

## CAPITULO XI

## ¿QUÉ ES LA LUZ?

## I

## ANTIGUAS HIPÓTESIS SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ

Hasta aquí nos hemos limitado á describir los fenómenos luminosos y algunas de sus leyes, sin hacer intervenir en la explicación de los hechos ninguna hipótesis sobre la naturaleza de la luz. Sin embargo, desde el principio hemos apuntado que la luz consiste, como el sonido, en vibraciones rapidísimas de las moléculas de los focos, vibraciones que se comunican á un medio especial y se propagan en él con extraordinaria velocidad en forma de ondulaciones. Ha llegado el momento de explicar más completamente la teoría, sin la cual los fenómenos que aún tenemos que describir parecerían las más de las veces inexplicables.

Empecemos por resumir sucintamente las antiguas hipótesis sobre la luz, hipótesis hoy generalmente desechadas.

Acerca de este asunto tenían los antiguos, lo mismo que sobre los demás fenómenos físicos, las ideas más erróneas ó las nociones más vagas. ¿Qué diremos del modo cómo la escuela pitagórica explicaba la luz, ó mejor dicho, la visión? Según los filósofos de esta escuela, "el ojo proyecta fuera de sí una infinidad de rayos que, cual otros tantos brazos invisibles, van á pulsar y examinar los objetos percibidos, resultando de aquí la imagen visual de esos objetos. Demócrito y los epicúreos formularon una teoría enteramente opuesta, que acabó por predominar. Según ella, las imágenes que se forman en el ojo son una emanación de los objetos. Platón trató de conciliar ambas teorías, explicando la visión por el encuentro de los rayos que partían del ojo con los que emanaban del objeto. ¿En qué consistía esta doble emanación, y cómo podía resultar la sensación de la luz del encuentro de rayos que chocaban fuera del ojo? Difícil es darse cuenta de la idea que había sugerido semejantes hipótesis.

No es menos singular la opinión de Aristóteles: este gran filósofo "explicaba la naturaleza de la luz suponiendo que hay cuerpos transparentes por sí mismos, como el aire, el agua, el hielo, etc., es decir, cuerpos que tienen la propiedad de hacer visibles á los que están detrás de ellos; pero como de noche no vemos nada á través de estos cuerpos, añade que no son transparentes sino potencialmente, y que de día lo vuelven á ser real y actualmente, y por cuanto sólo la presencia de la luz puede reducir esta potencia á hechos, define la luz diciendo que es *el acto del cuerpo transparente considerado como tal*. Añade que la luz no es fuego ni ninguna otra cosa corpórea que irradie del cuerpo luminoso, y que se transmite á través del fuego, ó de algún otro cuerpo luminoso, al cuerpo transparente." (*Enciclopedia*.)

Hay que llegar á los tiempos modernos, en que se ha inaugurado el método de observación experimental, para encontrar en lo que se refiere á la cuestión planteada al principio de este capítulo otra cosa que miras puramente especulativas, es decir, para

encontrar hipótesis verdaderamente científicas. No enumeraremos todas las que se han propuesto, pues á decir verdad se reducen más ó menos á dos teorías principales, la de la *emisión* y la de las *ondulaciones*. Empecemos por la exposición de la primera, llamada también *teoría de la emanación*.

## II

## TEORÍA DE LA EMISIÓN

Según Newton, que fué el primero que redujo á sistema la teoría de la emisión, la luz se forma de moléculas materiales de extraordinaria tenuidad, emitidas á cada momento por los focos luminosos y proyectadas por éstos al espacio con velocidad uniforme, siendo el choque de estas moléculas en la retina el que, impresionando los nervios ópticos, produce la sensación de la luz. Cuando el movimiento de estas partículas las lleva cerca de las moléculas de los cuerpos, quedan sometidas á la acción de fuerzas, ora atractivas, ora repulsivas, produciendo las primeras la refracción y la reflexión interior, y las segundas la reflexión exterior. Hay tantas especies de partículas como de colores, y cada especie está dotada de una refrangibilidad especial.

El conjunto de las partículas sucesivas que siguen la misma línea recta forma lo que se llama un rayo luminoso; pero estas partículas pueden estar separadas por grandes intervalos. En efecto, la impresión en la retina dura cosa de  $\frac{1}{10}$  de segundo; bastaría, pues, que diez partículas luminosas penetrasen en un segundo en nuestro ojo, para que la impresión causada por una de ellas no se borrara antes de la llegada de la segunda, ó lo que es lo mismo, para que hubiese sensación continua; y suponiéndolas espaciadas por igual, se seguirían á 29,800 kilómetros ó á 7,450 leguas de distancia unas de otras. Suponiendo que se suceden en número de 100 por segundo, habría de todos modos 2,980 kilómetros de intervalo de una á otra.

Dada tal hipótesis, se comprende que los rayos luminosos emanados de varios focos puedan cruzarse en todas direcciones sin estorbarse mutuamente. Pero es preciso suponer á la masa de cada uno de dichos focos un valor tan pequeño que apenas puede concebirlo la imaginación. J. Herschel hace con este motivo la comparación siguiente: "Si una molécula de luz pesara un solo grano (0<sup>gr</sup>,065), su efecto sería igual al de una bala de cañón de más de 150 libras (56 kilog.) animada de una velocidad de 305 metros por segundo. ¡Cuál no debe ser, pues, esa tenuidad, si los millones de millones de moléculas que penetran en las lentes ó espejos jamás han podido comunicar el menor movimiento á los aparatos más delicados contruídos expreso para estos experimentos!." (*Tratado de la Luz*, tomo I.)

Acabamos de decir que Newton suponía, para explicar los fenómenos de la refracción y reflexión de la luz, que cada molécula es rechazada ó atraída por las moléculas de los cuerpos. La intensidad de estas fuerzas, que se ejercen en esferas infinitamente pequeñas, es prodigiosa: se ha calculado que excede á la intensidad de la gravedad en la superficie de la Tierra hasta el punto de que para expresar su valor en números sería preciso multiplicar esta última intensidad por la cifra 2 seguida de 44 ceros.

Habiendo considerado Newton la luz como si estuviera formada de partículas sumamente tenues, lanzadas al espacio con enorme velocidad, podría creerse que explicaba los fenómenos de la reflexión asimilándolos á lo que se observa cuando un cuerpo elástico choca con la superficie de un plano duro y bruñido; porque en este caso el cuerpo

es despedido, como el rayo luminoso, formando con el plano un ángulo de reflexión igual al de incidencia. Para los partidarios del sistema de la emisión no sucede esto así; las moléculas luminosas no llegan á ponerse en contacto con los cuerpos que las reflejan (1). Según ellos, á partir de la superficie de incidencia se ejerce una fuerza repulsiva, que tiende á despedir lejos de esta superficie cierto número de las partículas de que se compone cada rayo luminoso incidente. Llegadas á corta distancia de la superficie, dichas partículas experimentan la acción de esta fuerza, y su curso, al principio rectilíneo, tuerce, describe una curva cuya convexidad mira hacia la superficie reflectora para emprender, á partir del punto en que más se acerca á ésta, una marcha precisamente simétrica de la primera mitad de la trayectoria (2). Representando  $Sa$  en tamaño y dirección la velocidad de la molécula luminosa en el momento en que comienza la esfera de actividad de la fuerza repulsiva, se puede descomponer esta velocidad en otras dos: una  $Sm$ , paralela á la superficie, no sufre alteración; otra  $Sp$ , perpendicular al plano de reflexión, está directamente opuesta á la fuerza repulsiva, y por consiguiente será destruída progresivamente por ella. La molécula  $S$  va, pues, á describir una curva

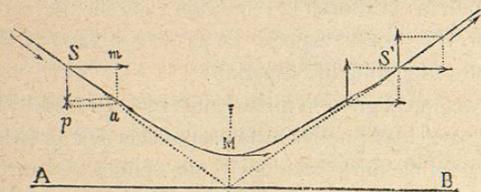


Fig. 544.—Teoría de la reflexión en el sistema de la emisión

acercándose á la superficie hasta el punto  $M$ , en que la resultante de la componente normal y de la fuerza repulsiva será nula. A partir de este punto, la componente paralela y la fuerza repulsiva reunidas van á devolver poco á poco á la molécula luminosa su velocidad inicial; esta molécula describirá al alejarse del plano reflector una curva simétrica de  $SM$ ,  $MS'$ , de suerte que la nueva dirección formará con la normal un ángulo de reflexión precisamente igual al de incidencia.

En el sistema de la emisión, la refracción tiene por causa, no una fuerza repulsiva, sino una atractiva, sin la cual no se hubiera comprendido en efecto cómo el rayo luminoso, no tan sólo penetraba en el nuevo medio, sino que seguía en él una dirección distinta de la dirección incidente, y más inmediata á la normal. En esta hipótesis, la componente normal de la velocidad de la molécula luminosa aumenta progresivamente con la fuerza atractiva, que va creciendo con rapidez á medida que se acerca á la superficie refringente: describe una curva hasta que, en el interior del medio, llega á una

(1) En efecto, Newton había debido suponer que estas moléculas son de excesiva tenuidad, á fin de hacer comprender cómo pueden atravesar libremente las masas de los cuerpos transparentes y llegar á cada momento á herir las delicadas membranas de nuestros ojos sin lastimarlas. Comparadas con las dimensiones de las partículas de la luz, las desigualdades de la superficie de los cuerpos más tersos, los gránulos de polvo que sirven para bruñirlos haciendo desaparecer las asperezas más marcadas, son masas considerables. Por lo tanto, si la luz se reflejara á la manera de los cuerpos elásticos, tocando realmente la superficie del espejo, las moléculas luminosas se desviarían en todas direcciones á causa de las asperezas de esta superficie, y como decía Biot, "la reflexión en los cuerpos mejor pulimentados por nuestro arte apenas sería menos tosca que en los cuerpos más ásperos. Pero siendo en ellos, por el contrario, incomparablemente más abundante, regular y perfecta, esto prueba que las cosas no suceden como en la reflexión mecánica de los cuerpos elásticos, y que las partículas luminosas que se reflejan no llegan hasta ponerse en contacto con los cuerpos."

(2) La componente normal  $Sp$  de la molécula  $S$  disminuye progresivamente por la influencia creciente de la fuerza repulsiva, al paso que la componente paralela  $Sm$  continúa invariable. En  $M$  la primera queda anulada; mas á partir de este punto la fuerza repulsiva restituye en sentido contrario á la molécula su velocidad normal. La ley de la igualdad de los ángulos de incidencia y reflexión se explica por esta simetría de acción de la fuerza repulsiva.

distancia en que la fuerza atractiva obra lo mismo á un lado que á otro. Entonces la molécula continúa su camino en línea recta en su nueva dirección. Fácilmente se comprende que el efecto de la fuerza atractiva produce un aumento en la velocidad de la molécula, puesto que, no habiendo cambiado la componente paralela, la componente normal ha aumentado con toda la intensidad de la atracción. Así pues, en el sistema de la emisión la velocidad de la luz debe ser mayor en un medio refringente cualquiera que en el vacío, y tanto más cuanto más lo sea á su vez el índice de refracción del mismo medio.

Ahora, ¿cómo conciliar la explicación de los fenómenos de la reflexión con la de los de la refracción? Como lo ha dicho Biot, uno de los más distinguidos y persistentes defensores de la teoría newtoniana, estas dos explicaciones parecen contradictorias. La segunda requiere "que la afinidad de las moléculas para con la luz produzca la refracción de los rayos luminosos," al paso que "las mismas moléculas parecen rechazadas por el cuerpo reflector, en lugar de ser atraídas por él."

De aquí la necesidad de formular una nueva hipótesis, que por lo demás le sugirió á Newton la necesidad de explicar otros fenómenos, los de los anillos coloreados en las láminas tenues, fenómeno que en breve describiremos. Esta hipótesis es la de los *accesos de fácil transmisión* y de los *accesos de fácil reflexión*, y consiste en que toda molécula luminosa se halla durante el curso de su propagación en disposiciones alternativas y periódicas. A cada reproducción ó renovación de una de estas disposiciones, la molécula puede ser *fácilmente transmitida*; y en cada intervalo se encuentra por el contrario en disposición de ser *fácilmente reflejada* (1).

Los partidarios de la teoría de la emisión y aun el mismo Newton no han llegado á aclarar de una manera positiva en qué consisten estas disposiciones singulares que hacen que tan pronto sea la fuerza repulsiva como la atractiva la que actúa sobre las moléculas luminosas en el momento en que entran en la esfera de actividad de estas fuerzas opuestas. Por lo demás, no es este el lugar oportuno de exponer íntegramente una teoría que hasta mediados del siglo actual ha tenido partidarios ilustres y que ha bastado largo tiempo para explicar todos los fenómenos de la luz. La teoría de las ondulaciones ha prevalecido definitivamente, habiéndola erigido los magníficos trabajos de nuestro gran Fresnel sobre la sólida base del cálculo, cimentada á su vez en comprobaciones prácticas.

### III

#### TEORÍA DE LAS ONDULACIONES

Por lo general se hace remontar hasta Descartes el origen del sistema de las ondulaciones. Verdet, en sus *Lecciones de óptica*, combate este aserto, al que ha prestado Eulero la autoridad de su crédito, pero que sin duda es erróneo. Hemos visto ya, en efecto, que Descartes tenía por instantánea la transmisión de la luz. El único punto común entre la teoría de las ondas y la de Descartes es la hipótesis de un medio que transmite la luz; mas para él este medio es el *lleno absoluto*. Verdad es que considera

(1) He aquí la definición dada por Newton en su *Tratado de óptica*: "Llamaré accesos de fácil reflexión á las renovaciones de la disposición de un rayo cualquiera á ser reflejado, del propio modo que daré el nombre de *accesos de fácil transmisión* á las renovaciones de su aptitud para ser transmitido, y al espacio que media entre cada renovación y la siguiente, *intervalo de los accesos*."

la luz como efecto de cierto movimiento vibratorio de las partículas de los cuerpos; pero este movimiento no es transmitido por ondas sucesivas, sino que para Descartes es el origen de un impulso que se comunica á cualquier distancia sin ningún intervalo de tiempo.

Aun cuando se advierte algún indicio de la teoría de las ondulaciones en los escritos de Leonardo de Vinci, de Galileo y en una obra de Ango, en realidad le cabe á Huygens el honor de haberla fundado verdaderamente. Eulero, Tomás Young y últimamente Fresnel han completado las apreciaciones de Huygens y fundado sobre bases inquebrantables la verdadera teoría de la luz. Procuremos dar una idea de ella.

El primer principio en que se basa es la existencia en todo el espacio, lo mismo en lo que se llama el vacío interplanetario ó intersidéreo, que entre las moléculas de todos los cuerpos, de un fluido eminentemente elástico que ha recibido el nombre de *éter*. El éter está difundido con uniformidad absoluta en el vacío de toda materia ponderable, de suerte que su densidad en él es constante, y su elasticidad la misma en todos sentidos. Por el contrario, en los medios ponderables, es decir, en los cuerpos sólidos, líquidos ó gaseosos, es posible que la densidad del éter sea distinta de la que posee en el vacío; pero no por eso deja de ser constante, lo propio que su elasticidad, si dichos cuerpos son homogéneos y no cristalizados. En los cristales cuya forma primitiva no es un poliedro regular, la elasticidad varía según la dirección.

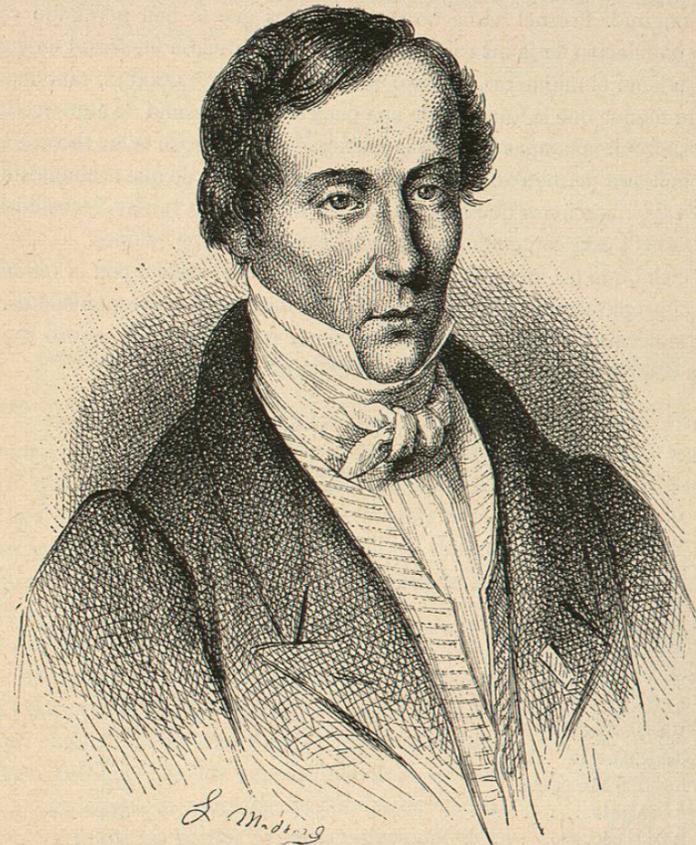
Los manantiales luminosos son cuerpos cuyas moléculas se hallan animadas (en condiciones especiales, como cierto grado de temperatura, combinaciones químicas, etc.) de movimientos vibratorios periódicos de excesiva rapidez. Estas vibraciones se comunican al éter y se propagan por él en forma de ondas que son esféricas en el vacío ó en los medios homogéneos no cristalizados, pero que pueden tener otras formas, ser verbigracia elipsoidales, en los medios en que la elasticidad del éter varía con la dirección, como en ciertos cristales.

Mientras una molécula de éter efectúa una oscilación completa correspondiente á la vibración de origen, su movimiento oscilatorio se comunica sucesivamente á una fila de moléculas semejantes situadas en la dirección de un radio de la esfera. El tiempo necesario para la ida y la vuelta de la molécula etérea es la *duración de la vibración*, y la distancia á que se ha propagado durante este tiempo, es decir, la distancia entre dos moléculas animadas de la misma velocidad de oscilación y en la misma fase oscilatoria es lo que se llama longitud de oscilación ó *longitud de onda*. Por último, la *superficie de la onda* es el conjunto de los puntos en que ocurre en un mismo instante la conmoción luminosa; superficie que es esférica cuando el éter tiene igual elasticidad en todos sentidos en el medio en que la luz se propaga; á gran distancia del foco, claro está que la superficie de la onda se puede considerar como plana.

Las ondas luminosas y las ondas sonoras presentan, bajo ciertos puntos de vista, analogías que se adivinan fácilmente una vez conocidas las definiciones anteriores; unas y otras son efecto de las vibraciones de las moléculas de los orígenes de la conmoción, y como estas vibraciones son isócronas, las ondas lo son también cuando proceden de un sonido ó de una luz simple. La onda sonora se propaga uniformemente, como las luminosas. Las vibraciones sonoras más ó menos rápidas producen sonidos cuyo timbre musical crece á la par del número de ondas que llegan al oído en un mismo intervalo de un segundo. Así también, hay ondas luminosas cuyo período difiere en duración; las más largas ó más lentas corresponden á la parte menos refrangible del espectro ó á los rayos rojos, y cuando cobran mayor rapidez, ó se van acortando, el color de la luz pro-

ducida cambia, pasa del rojo al amarillo, al verde, al azul y al morado, pasando por todos los matices de la faja coloreada que da el análisis prismático de la luz blanca. Así pues, los colores sucesivos vienen á ser los *tonos* de la luz.

Pero si son muchas las analogías que existen entre el sonido y la luz, entre las ondas sonoras y las luminosas, no por eso dejan de ser bastante grandes las diferencias, y algunas de ellas de capitalísima importancia teóricamente consideradas.



AGUSTÍN FRESNEL

En primer lugar, el medio en que se propaga el sonido debe ser siempre un medio ponderable, gaseoso, sólido ó líquido. Las ondas de la luz, por el contrario, nacen y se propagan por el vacío de toda materia ponderable, y cuando penetran en los cuerpos, siempre es el mismo medio elástico más ó menos condensado, el éter, el que las constituye con las oscilaciones periódicas de sus moléculas.

La velocidad de propagación, uniforme y constante, con la cual se transmite una conmoción por un medio elástico, depende, como lo prueba la teoría, de la relación que existe entre la elasticidad del medio y su densidad. En el aire se propagan las ondas sonoras con una velocidad de unos 340 metros por segundo. En el éter del vacío hemos visto que las ondas luminosas recorren, en el mismo espacio de tiempo, 300 millones de metros, distancia casi 900,000 veces tan grande como la primera. De donde resulta que la elasticidad del éter es extraordinaria y su densidad sumamente escasa, ó

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*.

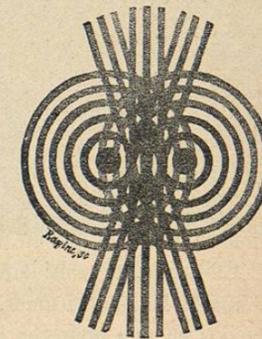


Fig. 545.—Experimento de difracción. Franjas oscuras y franjas brillantes producidas por un sistema de dos pequeñas aberturas circulares.