

Este prisma consiste en un largo cristal de espató de Islandia cortado en dos por un plano perpendicular á la seccion principal: los dos fragmentos, puestos de nuevo en su posicion primitiva, se pegan con bálsamo del Canadá. Como el índice de refraccion de esta sustancia es menor que el del rayo ordinario del espató y mayor que el del extraordinario, síguese de aquí, conforme se demuestra rigurosamente y

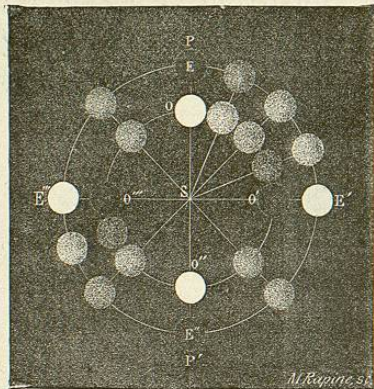


Fig. 157.—Desdoblamiento del rayo ordinario. Intensidades variables de las imágenes del haz polarizado

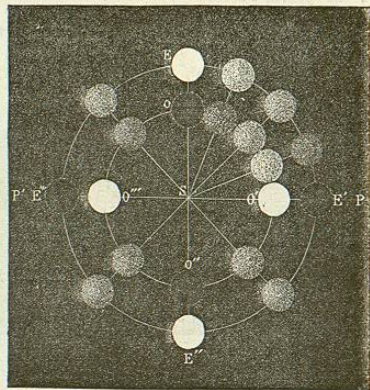


Fig. 158.—Desdoblamiento del rayo extraordinario. Intensidades de las imágenes del haz polarizado

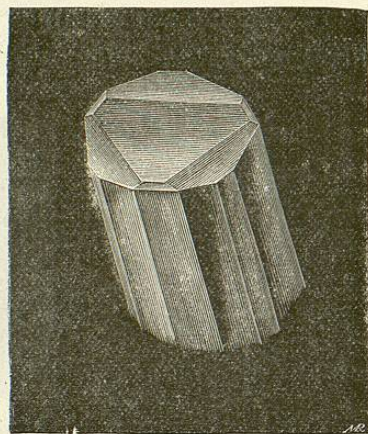


Fig. 159.—Turmalina de Siberia

Nicol para reproducir el experimento de Huygens: claro está que nunca se obtendrán más que dos imágenes, ó sea las que provienen del rayo emergente, es decir, del rayo extraordinario polarizado por el primer prisma. Si las secciones principales de los dos prismas son paralelas, una de las dos imágenes, la ordinaria, desaparece; la otra, la extraordinaria, presenta su brillo máximo; si dichas secciones están en ángulo recto, ambas imágenes desaparecen, por cuanto la ordinaria, que debería tener su máximo de intensidad, sufre la reflexión total, y la intensidad de la extraordinaria es nula. El primer prisma, el que recibe el rayo de luz natural, es el *nicol polarizador*, y el otro el *nicol analizador*.

Hay un cristal natural que posee la propiedad del prisma de Nicol, de no dar paso al rayo extraordinario; este cristal es la turmalina que cuando tiene cierto espesor absorbe fuertemente el rayo ordinario. Biot descubrió en 1815 tan notable propiedad, que nos permitirá presentar, tomándolo de J. Herschel, un nuevo ejemplo de polarización de la luz por doble refracción.

«Cuando se exfolia con una rueda de lapidario un prisma de turmalina desprendiendo de él hojas ó láminas paralelas al eje y de un espesor

la experiencia lo confirma, que si un rayo de luz penetra en el sentido de la longitud del cristal y se divide allí en dos por efecto de la doble refracción, el rayo ordinario experimenta la reflexión total en la superficie del bálsamo del Canadá, mientras que el extraordinario pasa sólo por la segunda mitad del cristal y sale por la cara opuesta.

Supongamos que se empleen dos prismas de

uniforme como de un vigésimo de pulgada ($1^{\text{mm}} 27$), se da á estas láminas el pulimento conveniente. Entónces aparecen al través de ellas los objetos luminosos como si se los mirara con un cristal de color. Supongamos una de estas láminas interpuesta perpendicularmente entre el ojo y una bujía: se verá á ésta con igual facilidad en todas las posiciones del eje de la lámina relativamente al horizonte. Si se da vuelta á la lámina en su propio plano, no se nota cambio alguno en la imagen de la vela. Dando entónces á dicha lámina una posición fija (por ejemplo, colocando su eje verticalmente), se interpondrá entre ella y el ojo otra lámina á la que se hará girar poco á poco en su propio plano, lo cual producirá un fenómeno muy curioso. La bujía será sucesivamente visible é invisible á cada cuarto de revolución de la lámina, pasando por todos los grados de claridad, desde cierto máximo hasta una oscuridad total ó casi total, despues de la cual la claridad aumentará del propio modo que haya disminuido. Ahora bien, si se mira con atención la posición de la segunda lámina con relación á la primera, se verá que los máximos de claridad ocurren cuando los ejes son paralelos, es decir cuando están dispuestos como lo estaban

ordinariamente en el cristal, ó cuando entre sus posiciones media una diferencia de 180° . Por el contrario, los mínimos ocurren cuando los ejes se cruzan exactamente en ángulos rectos. En esta posición, la luz se detiene totalmente si la lámina en particular sea de perfecta trasparen-

cia, su combinación es enteramente opaca.» (Herschel, *La Luz*.)

Como se ve, el haz de luz natural que ha atravesado una lámina de turmalina se polariza, como el que emerge de un cristal de espató de Islandia. Por consiguiente, no tiene en todas sus partes, en todas sus caras, si podemos

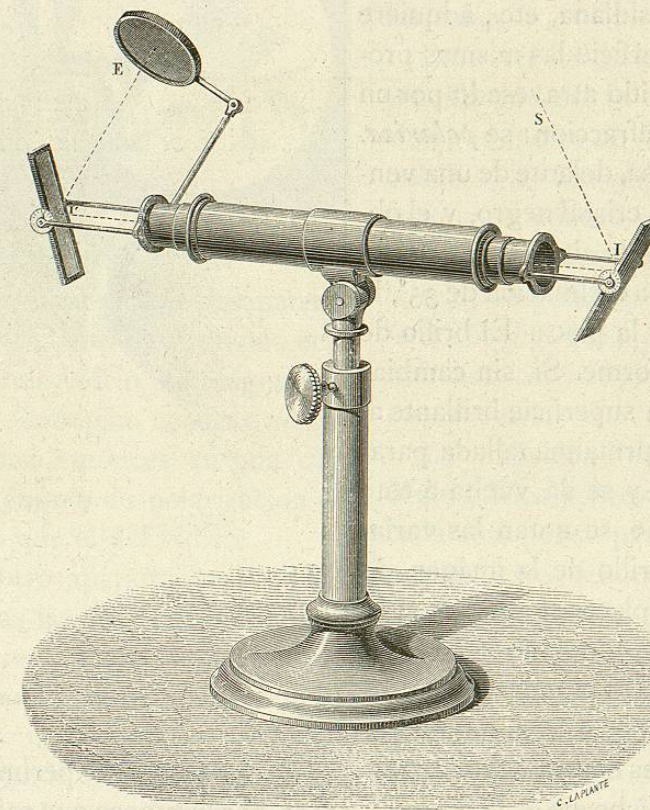


Fig. 160.—Polariscopio de Malus perfeccionado por Biot

expresarnos así, las mismas propiedades, á lo ménos por lo que respecta á su brillo. Vamos ahora á ver que la doble refracción no es el único medio de transformar la luz natural en luz polarizada.

II

POLARIZACION POR REFLEXION

El físico francés Malus, que tanta celebridad adquirió por sus notables trabajos sobre óptica, contemplaba por casualidad cierto día de 1808, á través de un cristal de espató de Islandia, la imagen del sol poniente reflejada en las vidrieras del palacio del Luxemburgo, cuando notó con sorpresa que haciendo girar el prisma, las dos imágenes cambiaban de intensidad; la más refractada era alternativamente más ó ménos brillante que la otra á cada cuarto de revolución. Analizando minuciosamente este fenóme-

no descubrió que basta la reflexión bajo ciertos ángulos para dar al rayo reflejado las mismas propiedades que posee el rayo que atraviesa un cristal birefringente como el espató de Islandia. El experimento de Huygens, cuya teoría en vano trataron de formular el mismo Huygens y Newton, no fué ya un fenómeno aislado, y esforzándose Malus por relacionarla con una misma explicación deducida de la teoría de Newton, vino á dar el nombre de polarización de la luz á la modificación sufrida por los rayos luminosos en los experimentos que dejamos mencionados. Tres años despues, en 1811, Malus, Biot y Brewster descubrieron cada cual de por sí la polarización por refracción simple, y Arago la cromática, y desde entónces, una multitud de casos nuevos, relativos á ciertas modificaciones singulares de los haces luminosos, contribuyeron, juntamente con los fenómenos susodichos, á formar una de las ramas más

interesantes de la ciencia, tan fecunda por su teoría como por sus aplicaciones prácticas. Como los límites y la naturaleza elemental de esta obra no nos permiten descender á largos detalles, nos limitaremos á describir los más notables de estos fenómenos.

Cuando un haz de luz natural cae oblicuamente sobre un espejo no metálico, de cristal negro, de mármol, de obsidiana, etc., adquiere por la reflexión en la superficie las mismas propiedades que si hubiera sido atravesado por un cristal dotado de doble refracción: se *polariza*.

Se coloca sobre una mesa, delante de una ventana abierta, una placa de cristal negro, y el observador se sitúa en seguida de modo que reciba oblicuamente, con una inclinación de 35° , la luz del cielo reflejada por la placa. El brillo de ésta parece entonces uniforme. Si, sin cambiar de posición, se observa la superficie brillante al través de una lámina de turmalina tallada paralelamente á su eje óptico, y se da vuelta á esta lámina en su propio plano, se notan las variaciones siguientes en el brillo de la imagen de las nubes formada en la placa de cristal: si el eje de la turmalina está en un plano vertical la imagen brillante desaparece; la placa de vidrio parece cubierta de una especie de nube oscura, y el centro de la mancha es enteramente negro. Cuando por el contrario, dicho eje es horizontal,

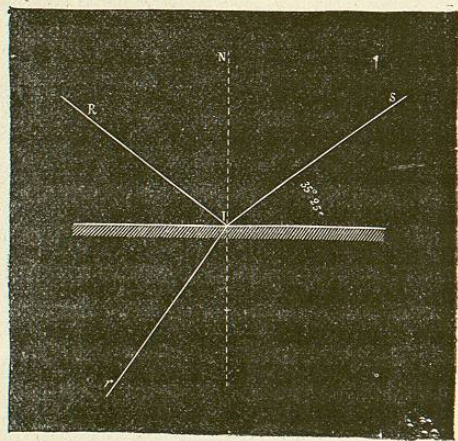


Fig. 161.—Relación entre el rayo polarizado bajo el ángulo de polarización de una sustancia y el rayo refractado

es decir, paralelo á la placa de vidrio, la mancha desaparece completamente; por último, en las posiciones intermedias de la turmalina, el brillo de la imagen va aumentando gradualmente de la primera posición á la segunda.

Si el analizador es un prisma de Nicol en vez de una lámina de turmalina, las variaciones de

brillo de la imagen se sucederán del mismo modo, y llegarán á su minimum cuando la sección principal del prisma sea vertical y á su maximum cuando dicha sección esté en ángulo recto con la primera de sus posiciones.

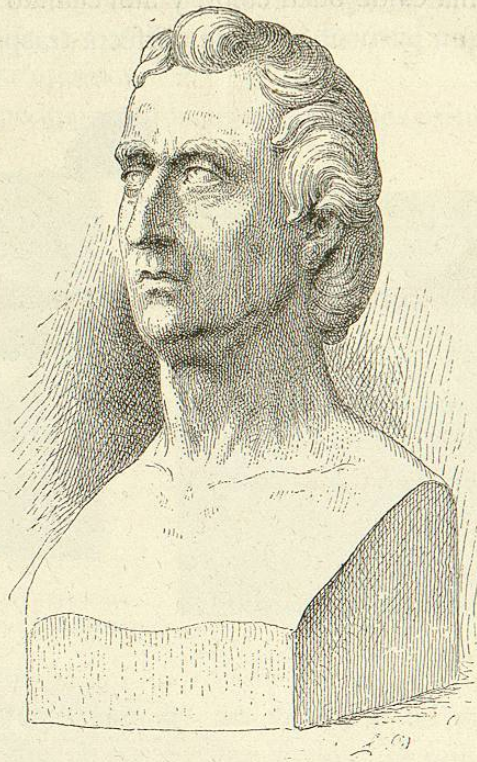


Fig. 162.—Francisco Arago

De estos dos experimentos se deduce que todo haz luminoso que caiga con una inclinación de $35^\circ 25'$ (ó lo que es lo mismo con una incidencia de $54^\circ 33'$) sobre una placa de cristal negro, se polariza, después de su reflexión, en el plano mismo de esta reflexión. Dicho ángulo de $54^\circ 35'$ es lo que se llama ángulo de polarización del cristal; aquel respecto al cual el rayo reflejado puede ser enteramente extinguido por el polariscopio analizador, lo cual se expresa diciendo que el rayo se ha polarizado completamente. Cuando el ángulo de incidencia es de distinto valor, la imagen del haz no se extingue por completo, y el rayo reflejado se polariza parcialmente.

El ángulo de polarización varía según sean las sustancias reflectoras, y es por ejemplo de $52^\circ 45'$ para el agua, de $56^\circ 3'$ para la obsidiana, de $58^\circ 40'$ para el topacio y de $68^\circ 2'$ para el diamante. Brewster ha ideado un experimento muy curioso para hacer patente la diferencia á que aludimos entre los ángulos de polarización de dos sustancias, como por ejem-

plo, el vidrio y el agua. Pone una placa de vidrio de modo que reciba y refleje un haz de luz con una incidencia de $54^\circ 35'$, que según acabamos de decir, es el ángulo de polarización de dicha materia; y en seguida observa el haz reflejado

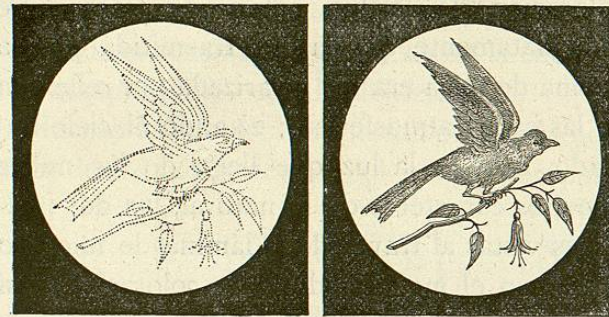


Fig. 163.—Colores de la luz polarizada en las láminas ténues

con un analizador de manera que desaparezca toda luz. Si en este momento una persona echa el aliento en la placa de vidrio, la imagen aparece de nuevo. Este fenómeno consiste en que la reflexión se verifica entonces en una capa acuosa, y en que el ángulo de polarización del agua no es el mismo que el del vidrio.

Malus ha ideado otro aparato con el cual se pueden estudiar todas las propiedades de la luz polarizada por reflexión. Aparte de las que acabamos de describir, indicaremos también las que caracterizan á dicha luz cuando se refleja al caer sobre una segunda placa reflectora. La figura 160 representa el aparato de Malus, modificado y perfeccionado por Biot, I es la placa bruñida destinada á polarizar el rayo de luz SI por su reflexión en la superficie de la placa; en seguida se ve un tubo dado de negro por dentro, provisto de diafragmas y por cuyo eje pasa el rayo reflejado y polarizado II'. Este cae al salir del tubo sobre una placa I' de vidrio negro, se refleja en ella de nuevo, y va á parar al ojo ó á formar una imagen en una pantalla E. Los marcos que sostienen las dos placas reflectoras pueden girar al rededor de un eje perpendicular al del tubo, de modo que sus planos formen con este último todos los ángulos posibles; además, se puede dar vuelta á cada placa en una de sus posiciones alrededor del eje mismo del tubo; de suerte que en definitiva, para una incidencia dada del rayo luminoso sobre la primera placa, se puede hacer variar como se quiera el ángulo de incidencia del rayo reflejado sobre la otra placa, y el del segundo plano de reflexión con el primero.

Con este aparato se ve que el maximum de brillo de la imagen se presenta cuando los dos planos de reflexión coinciden, y el minimum cuando estos planos están en ángulo recto. Además, el rayo se extingue completamente cuando el ángulo de incidencia en cada uno de estos espejos es de $35^\circ 25'$, con tal que el haz no sea de gran intensidad, como sucede con la luz solar.

Brewster ha dado á conocer una ley muy sencilla que existe entre el ángulo de polarización y el índice de refracción de la sustancia que polariza la luz por reflexión, de modo que cuando se conoce uno de estos elementos, es fácil deducir el otro. Esta ley es la expresión de la relación geométrica siguiente: *El rayo reflejado IR (fig. 161), polarizado bajo el ángulo de polarización, y el rayo refractado I'r forman un ángulo recto.*

La refracción simple polariza también la luz. Malus, Biot y Brewster lo han descubierto así, cada cual por su parte, en 1811. Se puede comprobar este fenómeno

con el aparato de Biot (fig. 160), 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 polariza parcialmente. Como el maximum de brillo tiene efecto cuando el plano de incidencia sobre el analizador es perpendicular al plano de incidencia sobre el prisma,

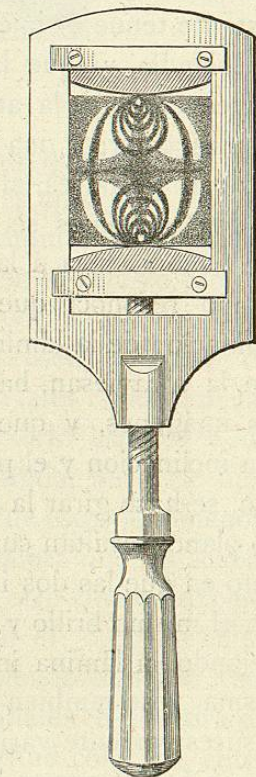


Fig. 164.—Colores de la luz en el cristal comprimido

vése 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 espató de Islandia, ví que las dos imágenes que se proyectaban en la atmósfera no eran de los mismos colores; una era amarilla 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, véase 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, cualquiera 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 al 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 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 espató 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 sustancias birefringentes, 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 espató de Islandia. Pero los espesores de estas láminas que dan los colores varían de una sustancia á otra; no obteniéndose imágenes coloreadas 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 espató 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 birefringentes, que corresponden á los colores de los varios órdenes de Newton, sean mucho más considerables que los de la capa de aire comprendida entre las 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 coloreados concéntricos, como los que se notan alrededor del punto de contacto de dos lentes. Grabando en hueco sobre la lámina

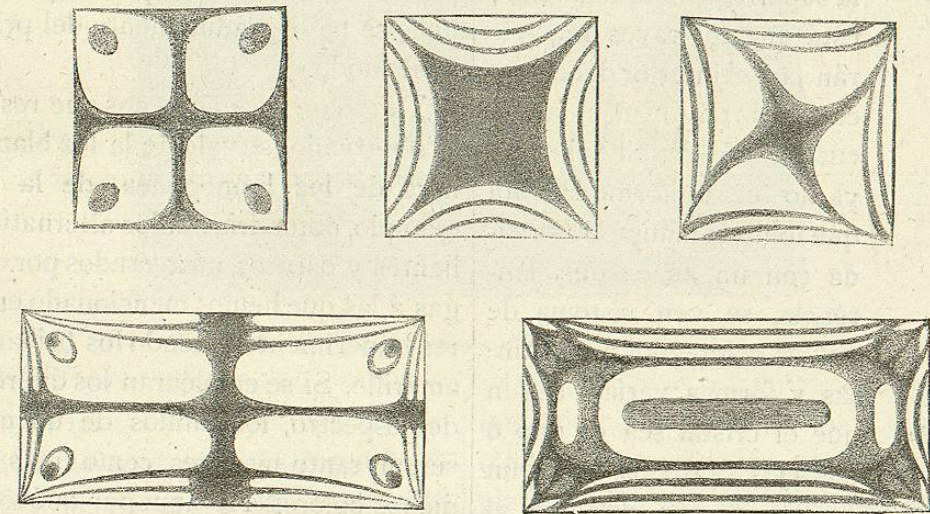


Fig. 165.—Colores de la luz polarizada en el cristal templado

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 Brewster, 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 164 y 165 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. Hé aquí otro curioso experimento de Biot, referido por M. Daguin en su *Tratado de Física*: «Habiendo excitado estas 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 oscuridad, vió que á cada fricción 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