

## CAPÍTULO XIV

## POLARIZACIÓN DE LA LUZ

## I

## POLARIZACIÓN DE LA LUZ POR DOBLE REFRACCIÓN

Cuando se observa un objeto luminoso al través de un cristal dotado de doble refracción, verbigracia de un romboedro de espato de Islandia, se ven, según ya sabemos, dos imágenes distintas, una llamada ordinaria, que sigue las leyes de la refracción simple, y otra extraordinaria, cuyas propiedades hemos indicado en los artículos anteriores.

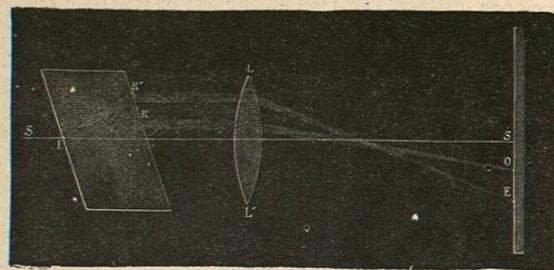


Fig. 564.—Propagación de las imágenes ordinaria y extraordinaria de un cristal birrefringente. Igualdad de intensidad

Reconócese fácilmente esta última en que gira alrededor de la otra cuando se imprime al cristal un movimiento de rotación en un plano paralelo á las caras de incidencia y de emergencia de los rayos. Ahora importa observar que, en todas estas posiciones, no varía la intensidad relativa de las dos imágenes; el brillo de cada una es la mitad menos que el del objeto luminoso, como es fácil comprobarlo observándolo directamente. Supongamos que se examina un circulito blanco sobre fondo negro. Dondequiera que las dos imágenes ordinaria y extraordinaria del punto están separadas, presentan una tinta cenicienta de igual intensidad, y el brillo es igual al del objeto allí donde ambas imágenes se sobreponen. Por último, ocurre siempre el mismo fenómeno, cualesquiera que sean los colores respectivos del objeto y del fondo.

Hácese también el mismo experimento en las cátedras, dejando llegar un haz de luz al cristal y recibiendo los dos haces refractados en una lente convergente: las dos imágenes se proyectan en una pantalla (fig. 564). Si se da entonces vuelta al cristal paralelamente á la cara de incidencia, las dos imágenes se separan describiendo cada cual una circunferencia, y se ve que en cualquier posición su intensidad luminosa es igual. Si se hace de modo que las dos imágenes se sobrepongan en parte, el brillo de las porciones sobrepuestas será doble del que tienen las separadas, como se ve en la figura 565.

Un bonito y antiguo experimento hecho por Huygens nos probará que los haces luminosos que salen del espato de Islandia adquieren nuevas y notables propiedades después de la desviación en el medio cristalizado, propiedades que no tenía el haz luminoso antes de pasar por el cristal. Este experimento consiste en recibir en un segundo cristal los rayos ordinario y extraordinario después de su salida del primer romboedro,

Reconócese fácilmente esta última en que gira alrededor de la otra cuando se imprime al cristal un movimiento de rotación en un plano paralelo á las caras de incidencia y de emergencia de los rayos. Ahora importa observar que, en todas estas posiciones, no varía la intensidad relativa de las dos imágenes; el brillo de cada una es la mitad menos que el del objeto luminoso,

y en examinar las intensidades relativas de las imágenes que de ello resultan cuando se varía la orientación del segundo cristal alrededor del haz emergente. El medio más sencillo de observar los fenómenos que entonces ocurren, medio empleado por el mismo Huygens, es el siguiente: Coloquemos un primer cristal sobre un punto negro en medio de un fondo blanco, y veremos dos imágenes de igual intensidad. Pongamos ahora otro espato de Islandia sobre el primero, y de tal modo que sus secciones principales coincidan; uno de los medios de realizar esta condición consiste en colocar las caras del uno paralelamente á las del otro, y siempre resultarán dos imágenes, de la misma intensidad que antes, sólo que estarán más separadas que con un solo cristal. Lo propio sucedería, aun cuando las dos caras de los cristales puestas frente á frente no conservasen su paralelismo, con tal que las secciones principales de los dos romboedros continuaran en el mismo plano ó en planos paralelos, no siendo tampoco necesario que, en la primera posición, dichos romboedros se toquen.

Tenemos ya una diferencia entre el rayo luminoso antes de su refracción en el espato de Islandia y cada rayo emergente ordinario ó extraordinario, pues al paso que el primero se bifurca al penetrar en el cristal, parece que cada uno de los otros dos sigue siendo simple cuando penetra en el segundo cristal. Prosigamos nuestro estudio.

Hagamos ahora girar lentamente el cristal superior, de modo que la sección principal forme con la del primero ángulos cada vez mayores. Entonces se verán aparecer cuatro imágenes: cada una de las dos primeras se duplicará, pero sin conservar la igualdad de intensidad que caracterizaba á éstas.

De dichas cuatro imágenes, situadas en los vértices de un rombo de lados constantes, pero de ángulos variables, dos proceden de la doble refracción del rayo ordinario que sale del cristal superior; las otras dos, de la doble refracción del rayo extraordinario. Pero hay una diferencia importante y es que por lo regular cada par se caracteriza por cierta diferencia en la intensidad luminosa de las imágenes. La figura 566 representa sus posiciones y sus intensidades relativas con respecto á los ángulos, comprendidos entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , de las secciones principales de los dos cristales. Si estas secciones son de ángulo recto, no se ven más que dos imágenes; si lo forman de  $180^\circ$ , sucede otro tanto á menos que las dos imágenes se sobrepongan por ser los cristales del mismo espesor; en este último caso, efectuándose en opuesto sentido las desviaciones operadas con cada cristal, no aparece más que una sola imagen.

Resulta ya de este primer experimento que todo rayo de luz que ha atravesado un cristal dotado de doble refracción no disfruta, después de su paso, de las mismas propiedades en todos sentidos; pues en ciertas direcciones no es ya susceptible de sufrir otra bifurcación, y en otras, los dos haces en que se divide no poseen la misma intensidad luminosa. Para caracterizar estas nuevas propiedades, se dice que la luz que ha atravesado un cristal birrefringente es *luz polarizada* (1).

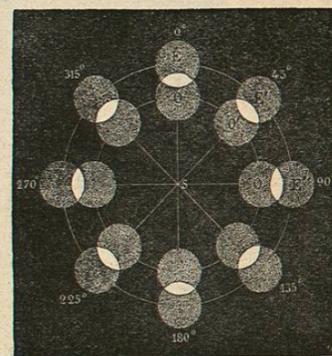


Fig. 565.—Igualdad de la intensidad de las imágenes ordinaria y extraordinaria en la doble refracción.

(1) Malus fué quien "dió el nombre de *polarización* á esta singular modificación de la luz, en virtud de una hipótesis que había ideado Newton para explicar el fenómeno: este gran geómetra suponía que las mo-

Pero importa mucho precisar los fenómenos que acabamos de describir. Para ello supongamos que se haga llegar a un cristal de espato islándico cuya sección principal es vertical, un haz de luz solar SI (fig. 567). Este haz se divide en el plano de la sección en dos haces, uno ordinario IR, y otro extraordinario IR'. Interceptemos uno de ambos con una pantalla y dejemos pasar el otro al través de un segundo espato de Islandia: al atravesarlo, el haz luminoso experimentará las más de las veces la doble refracción, se dividirá en dos haces, I', R<sub>1</sub>, que es el ordinario, é I'', R'<sub>1</sub>, que es el extraordinario. Finalmente, por medio de un lente proyectemos los haces emergentes en una pantalla. Veamos qué sucederá si se gira el segundo cristal de modo que se haga formar a su sección principal todos los ángulos posibles con la del primero, de 0° a 360°.

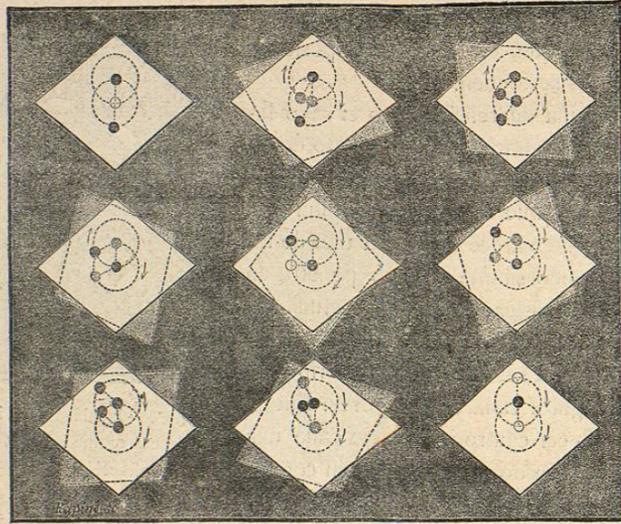


Fig. 566.—Experimento de Huygens. Variaciones de intensidad de imágenes procedentes de dos haces polarizados por doble refracción

La figura 568 muestra cuáles son las intensidades relativas de las dos imágenes, si el rayo ordinario emergente del primer cristal es el que ha atravesado el segundo; la figura 569 muestra por el contrario lo que son estas intensidades cuando se hace pasar al segundo espato islándico el rayo extraordinario salido del primero.

En resumen, un haz de luz natural ha penetrado en el primer espato de Islandia donde sufre la doble refracción, y cada uno de los haces que sale de él tiene propiedades particulares que se caracterizan diciendo que se ha *polarizado*, por cuya causa el primer cristal recibe el nombre de *polarizador*: el segundo cristal ha servido para analizar las propiedades que la polarización ha hecho adquirir a cada haz: es el cristal *analizador*.

Al pasar el rayo *ordinario* al analizador se divide en dos rayos cuya intensidad varía según el ángulo que forma la sección principal del segundo cristal con la del pri-

léculas luminosas tienen dos clases de polos, ó más bien de caras, que gozaban de distintas propiedades físicas; que en la luz ordinaria las caras de igual especie de las varias moléculas luminosas están vueltas en todas direcciones, pero que por la acción del cristal unas se dirigen paralela y otras perpendicularmente a su sección principal, y que el género de refracción que experimentan las moléculas luminosas depende de la dirección que tienen sus caras relativamente a la sección principal. (Fresnel.)

mero y que da dos imágenes, una ordinaria y otra extraordinaria. Si este ángulo es de 0° ó de 180°, la imagen ordinaria es la única que existe con su intensidad máxima, pues la extraordinaria ha desaparecido; si es de 90° ó 360°, la imagen extraordinaria tiene su mayor brillo, por haber desaparecido la otra. En posiciones intermedias en que la segunda sección principal forma con la primera ángulos de 45°, las dos imágenes tienen la misma intensidad. Por último, en las demás posiciones relativas de las seccio-

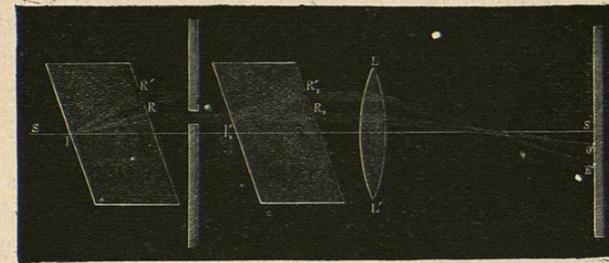


Fig. 567.—Polarización del rayo ordinario por doble refracción

nes principales de los cristales hay desigual intensidad en una ú otra imagen, y entonces se dice que el rayo ordinario se ha *polarizado* en el plano de la sección principal, dándose a éste el nombre de *plano de polarización*. Ahora, como el segundo rayo, el extraordinario, experimenta las mismas modificaciones al pasar al analizador, con la diferencia esencial de que siempre hay una de 90 grados en las posiciones relativas de

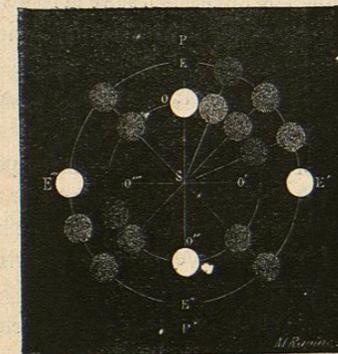


Fig. 568.—Desdoblamiento del rayo ordinario. Intensidades variables de las imágenes del haz polarizado.

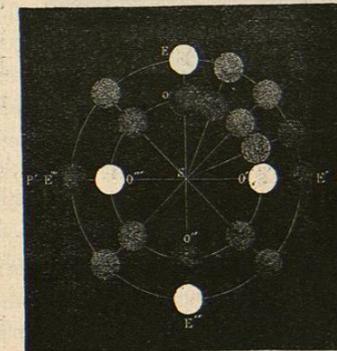


Fig. 569.—Desdoblamiento del rayo extraordinario. Intensidades de las imágenes del haz polarizado.

las secciones principales, dicese que está *polarizado* en un plano perpendicular al primer plano de polarización. El plano de polarización forma un ángulo recto con la sección principal del cristal polarizador. En una palabra, los dos rayos, el ordinario y el extraordinario, procedentes de un rayo de luz natural que ha sufrido una doble refracción, se *polarizan en ángulo recto*.

Del mismo modo se verifica en todos los cristales birrefringentes la polarización por reflexión, tal como acabamos de estudiarla en el espato de Islandia; pero no es siempre fácil observarla a causa de la escasa separación de los haces ordinarios y extraordinarios. Aun con el espato mismo se requieren cristales de cierto espesor para que sea fá-

cil interceptar uno de ellos con una pantalla. Así es que para conseguir esta separación de los haces polarizados se han ideado aparatos más cómodos, de los cuales describiremos el *prisma de Nicol*.

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



Fig. 570.—Turmalina de Siberia

Supongamos que se empleen dos prismas de 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 uniforme como de un vigésimo de pulgada ( $1^{mm},27$ ), se da á estas láminas el pulimento conveniente. Entonces 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 entonces 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 obscuridad total ó casi total, después de la cual la claridad aumentará del propio modo que haya disminuído. Ahora bien, si se mira con atención la po-

sición 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  $180^\circ$ . 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 turmalina es de buen color, y aun cuando cada lámina en particular sea de perfecta transparencia, 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 espato de Islandia. Por consiguiente, no tiene en todas sus partes, en todas sus caras, si podemos expresarnos así, las mismas propiedades, á lo menos 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

### POLARIZACIÓN POR REFLEXIÓN

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 espato 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 menos brillante que la otra á cada cuarto de revolución. Analizando minuciosamente este fenómeno, descubrió que basta la reflexión bajo ciertos ángulos para dar al rayo reflejado las mismas propiedades que posee el rayo que atraviesa un cristal birrefringente como el espato 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 después, en 1811, Malus, Biot y Bréwster descubrían cada cual de por sí la polarización por refracción simple, y Arago la cromática, y desde entonces, 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  $35^\circ$ , 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, 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 mínimum

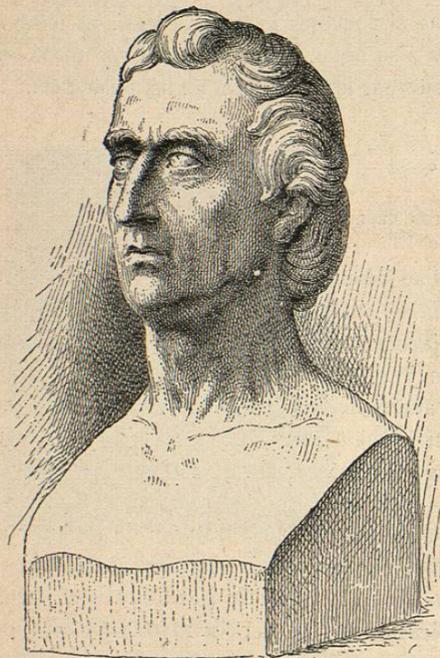
cuando la sección principal del prisma sea vertical, y á su máximum cuando dicha sección está en ángulo recto con la primera de sus posiciones.

De estos dos experimentos se deduce que todo haz luminoso que caiga con una inclinación de  $35^{\circ} 25'$  (  lo que es lo mismo con una incidencia de  $54^{\circ} 35'$ ) sobre una placa de cristal negro, se polariza, después de su reflexión, en el plano mismo de esta reflexión. Dicho  ngulo 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  ngulo 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. Br wster ha ideado un experimento muy curioso para patentizar la diferencia   que aludimos entre los ángulos de polarización de dos sustancias, como, por ejemplo, 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 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   dicha luz cuando se refleja al caer sobre una segunda placa reflectora. La figura 571 representa el aparato de Malus, modificado y perfeccionado por Biot. I es la placa bru nida destinada   polarizar el rayo de luz SI por su



FRANCISCO ARAGO

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     formar una imagen en una pantalla E. Los marcos que sostienen las dos placas reflectoras pueden girar alrededor de un eje perpendicular al del tubo, de modo que su planos formen con este último todos los ángulos posibles; además, se puede dar vuelta   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

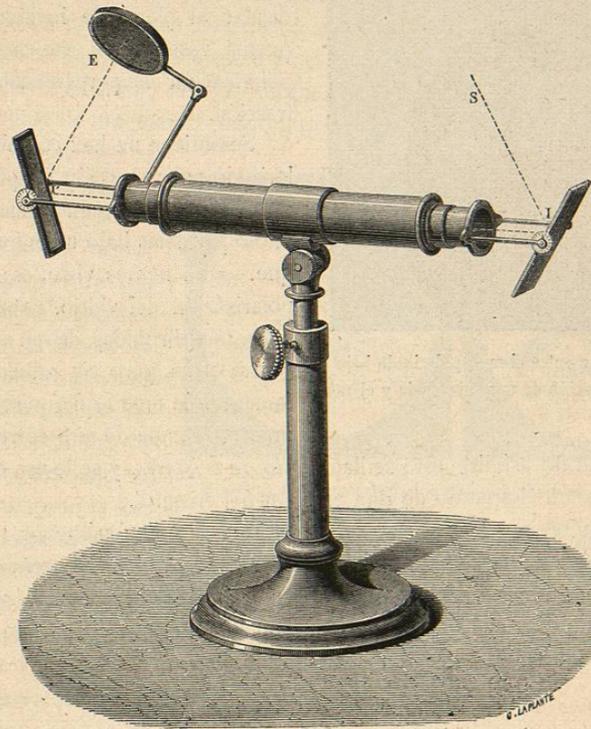


Fig. 571.—Polariscopio de Malus perfeccionado por Biot

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 máximum de brillo de la imagen se presenta cuando los dos planos de reflexión coinciden, y el mínimum cuando estos planos est n 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.

Br wster ha dado á conocer una ley muy sencilla que existe entre el ángulo de polarización y el índice de refracción de la substancia 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. 572), polarizado bajo el ángulo de polarización, y el rayo refractado I'r forman un ángulo recto.*