

número y no hay medio alguno de poder inscribirlas, se ha determinado su longitud. Fresnel ha hecho experimentos que le han permitido calcular la longitud de ondulacion de la luz roja homogénea que atraviesa un cristal de color, y tomando por unidad el milímetro, ha visto que era igual á $0^{mm},000638$, cantidad extraordinariamente menor que la longitud de una onda sonora. Resulta de aquí que la rapidez con que se suceden las ondas luminosas es excesiva. En efecto, la luz recorre en un segundo 300 millones de metros; por consiguiente la luz roja de que acabamos de hablar era producto de vibraciones que se sucedían en un segundo tantas veces como el número $0^{mm},000638$ está contenido en 300 millones, ó sea 470 billones.

Hemos dicho que las longitudes de onda varían con el color ó con la refrangibilidad de la luz. Lo propio sucede con los números de vibraciones correspondientes, efectuadas por las moléculas de los focos luminosos ó por las del éter. El cuadro siguiente se refiere á los colores principales del espectro de la luz solar:

COLORES PRINCIPALES	Longitudes de onda en millonésimas de milímetro.	Número de vibraciones en billones.
Morado extremo.	406	739
Morado.	423	709
Morado añil.	439	683
Añil.	449	668
Añil azul.	459	654
Azul.	475	631
Azul verde.	492	610
Verde.	512	586
Verde amarillo.	532	564
Amarillo.	551	544
Amarillo anaranjado.	571	525
Anaranjado.	583	514
Anaranjado rojo.	596	504
Rojo.	620	484
Rojo extremo.	645	465

CAPÍTULO XII

FENOMENOS DE DIFRACCION

I

INTERFERENCIA DE LAS ONDAS LUMINOSAS. — FENOMENOS DE DIFRACCION

El P. Grimaldi publicó en Bolonia en 1665 un curioso libro titulado *Physico-mathesis de lumine*, en el cual describió por vez primera ciertos fenómenos á los cuales dió el nombre, que

El valor medio de la longitud de una onda luminosa apenas excede de la mitad de un milésimo de milímetro, de suerte que en el espacio de un metro hay por lo ménos dos millones de ondulaciones. En cuanto á formarse una idea del número prodigioso de ondas que se suceden en un sólo segundo, número que asciende á 600,000 billones, es cosa superior al alcance de nuestra imaginacion. Pero no debemos olvidar que todas las magnitudes y dimensiones con las que estamos familiarizados, distancias, velocidades, tiempos, son puramente relativas; en el dominio de lo real, es también fácil concebir de este modo lo que nos parece infinitamente grande. Tanto en la teoría de las ondulaciones como en la de la emision, las cifras que sirven para medir los elementos constitutivos de la luz, son igualmente considerables. Lo que ha permitido decidir entre ambas teorías, es que todas las dificultades que resultan de la adopcion de una ú otra se han allanado respecto de la primera, al paso que los partidarios de la emision tenían forzosamente que ir acumulando hipótesis para explicar los hechos nuevos á medida que se presentaban. Estas hipótesis, muy ingeniosas con frecuencia, han sido insuficientes en ciertos casos, y hasta han tropezado con contradicciones formales de la experiencia. Por el contrario, la teoría de las ondulaciones ha resultado bastante fecunda para proporcionar de antemano indicaciones de nuevas verdades, consecuencias necesarias de los principios que la observacion ha confirmado en seguida. Citaremos algunos ejemplos de varias pruebas de esta clase.

áun conservan, de fenómenos de *difraccion*. Véase en qué consisten estos hechos nuevos, ó por lo ménos nuevamente observados, que los físicos han estudiado y multiplicado despues hasta el punto de constituir con ellos una rama importante de la óptica.

Si se introduce un rayo de luz en la cámara oscura al través de un pequeñísimo orificio, se

ve que la sombra de los cuerpos opacos estrechos, expuestos á esta luz, son mucho más extensas de lo que deberian serlo con arreglo á la marcha rectilínea de los rayos luminosos. Además dichas sombras aparecen rodeadas de franjas de colores, paralelas entre sí y á los bordes de los cuerpos opacos. El fenómeno des-

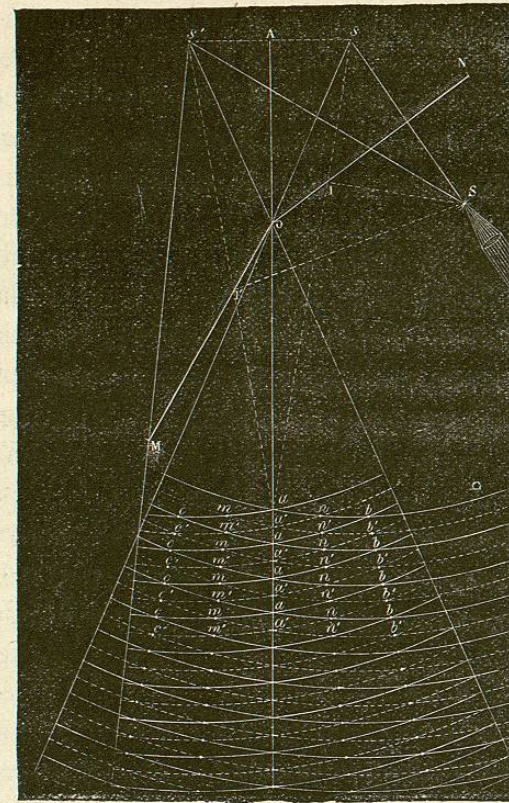


Fig. 137.—Experimento de los dos espejos de Fresnel; demostración práctica del principio de las interferencias

aparece si en lugar de penetrar el haz de luz por un pequeño orificio, pasa por un agujero ancho.

Reemplazando el cuerpo opaco por un pequeñísimo orificio practicado en una lámina metálica, por ejemplo, y recibiendo la luz en una pantalla, se obtienen anillos concéntricos de franjas de colores, situadas unas en la imagen geométrica del orificio, y otras fuera, es decir, dentro de la sombra de la lámina. Por último, si hay dos aberturas muy contiguas, resultan dos series de anillos que se superponen en parte, y además se ven tres series de franjas rectilíneas, que desaparecen tan luego como se tapa una de las aberturas (fig. 135). Este experimento causó profundo asombro entre los físicos porque trastornaba todas las ideas que hasta entonces se habian formado sobre la naturaleza del agente luminoso. Y en efecto, hacia patente el re-

sultado singular de que la *luz agregada á la luz produce en ciertos casos oscuridad*.

Newton estudió los fenómenos de difraccion revelados por el físico boloñés; agregó nuevas observaciones y procuró explicar la difraccion diciendo que es una desviacion que los bordes de los cuerpos opacos causan á los rayos de luz. Fraunhofer, Young y últimamente Fresnel acabaron de descubrir sus leyes, y el tercero las fundó con feliz éxito en la teoría de las ondulaciones.

Antes de proseguir la descripción de los fenómenos, demos una idea de lo que Young ha llamado *principio de las interferencias*, cuya teoría ha expuesto en el sistema de las ondulaciones y que Fresnel demostró más adelante por medio del famoso experimento de los dos espejos.

Supongamos que dos rayos de luz siguen la direccion AB, (fig. 136), que su intensidad es igual y que lo son también las longitudes de onda de cada uno (1), en cuyo caso los movimientos de vibracion del éter tendrán la misma amplitud en las mismas fases. Si las ondas del primer rayo coinciden con las del segundo, claro está que sus intensidades deberán agregarse, y que á causa de esta mutua agregacion aumentará la cantidad de luz. Pero si uno de ellos se retrasa un tanto, y este retraso es precisamente igual á una semilongitud de onda, las moléculas de éter situadas á lo largo de la línea AB serán atraídas, de un lado por fuerzas cuya intensidad y direccion estarán representadas por la curva *aaa*, y de otro lado por fuerzas iguales y contrarias representadas por la curva *a'a'a'*. Por consiguiente, toda molécula como *m* permanecerá en reposo bajo la accion de estas fuerzas opuestas; el movimiento vibratorio cesará y la oscuridad sucederá á la luz. Entonces se dice que las ondas ó los rayos luminosos

(1) El raciocinio anterior no es aplicable sino á sistemas compuestos de ondas de igual longitud, porque si las del uno fuesen mayores que las del otro, por pequeña que fuese la diferencia sucedería que la posicion relativa de las ondas no seria la misma en toda la extension de los dos grupos, y al paso que las primeras ondas se contrariarian casi completamente, las siguientes no estarian ya en total discordancia, y hasta acabarían por concordar un poco más lejos; de lo cual resultaría una sucesion de vibraciones débiles y fuertes análogas á las pulsaciones que produce la consonancia de dos notas poco distintas; pero sucediéndose con rapidez prodigiosa estas alternativas de luz fuerte y débil, sólo producirían en el ojo una sensacion continua. (A. Fresnel, *De la luz*, etc.)

interferen. Lo propio resultaría si el retraso fuese de $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$ y en general de un número impar de semi-ondulaciones. Si el número de estas es par, el resultado es el mismo que si hubiese coincidencia. Finalmente, entre estos dos casos extremos, tan pronto aumenta como disminuye la intensidad luminosa, pero sin que en ningún punto haya destrucción absoluta de luz.

Teóricamente considerado, este raciocinio, que es una consecuencia necesaria del sistema de las ondulaciones, explica perfectamente el experimento de Grimaldi y todos aquellos en que aparecen franjas oscuras ó brillantes. Falta sin embargo comprobarlo por la observación.

Young se había ocupado, ántes de estudiar óptica, de las leyes de las vibraciones de los tubos sonoros, y según parece, el fenómeno de las pulsaciones fué el que le sugirió la primera idea de la interferencia de las ondas luminosas. Planteó este principio y lo aplicó á la explicación de muchos fenómenos, después de haber dado con su demostración práctica. Una observación casual le puso sobre la vía de esta prueba directa.

«Habiendo tenido ocasión de observar la sombra de un cabello alumbrado por una hendidura luminosa muy angosta, advirtió en medio de la sombra una franja blanca y brillante entre dos franjas oscuras. Repitió el experimento poniendo en lugar del cabello un rectángulo opaco muy estrecho, y vió en la sombra de este rectángulo una serie de franjas alternativamente brillantes y oscuras. La franja central es blanca y orlada de dos franjas oscuras; las otras franjas brillantes son de colores bastante marcados y tanto más cuanto más distan del medio de la sombra. Young hizo también otra observación importante; interceptando con una pantalla opaca la porción de luz que pasaba contigua á uno de los bordes del rectángulo, vió desaparecer completamente las franjas que había en el interior de la sombra. Después de esto era difícil negarse á admitir que estas franjas tienen por causa el concurso de los rayos que pasan cerca de los dos bordes opuestos de la pantalla opaca. Young ideó otro experimento más concluyente todavía para demostrar la existencia de las interferencias luminosas.

Hizo pasar el haz de rayos solares transmitido por un pequeño orificio practicado en la ventana de la cámara oscura, á otros dos orificios estrechos y contiguos, abiertos en una pantalla opaca; recibió en una segunda pantalla los dos conos luminosos dilatados por la difracción de modo que se encuentran á cierta distancia, y vió en la sombra de la parte opaca situada entre los dos orificios de la primera pantalla una serie de bandas finísimas alternativamente brillantes y oscuras, que eran tanto más estrechas cuanto mayor distancia mediaba entre los dos agujeros. Dichas bandas desaparecían tan luego como se cerraba uno de ambos agujeros, y lo propio sucedía cuando se sustituía al haz único que pasaba por un agujero angosto la luz solar directa ó la de una llama artificial, es decir, cuando se volvía á la disposición adoptada por Grimaldi (1). Por lo demás, las bandas ocupaban exactamente las posiciones en que según la teoría debían reforzarse ó debilitarse recíprocamente los movimientos vibratorios.» (*Lecciones de óptica física*, por E. Verdet.)

El sabio físico de quien hemos tomado el párrafo anterior hace observar que los experimentos de Young, por ingeniosos que fuesen, sólo probaban la interferencia en cuanto á los rayos difractados, modificados por un fenómeno imperfectamente conocido, y que restaba saber si era un principio aplicable á todos los rayos luminosos.

Esto es lo que ha hecho Fresnel, valiéndose principalmente del experimento de los dos espejos á que hemos aludido ántes. Este experimento es sobrado importante para que dejemos de describirlo, pues aún cuando la índole y los límites de esta obra no nos permiten abordar la explicación teórica de la mayoría de los fenómenos, por lo ménos debemos exponer su principio con toda claridad para que el lector acepte sus consecuencias con confianza.

Colócanse verticalmente en la cámara oscura dos espejos planos ON, OM (fig. 137), de metal ó cristal negro, de modo que formen entre sí un ángulo muy obtuso. Delante de estos espejos se concentra en S un haz de luz solar

(1) Según Verdet, los experimentos de Grimaldi no dan verdaderas franjas de interferencia, por más que el físico boloñés haya dicho formalmente en su tratado que en ciertos casos pueden debilitarse dos luces al reunirse.

por medio de una lente esférica ó cilíndrica de tal suerte que dé un punto, ó bien una línea luminosa. En uno y otro espejo se forman dos imágenes, una en *s* que corresponde al espejo ON, y otras en *s'* correspondiente al otro espejo. Tiénense así dos focos de luz que presentan la particularidad de hallarse á cada momento en el mismo estado de vibración por emanar de un foco común. Si en seguida se coloca una pantalla vertical delante de los dos espejos, de modo que reciba á la vez los haces luminosos emanados de las dos imágenes, se verá en la pantalla una faja brillante en dirección de la prolongación de la línea OA, y á cada lado de esta faja una serie de franjas alternativamente oscuras y brillantes. Si se tapa uno de los dos espejos, las franjas desaparecen al punto, y la pantalla queda uniformemente alumbrada.

Como se ve, el fenómeno es el mismo que en el experimento de los dos orificios de Tomás Young, faltando explicar cómo la luz agregada á la luz puede producir oscuridad; según hemos visto, es preciso demostrar que donde quiera que haya franjas oscuras, consiste en que interfieren las ondas luminosas emanadas de los dos focos, y en que por el contrario están en la misma fase donde quiera que se ven las franjas brillantes. Así lo representa la fig. 137, donde se ven trazadas las ondas concéntricas emanadas de *s* y *s'*. Estos dos sistemas de ondas se cruzan y cortan en varios puntos; pero algunos de estos que, como los marcados con la letra *a*, están situados en la perpendicular AO á *ss'*, se hallan tanto en uno como en otro sistema en la misma fase de ondulación, puesto que siendo los rayos *sa*, *s'a* de igual longitud, sucede lo propio con los trayectos *SIa* y *SI'a*, recorridos por las dos ondas luminosas emanadas del foco S y reflejadas en uno y otro espejo. Lo propio sucede con todos los puntos *a'a'* situados en el plano vertical que pasa por AO. Así pues, las intensidades luminosas se agregan en este plano, resultando la franja brillante central. En ciertos puntos, como *n n'* la diferencia de marcha de las ondas que en ellos se cruzan es de $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$ longitudes de onda, es decir, de un número impar de semi-ondulaciones; hay interferencia y por consiguiente franja oscura, sucediendo otro tanto con los puntos

m m'... Más lejos, los puntos *bb'... cc'...* pertenecen á rayos cada uno de los cuales tiene sobre el otro un retraso de un número par de semi-longitudes de onda: *franjas brillantes...* y así sucesivamente. Tan luego como se tapa con una pantalla uno ú otro de ambos espejos, las franjas desaparecen, y la primera pantalla, en la cual se recibía dichas franjas, recobra un brillo uniforme.

Fresnel ha empleado sucesivamente luces de todos los colores simples para hacer este experimento capital; y han resultado franjas de cada una de estas tintas, pero tanto más juntas cuanto más se alejan del rojo en la serie de los colores prismáticos. El morado da las franjas más estrechas. Midiendo con gran precisión las distancias de las franjas dadas por la luz roja, ha conseguido el ilustre físico deducir de ellas las longitudes de onda de las luces de varios colores, y por lo tanto el número de vibraciones efectuadas por el éter en el breve intervalo de un segundo, número tan prodigiosamente grande como ya hemos indicado. Las franjas procedentes de la luz blanca deben estar formadas por las franjas coloreadas con cada una de las tintas del espectro, sobrepuestas de modo que el morado esté junto á la banda brillante central. Así lo demuestra también la observación.

De este modo quedó confirmada con un experimento memorable la verdadera teoría de las ondulaciones, de la cual ha sabido sacar el análisis matemática una porción de consecuencias, unas conocidas ya por la observación, y otras que se anticiparon á ella y le sirvieron de guía. Los nombres de Huygens, Young y Fresnel irán por siempre unidos á tan hermosa teoría como lo está el de Newton á la de la atracción universal.

II

FENÓMENOS DE DIFRACCION POR PEQUEÑAS ABERTURAS

Volvamos ahora á los fenómenos de difracción, todos los cuales se relacionan con el principio de la interferencia de las ondas luminosas. Como estos fenómenos son muchos, sólo nos ocuparemos de algunos de los más notables.

Repitiendo Newton por distintas maneras los experimentos del P. Grimaldi sobre las som-