

también que uno y otro elemento son á la vez, el primero considerable y el segundo muy débil.

Conociendo la velocidad del sonido y el número de vibraciones de un sonido dado en un segundo, fácilmente se deduce la longitud de la onda sonora correspondiente; es poco más ó menos  $0^m,4$  para el *la* del diapasón. Ya veremos que se ha procedido de distinto modo con respecto á las ondas luminosas. Como son demasiado rápidas para que se pueda contar su 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 ondulación 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

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 menos dos millones de ondulaciones. En cuanto á formarse una idea del número prodigioso de ondas que se suceden en un solo segundo, número que asciende á 600,000 billones, es cosa superior al alcance de nuestra imaginación. 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 emisión, 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 adopción de una ú otra

se han allanado respecto de la primera, al paso que los partidarios de la emisión 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 observación ha confirmado en seguida. Citaremos algunos ejemplos de varias pruebas de esta clase.

## CAPÍTULO XII

### FENÓMENOS DE DIFRACCIÓN

#### 1

#### INTERFERENCIA DE LAS ONDAS LUMINOSAS. - FENÓMENOS DE DIFRACCIÓN

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 aún conservan, de fenómenos de *difracción*. Véase en qué consisten estos hechos nuevos, ó por lo menos nuevamente observados, que los físicos han estudiado y multiplicado después 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 las sombras de los cuerpos opacos estrechos, expuestos á esta luz, son mucho más extensas de lo que deberían 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 desaparece 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. 545). Este experimento causó profundo asombro entre los físicos porque trastornaba todas las ideas que hasta entonces se habían formado sobre la naturaleza del agente luminoso. Y en efecto, hacía patente el resultado singular de que la *luz agregada á la luz produce en ciertos casos obscuridad*.

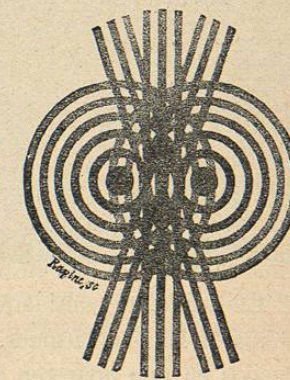


Fig. 545.—Experimento de difracción. Franjas oscuras y franjas brillantes producidas por un sistema de dos pequeñas aberturas circulares.

Newton estudió los fenómenos de difracción revelados por el físico boloñés; agregó nuevas observaciones y procuró explicar la difracción diciendo que es una desviación 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 dirección AB (fig. 546), que su intensidad es igual y que lo son también las longitudes de onda de cada uno (1), en cuyo caso los movimientos de vibración 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 agregación aumentará la cantidad de luz. Pero si uno de ellos se retrasa un tanto, y este retraso es precisamente

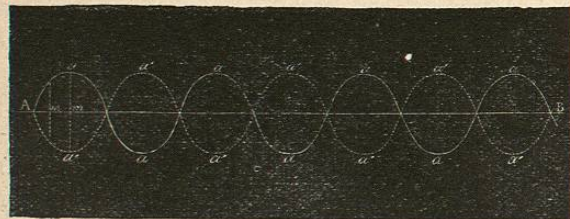


Fig. 546.—Interferencia de las ondas luminosas

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 dirección estarán representadas por la curva *aaa*, y de otro lado por fuerzas iguales y contrarias representadas por la curva *a'a'*. Por consiguiente, toda molécula como *m* permanecerá en reposo bajo la acción de estas fuerzas opuestas; el movimiento vibratorio cesará y la obscuridad sucederá á la luz. Entonces se dice que las ondas ó los rayos luminosos *interfieren*. Lo propio resultaría si el retraso fuese de  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{2}$ , etc., y en general de un número impar de semiondulaciones. Si el número de éstas 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. Faltaba sin embargo comprobarlo por la observación.

Young se había ocupado, antes 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 de-

(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 posición relativa de las ondas no sería la misma en toda la extensión de los dos grupos, y al paso que las primeras ondas se contrariarían casi completamente, las siguientes no estarían ya en total discordancia, y hasta acabarían por concordar un poco más lejos; de lo cual resultaría una sucesión 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 sensación continua." (A. Fresnel, *De la luz*, etc.)

mostración 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 hendedura 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 cayeran uno sobre otro, y vió en

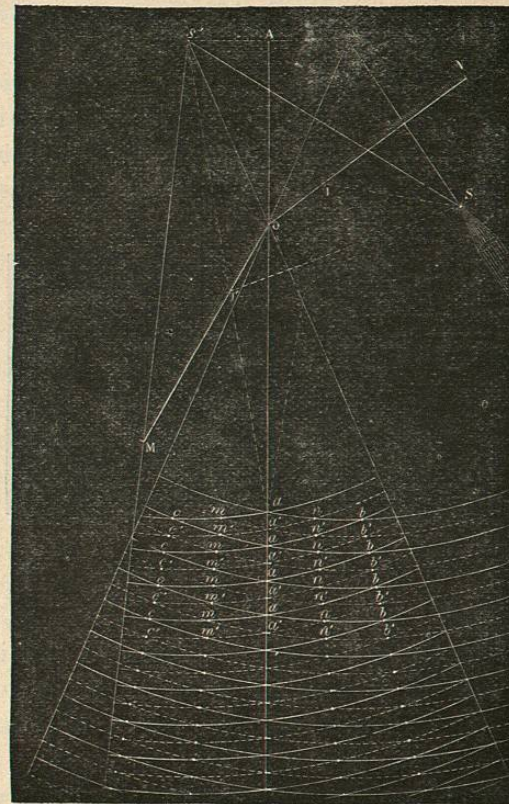


Fig. 547.—Experimento de los dos espejos de Fresnel: demostración del principio de las interferencias

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.)

(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.

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 antes. Este experimento es sobrado importante para que dejemos de describirlo, pues aun cuando la índole y los límites de esta obra no nos permiten abordar la explicación teórica de la mayoría de los fenómenos, por lo menos 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 (figura 547), 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 por medio de una lente esférica ó cilíndrica, de tal suerte que dé un punto ó bien una línea luminosa. En uno y

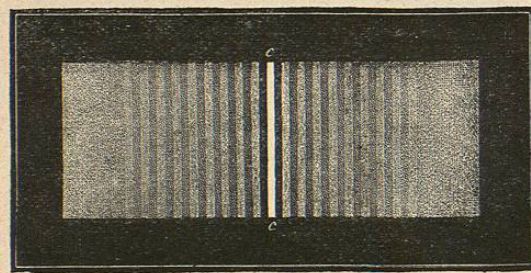


Fig. 548.—Franjas de interferencia en el experimento de los dos espejos

otro espejo se forman dos imágenes, una en  $s$  que corresponde al espejo ON, y otra 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 dondequiera 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 dondequiera que se ven las franjas brillantes. Así lo representa la figura 547, 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  $a'a'a'$  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  $nn'$ , la diferencia de marcha de las ondas que en ellos se cruzan es de  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{2}$ ,..... longitudes de onda, es decir, de un número impar de semiondulaciones; hay interferencia y por consiguiente franja oscura, sucediendo otro tanto con los puntos  $m m'$ ..... Más le-

jos, los puntos  $bb'$ .....  $cc'$ ..... pertenecen á rayos cada uno de los cuales tiene sobre el otro un retraso de un número par de semilongitudes de onda: *franjas brillantes*..... y así sucesivamente. El aspecto general del fenómeno es el que presenta la figura 548. 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, superpuestas 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 DIFRACCIÓN 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 sombras amplificadas de los cuerpos delgados, como cabellos, hilos, alfileres, pajas, etc., pudo cerciorarse de que la desviación de los rayos luminosos no tenía por causa, como se creyó en un principio, una refracción en una tenue capa de aire más densa que rodeaba al cuerpo (hipótesis sostenida por Mairán). Asimismo vió que las franjas se formaban siempre, cualquiera que fuese la substancia empleada; y ya consistiese ésta en metales, ó en piedras, vidrio, madera, hielo, etc., siempre se notaban tres franjas situadas de este modo á partir de la sombra: franja interior: morado, azul oscuro, azul claro, verde, amarillo y rojo; franja intermedia: azul, amarillo y rojo; franja exterior: azul claro, amarillo claro y rojo. Notó también que las luces simples del espectro dan franjas desigualmente agrupadas. Pero de todos estos experimentos no dedujo otra cosa sino que al rasar los rayos de luz los bordes de los cuerpos experimentan inflexiones tanto más fuertes cuanto más de cerca rasan su superficie. Esta era una hipótesis natural en el sistema de la emisión, pero ya acabamos de ver cuál era su explicación verdadera.

Todos los experimentos, muy numerosos por cierto, efectuados posteriormente, pueden dividirse en dos clases: la primera comprende los fenómenos de difracción pro-

ducidos por bordes rectilíneos, verbigracia por una ó muchas aberturas muy angostas en forma de paralelogramo, ó por una delgada pantalla, ó un alambre, ó un cabello; á la segunda corresponden los fenómenos que resultan cuando la difracción se efectúa al través de una ó muchas aberturas pequeñísimas, cuadradas, triangulares, circulares ó en dos bordes de una pantalla circular de escaso tamaño. Entre estos sistemas de franjas los hay irisados, que proceden de la luz blanca; monocromáticos, producidos por una luz simple, como la roja, y en muchos casos las franjas irisadas van acompañadas de una multitud de espectros pequeños cuyos vivos colores aumentan la belleza del fenómeno.

J. Herschel ha observado (y Arago estudiado después que él) curiosos efectos de difracción colocando delante del objetivo de un anteojo astronómico diafragmas de variadas formas, observando de este modo diferentes estrellas simples ó dobles. Con una

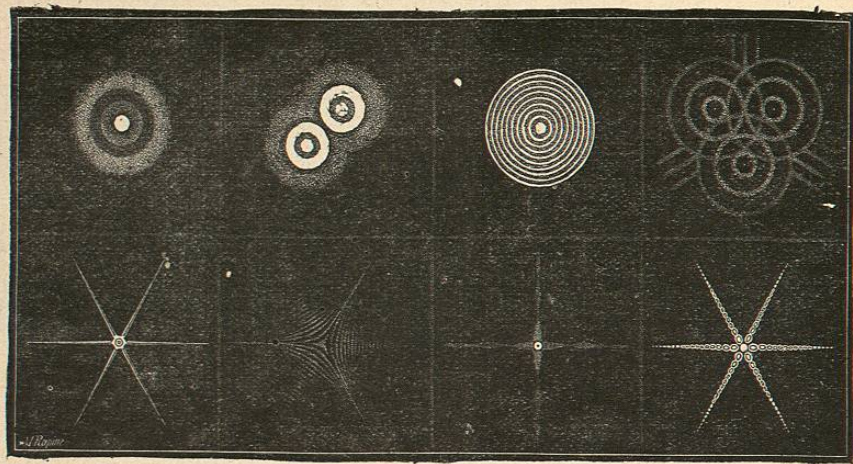


Fig. 549.—Efectos de difracción en los anteojos astronómicos, según J. Herschel

abertura anular, ha visto anillos de colores que rodeaban las imágenes de los puntos luminosos, los cuales presentaban entonces discos semejantes á los de los planetas. Por el contrario, los diafragmas triangulares daban estrellas de seis rayos; una abertura formada por doce cuadrados concéntricos producía una estrella de cuatro rayos; y por último, abriendo regularmente triángulos equiláteros en el diafragma, obtuvo una serie de discos circulares ordenados en seis líneas que iban divergiendo á partir del disco central incoloro y muy brillante, estando cada uno de ellos rodeado de un anillo más ó menos coloreado y amplificándose á modo de espectros conforme se alejaban del centro (fig. 549).

Todos estos fenómenos son á la verdad muy curiosos; los magníficos colores que presentan los convierten en otros tantos cuadros cuya variedad compite con su esplendor; mas para el físico ofrecen otro interés de mucho más precio, por cuanto son otras tantas confirmaciones de la teoría de las ondulaciones del éter. El análisis matemática, aplicada á los diferentes casos de difracción, da resultados que concuerdan maravillosamente con los de la observación. Hemos dicho antes que ésta se había anticipado á veces á ellos: en prueba de ello he aquí un notable ejemplo. Habiendo sometido el geómetra Bisson al cálculo el problema que consiste en determinar la sombra y las franjas producidas por un pequeñísimo disco opaco expuesto á la luz que diverge de un punto luminoso, vió que el centro de la sombra debía ser tan brillante como si el disco

no existiera; esta luz era el efecto resultante de la difracción de las ondas luminosas en el borde de la pantalla. Semejante resultado era tan opuesto á las observaciones anteriores (1), que Poisson lo presentó como una objeción seria á la teoría de las ondulaciones. Mas como Arago hiciera el mismo experimento con el cuidado necesario, valiéndose de un pequeño disco de metal cimentado sobre una placa de cristal perfectamente homogéneo y diáfano (2), apareció el punto luminoso, según lo indicara el cálculo. Hubiérase dicho que la sombra la producía una pantalla agujereada en el centro. Este es sin disputa uno de los más hermosos triunfos de la teoría, un testimonio decisivo en favor del sistema de las ondulaciones y de la existencia del éter.

### III

#### LOS RESALTOS. — FRANJAS POLICROMÁTICAS

Fraunhofer, cuyos magníficos experimentos sobre las rayas del espectro hemos mencionado ya, estudió los fenómenos de la difracción con esa exactitud y precisión que en tan alto grado le distinguían. Después de haber observado las imágenes formadas por un número muy limitado de pequeñas aberturas, concibió la idea de ver lo que ocurre cuando la luz atraviesa una red compuesta de una multitud de hilos muy finos, paralelos ó cruzados. Al pronto empleó una red de alambre formada por un gran número de hilillos sujetos á un marco cuadrangular por medio de dos tornillos perfectamente semejantes. Para conseguir luego mayor regularidad y delicadeza en los intervalos que daban paso á la luz, trazó sobre placas de vidrio cubiertas de una hoja de oro líneas equidistantes y paralelas; después grabó las mismas rayas con un diamante en la misma placa, formando así más de 1000 divisiones por milímetro. Cada estría era una pantalla opaca, y los intervalos de las estrías daban paso á la luz. Conviene advertir que un número mucho menor de divisiones da más regularidad al resalto, y que en caso necesario bastan 38 rayas para observar los fenómenos.

Además de las redes de mallas paralelas, Fraunhofer estudió las de mallas cuadradas, formadas por dos series de líneas que se cruzaban en ángulo recto, así como las de mallas circulares ó de cualquiera otra forma. De este modo obtuvo un crecido número de figuras en que estaban distribuídas las franjas y los espectros con simetría maravillosa; pero aún hizo más; estudió las leyes de esta distribución, leyes que, según Babinet ha demostrado, son consecuencias necesarias del principio de las interferencias.

El fenómeno resultante del paso de la luz al través de una red de líneas paralelas presenta en medio una línea brillante, luego dos anchos intervalos oscuros seguidos á cada lado de dos espectros con el morado vuelto hacia el centro y tan puros que se distinguen fácilmente en ellos las rayas oscuras. Más allá hay dos nuevas bandas

(1) A lo menos, así se creía entonces. A decir verdad, el astrónomo francés Delisle había hecho ya en 1715 el experimento presentado por Poisson en refutación de la teoría de Fresnel, y quedaba completamente olvidado un siglo después. (V. Verdet, *Lecciones de óptica física*.)

(2) "Tan luego como el diámetro de la pantalla es un poco grande, dice Fresnel, por ejemplo de un centímetro (la de Arago tenía dos milímetros), los menores defectos de sus bordes ó de la placa de cristal en la que está fijada alteran la regularidad de los anillos oscuros y brillantes que rodean la mancha blanca del centro de la sombra. Es menester que al pequeño disco se le dé con sumo cuidado la forma de un cono truncado, de modo que sus bordes aparezcan cortados á bisel. La placa de vidrio debe estar en absoluto exenta de estrías y tener sus caras perfectamente planas." Por la indicación de estas precauciones se ve con cuánto cuidado se deben practicar los experimentos de óptica para que den buenos resultados.