

La refracción simple polariza también la luz. Malus, Biot y Bréwster lo han descubierto así, cada cual por su parte, en 1811. Se puede comprobar este fenómeno con el aparato de Biot (fig. 571), en el que el cristal I ha sido reemplazado con un prisma de vidrio. Si se da vuelta á éste de modo que el rayo salga perpendicularmente á la cara de emergencia, se ve, girando el analizador I', que el haz presenta después de su reflexión máximos y mínimos de intensidad, pero poco marcados; por lo tanto, la luz se

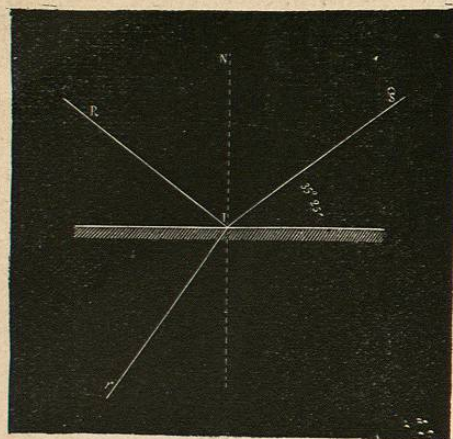


Fig. 572.—Relación entre el rayo polarizado bajo el ángulo de polarización de una substancia y el rayo refractado.

polariza parcialmente. Como el máximum de brillo tiene efecto cuando el plano de incidencia sobre el analizador es perpendicular al plano de incidencia sobre el prisma, vese que en este caso el plano de polarización es perpendicular al de refracción.

Se obtiene un haz completamente polarizado por refracción simple haciéndole atravesar sucesivamente muchas placas de vidrio paralelas bajo un ángulo de $35^{\circ} 25'$ que, según hemos visto, es el ángulo de polarización del vidrio. Estas láminas tenues, muy bruñidas, deben aplicarse unas contra otras, pero sin adherirlas completamente, de modo que quede interpuesta una tenue capa de aire entre dos láminas

contiguas; el aparato así dispuesto se llama *pila de cristales*, y se le usa como polariscopio, poniéndole en el aparato de Biot en lugar del cristal I.

No nos extenderemos más acerca de tan curiosa clase de fenómenos, cuya descripción detallada nos llevaría demasiado lejos, y que para ser bien comprendidos exigirían desarrollos teóricos difíciles. Hemos querido tan sólo iniciar al lector en los hechos fundamentales, en aquellos cuyo descubrimiento ha sido el punto de partida de esta importante rama de la óptica moderna.

III

COLORES DE LA LUZ POLARIZADA

“Examinando en un día sereno una lámina bastante tenue de mica con un prisma de espato de Islandia, vi que las dos imágenes que se proyectaban en la atmósfera no eran de los mismos colores; una era amarillo-verdosa, la otra rojo-purpúrea, al paso que la parte en que las dos imágenes se confundían era del color que tiene la mica á la simple vista. Al propio tiempo reconocí que un leve cambio en la inclinación de la lámina con relación á los rayos que la atraviesan, hace variar el color de las dos imágenes, y que si, dejando subsistente esta inclinación y el prisma en la misma posición, se hace girar la lámina de mica en su propio plano, resultan cuatro posiciones en ángulo recto en que las dos imágenes prismáticas tienen el mismo brillo y son enteramente blancas. Dejando la lámina inmóvil y dando vuelta al prisma, vese también que cada imagen adquiere sucesivamente varios colores, pasando por el blanco á cada cuarto de revolución. Por lo demás, para todas estas posiciones del prisma y de la lámina, cual-

quiera que fuese el color de uno de los haces, el segundo presentaba siempre la tinta complementaria, de suerte que, en los puntos en que no estaban separadas ambas imágenes por la doble refracción del cristal, la mezcla de estos dos colores formaba el blanco.”

En estos términos describe Arago, en una Memoria leída en la Academia de Ciencias el 11 de agosto de 1811, el experimento que le sirvió de punto de partida para una serie de descubrimientos relativos á los fenómenos de coloración de la luz polarizada. Reconoció inmediatamente que la luz transmitida por la lámina de mica era luz polarizada por reflexión en las capas atmosféricas; estando el cielo nublado, cuando la luz que llega de las nubes tiene los caracteres de la natural, las dos imágenes vistas á través de la lámina de mica no presentan el menor indicio de coloración. Así pues, para que ocurra el fenómeno se requiere que la luz que atraviesa la lámina cristalizada se haya polarizado de antemano. Arago puso fuera de duda esta condición por medio

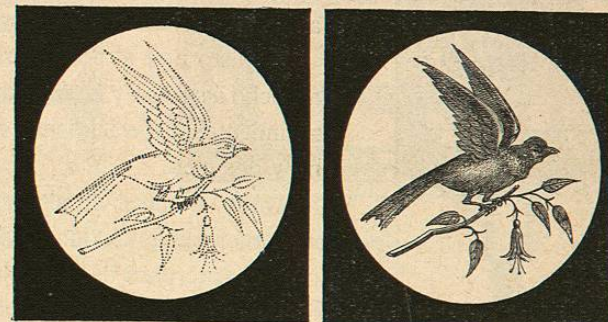


Fig. 573.—Colores de la luz polarizada en las láminas tenues

de muchos experimentos en los cuales recibía en la lámina de mica rayos reflejados por un espejo de vidrio negro; notando entonces que los colores de las dos imágenes observadas con el espato de Islandia eran tanto más vivos cuanto más inmediato al ángulo de polarización del vidrio era el ángulo bajo el que se había reflejado la luz.

Todas las substancias birrefringentes, talladas en láminas tenues paralelamente al eje, disfrutan igualmente de la propiedad de colorar la luz polarizada que las atraviesa; así es que se pueden emplear láminas de yeso (sulfato de cal), de cristal de roca y de espato de Islandia. Pero los espesores de estas láminas que dan los colores varían de una substancia á otra, no obteniéndose imágenes coloradas si este espesor no está comprendido entre ciertos límites. Por ejemplo, una lámina de sulfato de cal debe tener más de $0^{\text{mm}},425$ y menos de $1^{\text{mm}},27$ de espesor; una de mica, menos de $0^{\text{mm}},085$, y una de cristal de roca, menos de $0^{\text{mm}},45$. Es difícil obtener colores con el espato de Islandia, porque el espesor de la lámina no debe exceder de la cuadragésima parte de un milímetro.

La inclinación de la lámina con respecto á la dirección de los rayos polarizados influye en los colores, que varían rápidamente cuando dicha inclinación cambia. Por último, para una misma inclinación de la lámina é igual posición del prisma influye asimismo el espesor en la coloración de las imágenes, y M. Biot ha averiguado que las leyes de variación de estos matices son precisamente las mismas que Newton descubrió con respecto á los anillos de colores de las láminas tenues, obtenidos con la superposición de dos lentes; siquiera los espesores de las láminas birrefringentes, que corresponden á los colores de los varios órdenes de Newton, sean mucho más considerables que los de la capa de aire comprendida entre los lentes.

Hácese uso de esta propiedad del cambio de color de las imágenes según el espesor para producir efectos variados y curiosos. Si, después de pegar sobre vidrio una lámina de yeso, se practica en ésta una cavidad esférica de gran radio, y se la observa en el

aparato de Biot de modo que la luz que llega al ojo después de atravesar la lámina de yeso y el analizador se haya polarizado de antemano, se ve una serie de anillos colorados concéntricos, como los que se notan alrededor del punto de contacto de dos lentes. Grabando en hueco sobre la lámina diferentes objetos como flores, insectos, mariposas, etc., se puede calcular las profundidades del grabado, en ciertos puntos, hasta reproducir los colores vivos y variados de los objetos naturales.

“En otro tiempo se hacía más, decía recientemente M. Bertin en una interesante conferencia sobre la polarización; se aprovechaba esta circunstancia para tributar una especie de homenaje al autor de tan bonitos experimentos, y en medio de una corona de follaje aparecía el nombre de Arago con la fecha de su descubrimiento. Esto sería quizás una adulación mientras aquel grande hombre vivía; mas, ahora que ya no existe, la supresión de este experimento en las cátedras de física es un acto de ingratitud: nos olvidamos de los difuntos por correr tras las mariposas.”

Es justo unir al nombre de Arago el de Bréwster, que ha hecho á su vez y en la propia época casi los mismos descubrimientos, especialmente el de los anillos de colores de uno y dos ejes.

Antes de entrar en algunos detalles sobre tan notables fenómenos, digamos que el vidrio, que en su estado ordinario no es apto para dar los colores observados en las láminas cristalizadas, adquiere esta propiedad por el temple, por la flexión y la compresión y por la acción del calor. Las figuras 574 y 575 presentan algunas de las apariencias ofrecidas en tales circunstancias por placas de vidrio de cierto espesor y de forma rectangular ó cuadrada. Seebeck hizo en 1815 el descubrimiento de estos fenómenos, que son de la misma naturaleza que los acabados de describir. He aquí otro curioso experimento de Biot, referido por M. Daguin en su *Tratado de física*: “Habiendo excitado este sabio vibraciones longitudinales en una tira de vidrio de 2 metros de longitud colocada entre el polariscopio y los polarizadores de su aparato, dispuesto para dar obscuridad, vió que á cada

fricción que hacía brotaba una viva luz, cuyo brillo y color dependían del modo de frotar y del vigor del frotamiento.”

Los colores de la luz polarizada producidos por el paso de un haz de esta luz al través de una lámina tenue cristalizada dependen, según hemos visto, del espesor de la lámina, y varían cuando este espesor varía también. Pero cuando el espesor es el mismo la tinta es uniforme, porque todos los rayos que componen el haz son paralelos, y por lo tanto recorren el mismo espacio por el interior de la lámina.

Si en lugar de un haz se recibe en la lámina polarizada un pincel cónico de luz, de modo que el eje del cono sea perpendicular á la superficie de aquélla, claro está que los rayos recorrerán por el interior del cristal caminos tanto más largos cuanto más disten del eje, y ya no será uniforme la tinta que tome la lámina observada con un analizador. Entonces se ven sistemas de anillos colorados cuyas tintas y formas varían según que el cristal sea de uno ó dos ejes ópticos y según la posición del polariscopio con re-

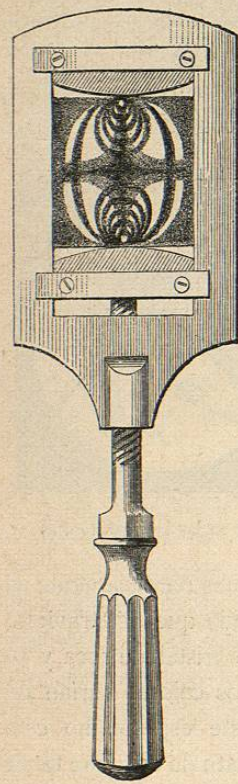


Fig. 574.—Colores de la luz en el cristal comprimido

lación al plano de polarización. Véase cómo se procede para que resulten tan agradables fenómenos.

Cógese una pinza de turmalina, instrumento que consiste en dos anillos metálicos aplicados uno contra otro por un muelle en forma de pinzas y en cada uno de los cua-

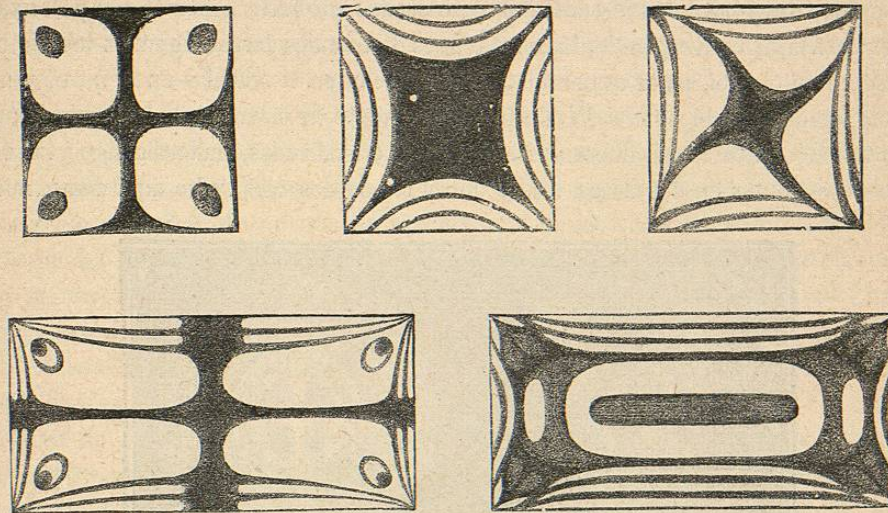


Fig. 575.—Colores de la luz polarizada en el cristal templado

les hay engastada una placa de turmalina; cada una de éstas puede girar en su respectivo anillo, de suerte que es fácil dar todas las posiciones angulares posibles á los ejes de los dos cristales birrefringentes. Entre los dos anillos se interpone la lámina tenue cristalizada, de espato de Islandia por ejemplo, fija en el centro de un disco de corcho mantenido por la presión de los anillos entre las turmalinas. Basta mirar entonces la luz del cielo al través de las tres láminas para ver los anillos de colores. La placa de turmalina, vuelta hacia el cielo, polariza la luz difusa que, después de atravesar esta primera placa, converge hacia el ojo, pasando por la lámina de espato y la segunda turmalina.

Supongamos que se hayan colocado de antemano las dos turmalinas de manera que sus ejes sean perpendiculares; el plano primitivo de polarización será entonces paralelo á la sección principal de la turmalina que sirve de polariscopio, y se verá una serie de anillos concéntricos irisados, atravesados por una cruz negra. Si en este momento se hace girar 90° el polariscopio, los ejes de las turmalinas serán paralelos, y la sección principal de éste formará un ángulo recto con el plano de polarización, siendo sustituida la cruz negra por otra blanca, y presentando los anillos irisados, á iguales distancias del centro, colores complementarios de los que presentaban en el primer experimento. En las posiciones intermedias de los ejes de las turmalinas se pasa gradualmente del primer aspecto al segundo.

Tales son los fenómenos que resultan cuando el observador se vale de la luz blanca. Si se valiera de luz homogénea, de la amarilla por ejemplo, obtendría anillos alternativamente brillantes y oscuros, atravesados por cruces análogas á las que hemos

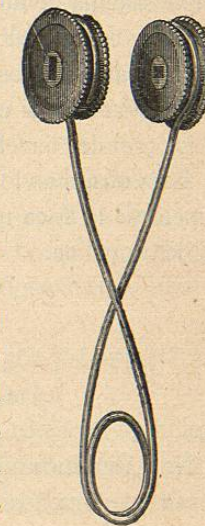


Fig. 576.—Pinzas de turmalina

mencionado en los anteriores experimentos, siendo los brillantes de color amarillo. Si se emplearan los diferentes colores del espectro, los anillos de un mismo orden serían tanto mayores cuanto más refrangibles dichos colores. He aquí por qué los anillos son irisados con la luz blanca, y por qué ocupa el morado, en este caso, el borde exterior del anillo en la primera posición del polariscopio.

Bréwster descubrió en 1813 los anillos colorados producidos por la luz polarizada cuando atraviesa, convergiendo, láminas tenues de cristales birrefringentes; los vió primeramente en el rubí, en la esmeralda, en el topacio, en el cristal y en el nitro, y más adelante los observó el doctor Wollaston en el espató de Islandia. Estudiando Bréwster estos fenómenos en las diferentes substancias cristalizadas, pudo distinguir los cristales birrefringentes en dos clases, los de uno y los de dos ejes, y he aquí cómo: mien-

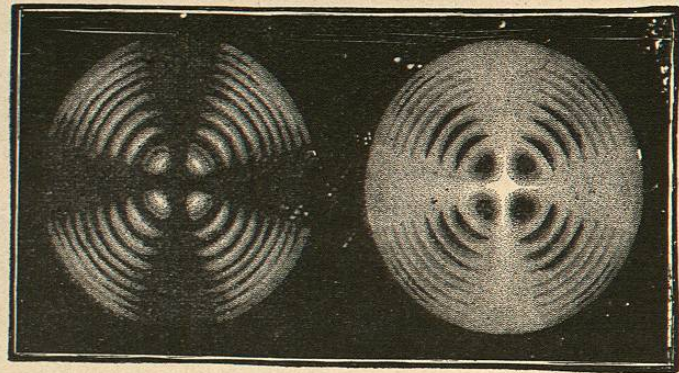


Fig. 577.—Anillos colorados de espató

tras que en el rubí, en la esmeralda y en el espató, por ejemplo, no vió más que un simple sistema de anillos de colores, en el nitro y en el topacio, tallados en cierta dirección y conservados con las pinzas de turmalina, etc., notó dos sistemas de anillos alternativamente oscuros y brillantes si la luz polarizada que los atraviesa es homogénea, é irisados si esta luz es blanca. Este fenómeno fué el que hizo descubrir á Bréwster los cristales birrefringentes de dos ejes.

Para observar los anillos á que aludimos, se talla una lámina de nitro perpendicularmente á la línea media de los dos ejes y se la interpone entre los anillos de las pinzas de turmalina.

IV

DIRECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS VIBRACIONES LUMINOSAS

No pasaremos adelante en la descripción de los fenómenos que produce la luz polarizada, fenómenos de los más interesantes y cuya sola enumeración exigiría muchas páginas. Confesamos que el objeto que nos hemos propuesto al abordar esta parte de óptica consiste mucho más en excitar la curiosidad del lector y en inducirle á profundizar este estudio, que en darle una idea clara de las causas de estos fenómenos, es decir, mostrarle qué explicación se les da en la teoría de las ondulaciones. Sin embargo, no podemos dispensarnos de resumir en breves frases los importantes progresos hechos por la teoría á impulso de los descubrimientos que tan rápidamente se han seguido desde principios del siglo actual.

En uno de los anteriores capítulos hemos visto que los fenómenos luminosos dimanaban del movimiento vibratorio del medio elástico llamado éter. Los fenómenos de interferencia, inexplicables en el sistema de la emisión, tienen por el contrario, en la hipótesis de las ondulaciones, una explicación sencillísima y satisfactoria; pero no nos enseñan nada en lo que respecta al sentido en que se efectúan las vibraciones del éter. Podía suponerse con la misma verosimilitud que las oscilaciones de una molécula tienen efecto, ora en el sentido de la propagación de la luz, ora en dirección paralela á la superficie de las ondas, ó perpendicular al rayo luminoso, ó ya en una dirección cualquiera oblicua á este rayo. Mas al adoptar la primera hipótesis, la que asimila, por decirlo así, las ondas luminosas á las sonoras, era imposible dar perfecta cuenta de la transformación que sufre un rayo luminoso cuando atraviesa un medio birrefringente, ó se refleja bajo cierto ángulo en la superficie de un cuerpo pulimentado. Si las vibraciones son longitudinales, ¿por qué ha de tener el rayo polarizado propiedades particulares en ciertos planos? ¿Por qué pertenecerán exclusivamente estas propiedades á ciertos lados del rayo? Estas objeciones eran un grave ataque á la teoría de las ondulaciones, cuando se le ocurrió á Fresnel sustituir á la hipótesis de las vibraciones longitudinales la de las vibraciones transversales perpendiculares á la dirección de la propagación luminosa. En este caso, un rayo de *luz natural* es aquel en que se efectúan sucesivamente los movimientos vibratorios en todos sentidos en la superficie de la onda, debiendo por lo tanto ser sus propiedades las mismas en todos sus lados. Pero si este rayo llega á atravesar un polariscopio, al salir del medio birrefringente, en lugar de efectuarse en todos sentidos las vibraciones de que se compone, serán paralelas, sin que por eso dejen de verificarse siempre en planos perpendiculares al rayo. El polarizador ha tamizado, por decirlo así, las vibraciones del rayo de luz natural, deteniendo ó destruyendo las unas para no dar paso sino á las que se hallan en el plano de la sección principal. Expresándonos con más precisión, diremos que toda vibración paralela á la sección principal pasa sin alteración al cristal; toda vibración perpendicular queda destruída, y las oblicuas á las dos primeras se descomponen en otras dos, una paralela á la sección principal del polarizador y que pasa; otra perpendicular, que queda detenida. De aquí resultan las propiedades de la *luz polarizada*, que dejamos descritas.

Las consecuencias de la teoría de las ondas, modificada de este modo, son muy numerosas; hasta el presente, todas han sido comprobadas por la experiencia, ó si se quiere, los fenómenos descubiertos por la observación se explican como los deducidos de la teoría, con un rigor que es la sanción más brillante de los principios que constituyen el sistema de las ondas.

Agreguemos ahora unas cuantas líneas acerca de las aplicaciones que se han hecho de la polarización de la luz al estudio de las ciencias físicas y naturales.

Arago se valió de la polarización por doble refracción para construir un aparato fotométrico, basado en la intensidad relativa de las dos imágenes, intensidad cuya ley ha formulado Malus. El mismo sabio ha indicado un medio para distinguir en el mar los escollos ocultos bajo el agua y disimulados por el brillo de la luz reflejada en la superficie. Mirando con un prisma de Nicol, después de colocar verticalmente la sección principal, los rayos reflejados se disipan, y los refractados, únicos que llegan al ojo, revelan la presencia de las rocas sumergidas.

La polarización por reflexión permite también reconocer si la luz que procede de un cuerpo ha sido reflejada en su superficie. Así es cómo se ha comprobado la naturaleza de la luz de los astros, que, como la Luna y los planetas, se limitan sencillamente á en-

viarnos los rayos del Sol, y cómo se ha reconocido que la luz de los núcleos cometarios es en parte la misma del astro solar, puesto que varios observadores han visto indicios de polarización en un plano que pasaba por el Sol y por el núcleo.

La luz del arco iris se polariza en un plano vertical al arco y que pasa por el ojo del observador; y en efecto, más adelante tendremos ocasión de ver que el arco está formado de luz reflejada por las gotitas esféricas de la lluvia. Arago se valió de la polarización por reflexión para averiguar la naturaleza de ciertas piedras preciosas, y habiendo hecho tallar una pequeña faceta en la superficie de una de ellas, determinó el ángulo de polarización y reconoció que era exactamente el del diamante. La polarización cromática es de gran auxilio para el estudio de los cristales, pues merced á ella se puede reconocer si cualquier cristal tiene uno ó dos ejes de simetría, la posición de estos ejes en el cristal, etc.

Por último, el cuarzo y gran número de líquidos, como el agua azucarada, las soluciones de ácido tártrico, la albúmina, gozan de cierta propiedad que los físicos han caracterizado con el nombre de *poder rotatorio*; una placa de cuarzo, tallada perpendicularmente al eje, desvía cierto ángulo el plano de polarización de los rayos que la atraviesan, desviación que es diferente para los rayos de los colores simples. Si la luz polarizada que ha atravesado el cuarzo es luz blanca, los colores que la componen se disiparán en proporciones diferentes, resultando cierta tinta procedente de la mezcla de los rayos que no se han disipado. Este es el fenómeno de la *polarización rotatoria*, descubierto por Arago en 1811 y cuyas leyes ha estudiado Biot experimentalmente.

Estas leyes han proporcionado á la industria un precioso método, la *sacarimetría*, mediante el cual se puede reconocer la cantidad de azúcar puro que contiene una disolución azucarada.

Vese por esto que los fenómenos que al pronto parece que no han de tener nada de interesante sino su teoría, pueden venir á parar en aplicaciones prácticas de gran importancia.

CAPITULO XV

COLORES DE LOS CUERPOS

I

COLORES DE LOS SÓLIDOS Y DE LOS LÍQUIDOS INCANDESCENTES

El análisis espectral de los focos luminosos nos ha hecho ver que en la composición de la luz hay tantos colores ó matices de colores simples como radiaciones contienen dichos focos. Las ondas luminosas producen así en nuestra retina impresiones que pasan á nuestro cerebro produciendo en él la sensación del color, del propio modo que las vibraciones sonoras, más ó menos rápidas, determinan en nosotros la sensación de los sonidos sucesivos, graves con respecto á las ondas cuya propagación es más lenta, agudos relativamente á las que se propagan con mayor rapidez. La serie de vibraciones luminosas perceptibles por nuestros ojos está comprendida entre el rojo más oscuro del espectro solar y el morado extremo; antes ó después de estos colores hay, según hemos visto, vibraciones más lentas como también vibraciones más rápidas; pero

ni las unas ni las otras causan en nosotros sensación de color. Así también no percibe nuestro oído las vibraciones capaces de engendrar el sonido tan luego como su rapidez no llega á cierto límite ó traspasa otro límite superior. Pero las dos escalas limitadas de los sonidos y de los colores se parecen además en que son continuas, pasándose de un extremo á otro por gradaciones insensibles.

Con todo, se ha hecho notar con razón una diferencia entre los sonidos y los colores, la cual consiste en lo siguiente: Nuestro oído distingue perfectamente cada una de las sensaciones que corresponden á sonidos simultáneos: el conjunto de éstos, aun en el caso de que entre ellos existan las relaciones necesarias para que formen acordes armónicos, no produce una sola sensación, y los oídos menos ejercitados reconocen que hay, no un sonido único, sino simultaneidad de varios. En cambio, cuando la reunión de muchos colores ó sea de las radiaciones de varias longitudes de onda llega á herir á la vez nuestra retina, no producen en ella sino un solo color. Por ejemplo, el conjunto de todas las radiaciones que constituyen la luz solar, la unión de todos los colores del espectro de matices infinitos, produce en nosotros la sensación del color ó de la luz blanca, sin que nada nos haga sospechar que haya simultaneidad y multiplicidad de radiaciones.

Consideremos varios focos de luz, ya sean artificiales ó ya naturales, y comparemos la sensación que en nosotros excitan, en cuanto al color respecta, con la que nos produce la luz blanca del Sol, ó con los matices del espectro ó con sus asociaciones: esta comparación nos inducirá á clasificar estos focos en varias categorías, en luces blancas y de colores, en luces compuestas y simples ú homogéneas. Por otra parte, el análisis espectral de dichos focos nos da á conocer la razón de su coloración particular, fundada en el predominio de tales ó cuales radiaciones, de estas ó de las otras rayas brillantes en el espectro de su luz.

Ciertas luces tienen un parecido más ó menos perfecto con la del sol, como, por ejemplo, la del magnesio, la del arco voltaico y la de los metales en fusión. Ya se comprenderá que al decir esto nos referimos á su parecido general y no á las particularidades que indica el análisis, como las rayas oscuras que surcan el espectro de la luz solar. Pues bien, el carácter común á todas las luces blancas es el de tener por origen la reunión de ondas de todos los grados posibles de refrangibilidad entre los límites de las longitudes de onda que pertenecen á la parte luminosa del espectro; por lo menos no presentan sino algunos espacios vacíos sumamente apiñados.

El color de un sólido incandescente depende de la temperatura, y así lo hemos comprobado ya al hablar de las tintas que toma el platino, desde el rojo oscuro que corresponde á una temperatura de 60°, hasta el blanco deslumbrador que representa la de 1,500°. Pero lo que hay de particular en este aumento del número de radiaciones es que se verifica de un modo continuo, sin solución de continuidad y en una extensión sucesiva de la menor á la mayor refrangibilidad. Por lo regular, no sucede lo mismo con la luz de los vapores ó de los gases incandescentes. Entremos en algunos detalles referentes á ellos.

II

COLORES DE LAS LLAMAS

Un pedazo de metal, de platino por ejemplo, calentado hasta tornarse luminoso, no emite al principio sino rayos muy poco refrangibles correspondientes á la parte roja del espectro, y por consiguiente á las vibraciones luminosas más lentas. Si se eleva la