueltas*, 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 pretension de desarrollar en toda su extension la serie de demostraciones y consideraciones necesarias para comprender la explicacion teórica de los principales fenómenos de la Optica. Sin embargo, parecemos cuando ménos 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. Hé aquí la definicion 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 envarian 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. 143) el punto luminoso del que emanan las ondas sucesivas, consideremos una de estas cuando ha llegado á AB. Al cabo de un espacio de tiempo dado, se propagará hasta A'B'. Segun 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 accion aislada de los puntos de la onda AB, á cada uno de los cuales se le mira como un centro de conmocion. Todas las ondas elementales emanadas de los puntos de AB, como *m n*, son esféricas, puesto que se supone al medio homogéneo y tienen por envolvente comun la onda A'B'.

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

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

«Sean ED y FG (fig. 144) dos rayos emanados del mismo centro de ondulacion, 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 direccion de la onda incidente en el momento en que encuentra en G la superficie reflectora. Segun 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 con-mocion 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

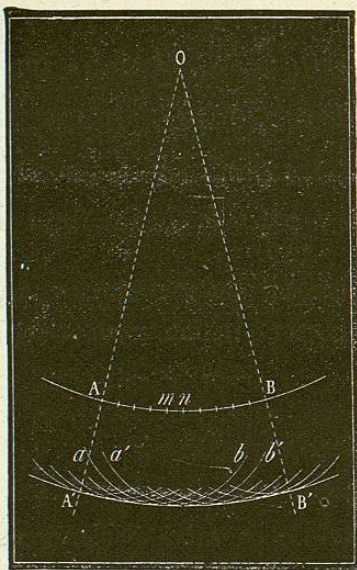


Fig. 143.—Principio de Huyghens, ó de las ondas luminosas

direccion de movimiento oscilatorio. Pues bien, este principio nos basta para juzgar la direccion en que pueden propagarse las vibraciones resultantes de la reunion de los rayos elementales. En efecto, consideremos la onda reflejada á una distancia infinitamente grande de AB con relacion al intervalo GD y á otros intervalos del mismo género; sean GK y DL dos rayos elementales reflejados, concurrendo hácia 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 reunion 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 tambien

á ID. Pero ID es la porcion de camino que el rayo incidente ED ha recorrido más que FG para llegar á la superficie; y GC es la porcion

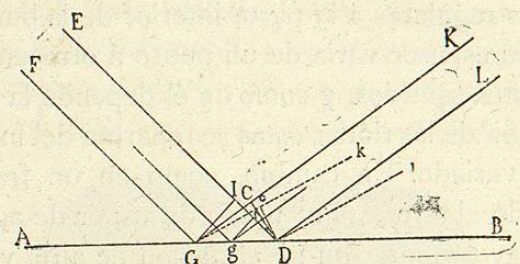


Fig. 144.—Teoría de la reflexion en el sistema de las ondas

de camino que el rayo reflejado en G debe recorrer más que el reflejado en D para llegar á su punto de reunion; 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 direccion de los rayos elementales Gk y Dl, que supongo concurren tambien 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 Gc, comprendido entre el punto G y el pié de la perpendicular Dc, los caminos recorridos por los rayos para llegar al punto de reunion 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

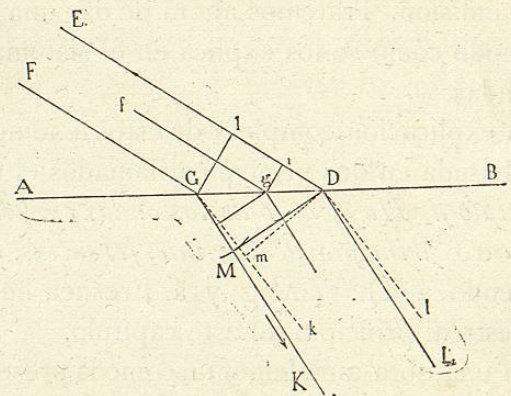


Fig. 145.—Teoría de la refraccion

semi-ondulacion, lo cual establecerá una dis-

(1) Tambien puede decirse que todos los rayos del haz comprendidos entre FG y ED, despues 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 detenia la demostracion 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 direccion que da la ley de la reflexion. La misma observacion podrá aplicarse más adelante á la demostracion de la refraccion.

cordancia completa, en el punto de concurso, entre las vibraciones reflejadas en Gk y Dl; y como por otra parte estas tienen intensidades iguales se destruirán mutuamente, no habiendo por lo tanto luz propagada en esta direccion.»

Los mismos principios sirven para explicar las leyes de la refraccion, es decir, de la direccion que deben seguir las ondas luminosas cuando llegan á la superficie de separacion AB (fig. 145) 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 reunion (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 relacion 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 reunion. La misma condicion llenarán sin duda todos los demás rayos elementales 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 direccion tal que las perpendiculares ID, GM se hallen en la misma relacion que las velocidades de la luz en los dos medios, producirán luz por efecto de su reunion. Ahora bien, ID es el seno del ángulo de reflexion, GM lo es del de refraccion, y se ve que su relacion es constante en la teoría de las ondas: es la misma ley de la refraccion segun resulta de la observacion.

En esto tambien 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 relacion constante, sino que basándose en

el principio de la interferencia, hace ver que dos rayos como Gk y Dl no estarán ya de acuerdo cuando siguen otra direccion 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 semi-ondulacion, resulta necesariamente que ambos interfieren y se destruyen y que no hay ya luz propagada en su direccion.

Así pues, la teoría de las ondas da perfectamente cuenta de las leyes de la reflexion y de la refraccion sin necesidad de que intervenga más hipótesis que la de la constitucion 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 emision y la de las ondas. Al explicar Newton la refraccion diciendo que consistia en una atraccion que los medios densos ejercen sobre las moléculas de la luz, se vió obligado á admitir que la velocidad de propagacion de la luz es mayor en dichos medios, y por consiguiente en el agua debería ser dicha propagacion más rápida que en el aire. En la teoría de las ondulaciones, es enteramente contraria, como acabamos de ver. Refiriéndonos á la figura 145, las líneas ID y GM, que representan los senos de los ángulos de incidencia y de refraccion, expresan tambien 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 mencion 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 emision está por este concepto en abierta contradiccion con la práctica. Más adelante encontraremos otro testimonio de su impotencia para explicar ciertos fenómenos que la teoría de las ondas explica en cambio victoriosamente.