

30-1-58

4-9-59

INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO
DE LA
MINERALOGÍA MICROGRÁFICA

4 714

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

THE UNIVERSITY OF CHICAGO



INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO

DE LA

MINERALOGÍA MICROGRÁFICA

POR

José J. Landerer

(PUBLICADA POR LA CRÓNICA CIENTÍFICA DE BARCELONA)



Rec. 1914

BARCELONA

REDACCIÓN Y ADMINISTRACIÓN DE LA «CRÓNICA CIENTÍFICA»

CALLE DE CLARIS, NÚMERO 36

1884

(Derechos reservados)

INTRODUCCION AL ESTUDIO

MINERALOGIA MICROGRAFICA

[one] [unpaged]

ADVERTENCIA

El problema que me he propuesto resolver en el presente trabajo está planteado en estos términos: presentar bajo una forma elemental, clara y metódica, los principales conocimientos teóricos, prácticos y experimentales, que deben preceder al estudio racional y completo de la MINERALOGÍA MICROGRÁFICA.

No existe, ni en España, ni en el extranjero, ningún manual que responda á esta necesidad, al menos como yo la entiendo, pues si bien hay algunos que en ello se ocupan, ó lo hacen de un modo sobrado incompleto, sin método y sin dar idea del organismo de esta rama de los conocimientos humanos, ó se valen de cálculos superiores, que sólo están al alcance de muy pocas personas.

Mi trabajo comprende una parte exclusivamente original, y otra del fondo común de la ciencia, en que he condensado y expuesto de una manera adecuada á mi objeto los principios de óptica que deben preceder al estudio de las cuestiones preferentes, pues he creído que acerca de este particular era oportuno fijar bien las ideas, y aún facilitar el recuerdo ó tal vez la inteligencia de nociones de que no es posible prescindir.

Lo más arduo de mi empresa ha consistido en dar á conocer los asuntos sin aparato de cálculo, al menos del que merece tal nombre, reservando tan sólo para ciertas cuestiones, y aún entonces como

para servir de complemento á la explicación, el hacer uso de las matemáticas elementales. Creo haber conseguido mi propósito, y que el lector se dará de ello por convencido cuando vea que la teoría general del elipsóide de elasticidad, los fenómenos ópticos en la elipse de sección, y otros puntos no menos interesantes, son tratados de una manera totalmente nueva y sin hacer intervenir más que un simple razonamiento, que no por entrañar el carácter de elemental deja de ser absolutamente riguroso.

Al tratar del microscopio he creído que debía exponer su teoría y su práctica con suficiente amplitud, en razón á que siendo dicho instrumento un factor esencial en el estudio de la Mineralogía micrográfica, nada más natural que hacerlo comprender á fondo, máxime cuando para lograr mi intento me era dado revestir aquella exposición de cierta originalidad, como resultado de trabajos propios de observación y experiencia continuados desde larga fecha.

He sido parco en exponer principios y sistemas que pueden aprenderse en cualquiera de los manuales de mineralogía más conocidos. Lo propio en esta parte, que en la que es fruto exclusivo de mis estudios, he procurado ajustarme á la norma que se sintetiza en la siguiente fórmula: ni faltar en lo necesario, ni abundar en lo superfluo.

Tortosa y diciembre de 1883.

INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO

DE LA

MINERALOGÍA MICROGRÁFICA

Objeto, historia y división de la Mineralogía micrográfica.—Constituye el objeto de esta ciencia el estudio de los minerales que, por su pequeñez, no son perceptibles á la simple vista, necesitándose, para que lo sean, recurrir al auxilio del microscopio. Cuando este estudio hace relación á los minerales considerados aisladamente, toma el nombre de *Mineralogía micrográfica* propiamente dicha. Cuando se consideran, además, las asociaciones de los mismos, sus relaciones mútuas y la estructura que imprimen al conjunto, ó sea á la roca que constituyen, recibe el nombre de *Petrografía micrográfica*. La primera, que es la más importante, toda vez que hace relación al análisis de los elementos mineralógicos que intervienen en la constitución de las rocas, forma el asunto de la presente INTRODUCCIÓN.

Los primeros ensayos relativos á la observación microscópica de los minerales, fueron iniciados por Leeunwenhoek, y continuados por Baker, hace más de un siglo. Dolomieu, en 1794; Fleuriau de Bellevue, en 1800, y, sobre todo, Cordier, en 1816, utilizaron igualmente el microscopio para examinar la composición íntima de las rocas; pero el verdadero punto de partida histórico de este género de investigación, en lo que á la Mineralogía particularmente se contrae, data de 1856 á 1858, épocas en que Sorby dió á conocer sus trabajos sobre el mármol, la baritina y el granito. Desde entonces los progresos han sido importantes y no interrumpidos. Entre los naturalistas que á ellos han contribuido de un modo más

eficaz figuran: Vom Rath, Vogelsang, Zirkel, Rosenbusch, Tschermak, Von Lasaulx y Boricky, en Alemania; Des Cloizeaux, Fouqué, Michel Lévy y Mallard, en Francia; Allport y Phillips, en Inglaterra.

La especificación del mineral sometido á la observación es el objetivo que en último término se trata de conseguir. Para llegar á este resultado es indispensable tener ámplio conocimiento de los caracteres físicos de los minerales, estudiándolos de antemano sobre individuos de dimensiones apreciables ó fácilmente tangibles, y procediendo luego á aplicar á los elementos microscópicos las consecuencias que derivan de los hechos observados y de las teorías que los explican. De aquí la necesidad de ajustarse á un plan sistemático y establecer en el estudio ciertas divisiones, que reduzco al número de tres: en la primera, designada con el nombre de *Cristalografía geométrica*, comprendo las propiedades inherentes á la forma cristalina y las leyes que presiden en el génesis morfológico de los minerales; en la segunda, ó sea en la *Cristalografía óptica*, se estudian los caracteres ópticos, las leyes y principios que con ellos se relacionan; la tercera está consagrada á la aplicación y á la práctica de las doctrinas expuestas en las dos primeras.

PARTE PRIMERA

CRISTALOGRAFÍA GEOMÉTRICA

I

De las formas cristalinas y su representación

1. **Cristalización.**—Cuando una sustancia pasa del estado de fusión ígnea ó del de disolución, ó del estado gaseoso al sólido, sin pasar por el pastoso, toma, en general, una forma poliédrica, llamada *cristal*, designándose el fenómeno con el nombre de *cristalización*.

El proceso de fusión ígnea es el que principalmente interesa bajo el punto de vista de la Mineralogía micrográfica. A este proceso, pues, se entenderá en lo sucesivo referir la denominación de *magma*, cuando se trate de considerar la masa misma de la sustancia fundida, al hallarse en vías de cristalizar.

2. **Constancia de los ángulos.**—La mayor parte de los minerales se presentan cristalizados, observándose que, en una misma especie mineral, los ángulos diedros formados por las caras contiguas son constantes, cualquiera que sea su procedencia. Por ejemplo, en el cuarzo, las caras laterales del prisma forman con las triangulares inclinadas que lo terminan por ambos extremos un ángulo de $141^{\circ} 47'$, ángulo que afecta siempre el mismo valor, ya proceda el mineral del Brasil ó del Tirol.

3. **Planos de crucero.**—**Forma primitiva.**—Hay muchos minerales que, por el choque, se separan y dejan visibles superficies planas, llamadas *planos de crucero*, que se ajustan á una, dos, y hasta tres direc-

ciones fijas con respecto á las caras del cristal , y que , por lo mismo , forman entre sí ángulos constantes. Por ejemplo , en el carbonato de cal ó espato de Islandia , cuya forma cristalina es un romboedro , se originan , por el choque , tres planos paralelos á las tres caras del triedro , de que resulta un romboedro de dimensiones más pequeñas y de la misma figura.

4. Un segundo choque , y choques sucesivos , originan nuevos romboedros , de cada vez menores , cuya forma permanece invariable ; y como el fenómeno se repite con la misma constancia hasta los últimos límites de la división posible , es dado sentar que la expresada forma sirve como de patrón á que se ajusta el contorno de la molécula cristalina ; de que se sigue que un cristal de esta sustancia no es sino una agrupación de moléculas romboédricas similares , dispuestas del mismo modo y orientadas en el mismo sentido. Así concebido el edificio cristalino , se colige facilmente que cada plano de crucero no hace más que separar una ó varias filas de moléculas elementales ó *integrantes*. Este patrón se llama *núcleo* ó *forma primitiva*. El mismo fenómeno se produce en otros minerales , siendo permitido concluir , por una analogía harto natural , aún para aquellos que no ofrecen planos de crucero fáciles ó manifiestos , que en todos ellos hay una forma primitiva que puede servir de *tipo* en la constitución geométrica elemental del edificio cristalino.

5. **Elementos cristalográficos.**—Así se denominan las aristas y los ángulos sólidos de un cristal. Las aristas son *semejantes* ó de la misma especie cuando los diedros á que pertenecen son igualmente agudos ú obtusos y las caras son también iguales ó de la misma especie. Los ángulos sólidos son semejantes cuando los tres ángulos planos que concurren en su formación son igualmente agudos ú obtusos y las caras á que pertenecen son también iguales , ó al menos cada plano de un triedro encuentra su equivalente , en abertura angular y en figura , en el otro triedro. Por ejemplo , en un cubo todas las aristas son de la misma especie , puesto que todas pertenecen á diedros rectos formados por caras iguales ; lo propio puede decirse de los ángulos sólidos. En un prisma recto prolongado , de bases cuadradas , las ocho aristas menores que limitan los cuadrados de estas bases son de una especie , y las laterales de otra , en tanto que los ángulos sólidos son todos semejantes.

6. **Ley de simetría.**—**Formas derivadas.**—Casi ningún cristal se presenta en la naturaleza con la forma primitiva que le es peculiar ó que de él puede obtenerse teórica ó experimentalmente , pues , en su mayor parte , afectan formas más ó menos complicadas que , á primera vista , parecen serles completamente extrañas. Estudiándolos , empero , con detención , no tarda en descubrirse que para deducir de la forma con que se presentan , una primitiva ó fundamental muy simple , basta imaginar

que en esta los elementos cristalográficos semejantes han sido modificados simultáneamente y del mismo modo; esto es, que si un cierto ángulo sólido ó arista ha sido modificado por un plano que los corta, todos los ángulos, ó todas las aristas de la misma especie, habrán resultado modificados de una manera idéntica. En esto consiste la *ley de simetría*. El sólido que resulta constituye una *forma derivada*.

Cuando la modificación se verifica literalmente como se acaba de indicar, la forma derivada se denomina *holoédrica*. Ocurre, sin embargo, en muchos casos, que la modificación se verifica, no en todos los elementos semejantes á la vez, sino en elementos alternos, ó sea en la mitad de los de la misma especie que el cristal comprende, lo cual da origen á lo que se llama una *forma hemiédrica*.

El hecho mismo de la modificación sobre un ángulo sólido ó sobre una arista se llama *truncadura*.

7. Ley de la derivación.—Obsérvase en toda modificación que si la truncadura se efectúa en un ángulo sólido, la faceta modificante corta á las aristas del triedro á distancias del vértice que guardan entre sí una relación muy simple, representada por un número entero ó fraccionario, 1, 2, ó $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$, etc.

Esta ley se desprende de la consideración relativa á la disposición del edificio cristalino. En efecto, sea XYZ (fig. 1.^a), un cristal cúbico, y xyz la molécula integrante. Si la modificación es de tal suerte que una fila de 2 moléculas desaparece sobre la arista X , de 3 sobre la Y , y de 1 sobre la Z , no tiene duda que las relaciones entre las longitudes interceptadas, á partir del vértice a , y las dimensiones de la molécula, sobre sus direcciones correspondientes, serán respectivamente

$$\frac{aB}{ax} = 2; \frac{aC}{ay} = 3; \frac{aD}{az} = 1,$$

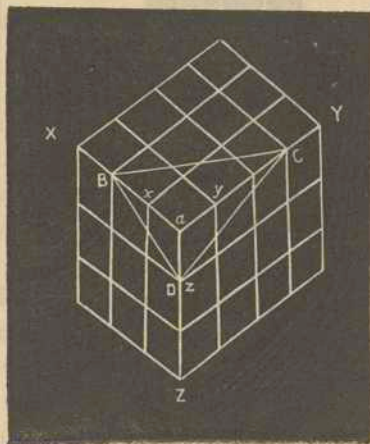


Fig. 1.

números que están en relación muy simple,

puesto que $\frac{3}{2} = 1\frac{1}{2}$, $\frac{3}{1} = 3$, y $\frac{3}{1} = 2$. La truncadura que aquí resulta equivale, evidentemente, á la que produciría el plano BCD .

8. Sistemas cristalinos.—Las diversas formas primitivas que pueden deducirse de las innumerables especies de minerales, y de otras sustancias cristalizadas que se conocen, se reducen tan sólo á un corto número, que se denominan *sistemas*, y también *tipos*, por no ser, en resumen,

otra cosa sino la forma misma de la molécula integrante. Estos tipos, cuyo estudio particular se hará muy luego, son seis, á saber:

- 1.º *Cubo.*
- 2.º *Prisma recto de base cuadrada.*
- 3.º *Prisma recto de base exagonal regular.*
- 4.º *Prisma recto de base rómbica.*
- 5.º *Prisma unioblicuo de caras laterales paralelogramicas.*
- 6.º *Prisma doblemente oblicuo.*

Cada grupo de minerales ó de cuerpos cristalizados, en general, posee una sola de estas formas primitivas, de donde derivan las modificaciones que les son habituales ó con las cuales se presentan en la naturaleza, siendo *incompatibles* las de un sistema con las de otro, es decir, que las formas derivadas del cubo, por ejemplo, no pueden proceder del prisma rómbico, ni reciprocamente.

Las cuatro primeras formas se comprenden sin dificultad, mas no así



Fig. 2.



Fig. 3.

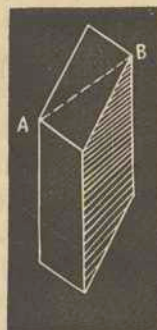


Fig. 4.

las dos últimas, pues si la quinta es fácil representarla en perspectiva, como se ve en la figura 15, no sucede lo mismo con la sexta, que no se concibe bien, ni es dado, por medio del dibujo, distinguirla de la anterior. Me persuado de que para las personas que se dedican á estos estudios y han de verse entregadas exclusivamente á sus propias fuerzas, la inteligencia del sexto sistema es punto algo difícil, y lo es tan sólo porque en los tratados que lo describen no suelen emplearse consideraciones adecuadas. Las que voy á presentar permiten formar clara idea de los tres últimos sistemas, y, sobre todo, apreciar las diferencias que los separan.

Sea $ABDH$ (fig. 2) un prisma recto de base rómbica, como el del cuarto sistema, colocado de modo que las caras laterales sean verticales y las básicas horizontales, de que resulta que los planos de estas serán,

respectivamente, AB y DH , y el plano vertical que contiene las diagonales menores de las mismas, el $ABDH$, dado que ad sea la arista del diedro agudo, en cuyo caso el plano vertical que contiene las dos aristas de esta especie estará representado por la recta ad , y las diagonales menores de las bases por las rectas AB y DH . Las diagonales mayores estarán contenidas en el plano vertical ad .

Imagínese que un prisma de esta forma es cortado por un plano inclinado, sin que este deje de ser perpendicular al vertical ad , ó lo que es lo mismo, sin que la diagonal menor AB participe de la inclinación. Efectuando una segunda sección paralelamente á la descrita, resultará el prisma llamado *unioblicuo* (fig. 3). En este prisma la diagonal no inclinada se denomina *ortodiagonal*.

Supóngase, en fin, que el plano secante ya no es perpendicular ni al plano vertical que contiene las diagonales menores, ni al de las mayores de las bases, y resultará el prisma *doblemente oblicuo* (fig. 4) en el cual la diagonal menor AB se halla también inclinada.

El prisma unioblicuo puede también resultar si, al hacer la sección, queda horizontal la diagonal mayor, en vez de la menor como queda descrito. En tal caso, la primera es la ortodiagonal, y la inclinada la segunda. A este sólido pueden, del propio modo, aplicarse las consideraciones expuestas para entender las diferencias que existen entre los tres prismas.

9. **Notación cristalográfica.**—Así se denomina el artificio por cuyo medio es dado expresar ó representar, en términos concisos, el sistema cristalino, como asimismo toda modificación ó forma derivada que provenga de truncaduras, ya sean simples ó complicadas. Son varias las notaciones adoptadas, pero en obsequio á la brevedad he de ceñirme á describir la que me parece más sencilla, que es la de Lévy.

En esta notación se conviene en designar con las letras $p m t$ las caras de diferente especie que el sólido presente, no siendo necesario hacer intervenir en ello mayor número de letras, atendido que, de las seis caras de que forzosamente ha de constar el prisma primitivo, las otras tres, opuestas á las precedentes, han de serles, una á una, iguales. Los ángulos sólidos distintos se designan con las vocales a, e, i, o , y las aristas con las consonantes b, c, d, f, g, h . No cuesta trabajo comprender que cuanto menor número de elementos cristalográficos de distinta especie tenga el cristal, tanto menor número de letras será necesario para representarlo. En el cubo, por ejemplo, las seis caras son iguales, y, por lo tanto, su expresión común será p ; por una razón idéntica, la expresión de sus ángulos sólidos será a , y la de sus aristas, b .

La notación de una modificación producida por truncadura puede hacerse con referencia al ángulo mismo, ó á las aristas que en él concurren.

Supóngase que e (fig. 5) es el ángulo sólido de este nombre en el sexto sistema. Las aristas que concurren en dicho punto son las b y d de la base, y la h lateral; p , m y t serán las caras. Si el plano modificante $x y z$ corta estas aristas á las distancias ex , ey , ez , que por simplificar llamaremos, respectivamente, x , y , z , la notación, referida á las aristas, será $\frac{1}{b^x} \frac{1}{d^y} \frac{1}{h^z}$. Para referirla al ángulo mismo, supongamos, para simplificar y aclarar estas ideas, que se trata del ángulo a del cubo; si se sus-

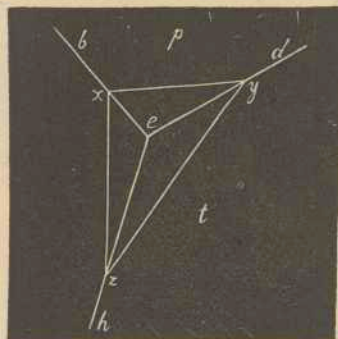


Fig. 5.

trae idealmente la molécula cúbica del ángulo, y luego las otras tres que estaban más en contacto suyo, resultará una truncadura simétrica en que las longitudes interceptadas sobre las aristas son entre sí como la unidad, puesto que las tres son cortadas á igual distancia del vértice por el plano modificante. Cualquiera otro plano, paralelo á este, producirá también una truncadura en que las relaciones entre las longitudes interceptadas será, igualmente, 1, y por lo tanto, su notación se expresará así a^1 . Si las longitudes interceptadas sobre dos aristas son iguales, y la longitud en la otra arista fue-

se, por ejemplo, el doble, la notación sería $a^{\frac{1}{2}}$, expresándose en el exponente la relación entre las longitudes interceptadas.

Este modo de expresar las modificaciones entraña, como se ve, gran precisión, puesto que da inmediatamente idea de las distancias á que las aristas son interceptadas por el plano modificante, y, por consecuencia, de la posición que este ocupa sobre el ángulo sólido. Refiriéndonos al primer caso, es evidente que á medida que aumenta una de las distancias, la z por ejemplo, el plano tiende á ser paralelo á la arista h , y cuando lo es exactamente, la distancia z resulta infinita, y la notación, referida á las aristas, viene á ser $\frac{1}{b^x} \frac{1}{d^y} h^0$, puesto que $\frac{1}{\infty} = 0$, que también se escribe así: $h^{\frac{x}{y}}$. En esta última expresión, si $x = y$, ó lo que es lo mismo, cuando el plano modificante intercepta las aristas b y d á distancias iguales del vértice e , lo cual da origen á una faceta colocada simétricamente en lugar de la arista, se tendrá $\frac{x}{y} = 1$, y la expresión se reduce á h^1 .

ESTUDIO DE LOS SISTEMAS CRISTALINOS.

10. Las formas holoédricas y hemiédricas que derivan de estos sistemas son numerosas, y se describen en los tratados especiales, á donde

remito al lector que desee conocerlas. La índole del presente trabajo reclama tan sólo la descripción de las más indispensables, para facilitar la inteligencia del asunto. Para entender bien las derivaciones es muy útil hacer uso de arcilla plástica humedecida, ó mejor aun de jabón de glicerina en barras, que se dejan cortar facilmente y permiten obtener las formas poliédricas que se trata de comprender y de estudiar.

En todos los sistemas se supone que el prisma que sirve de tipo está

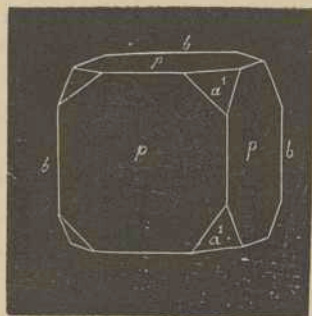


Fig. 6.

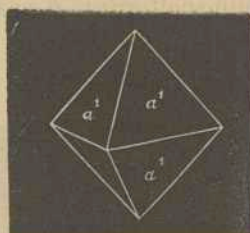


Fig. 7.

colocado de modo que: 1.º las aristas laterales sean verticales; 2.º cuando hay diedros agudos, uno de ellos mire al observador; 3.º cuando hay caras inclinadas, la superior mire al observador. Se conviene en representar las aristas verticales con la letra h si las cuatro son de una especie, y con las letras h y g si son de dos especies.

11. **Primer sistema: Cúbico.**—Como su nombre lo indica, tiene por tipo el cubo. Consta de seis caras p , que son cuadrados iguales, de ocho

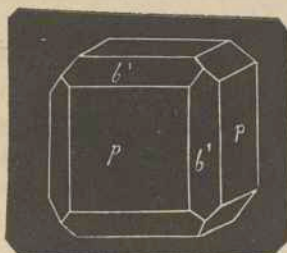


Fig. 8.

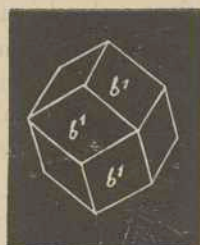


Fig. 9.

ángulos a , y de doce aristas b . Entre las formas holoédricas figuran:

El *octaedro regular*, que procede de la truncadura a' de todos los ángulos a del cubo (fig. 6), resultando el sólido (fig. 7) cuando los planos modificantes han hecho desaparecer totalmente las caras p . Su notación es $b^1 b^1 b^1$ ó a^1 . Esta suele ser la forma habitual de la picotita.

El *trapezoedro*, que procede de la modificación producida, sobre cada

ángulo, por tres facetas a^z igualmente inclinadas. Su notación es $b^{\frac{1}{x}} b^{\frac{1}{x}} b^{\frac{1}{z}} \text{ ó } a^{\frac{z}{x}}$. La analcima y el granate cristalizan según esta forma.

El *dodecaedro romboidal*, que deriva de la truncadura de las aristas b por facetas b^1 (fig. 8), y cuando estas han hecho desaparecer las caras p resulta el poliedro (fig. 9), cuya notación es $b^{\frac{1}{z}} b^{\frac{1}{z}} b^0 \text{ ó } b^1$. Entre los minerales que afectan esta forma se hallan la magnetita y el granate.

Entre las formas hemiédricas figuran :

El *tetraedro regular*, que procede de la truncadura de cuatro ángulos sólidos alternos, ó sea de la mitad de los modificados en la fig. 6;

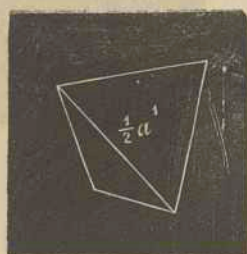


Fig. 10.

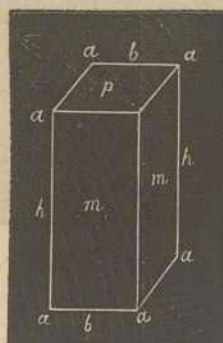


Fig. 11.

cuando los planos modificantes han hecho desaparecer las caras p resulta el sólido (fig. 10), cuya notación es $\frac{1}{2} a^1$, indicándose con el coeficiente $\frac{1}{2}$ el caracter hemiédrico de la derivación.

Como ejemplos de minerales que presentan formas de esta naturaleza pueden citarse el cobre gris, la baritina y la piritita.

12. **Segundo sistema: Cuadrático.**—Tiene por tipo el prisma recto de base cuadrada (fig. 11). Consta de dos caras básicas horizontales p , que son cuadrados iguales; de cuatro caras laterales verticales m , que son rectángulos; de ocho aristas básicas b , y de cuatro aristas h ; de cuatro ángulos sólidos a . Cristaliza en este sistema la melilita.

13. **Tercer sistema: Exagonal.**—Tiene por tipo el prisma recto cuya base es un exágono regular (fig. 12). Consta de dos caras básicas exagonales p , de seis caras laterales m , que son, en general, rectángulos, aunque también pueden ser cuadrados; de doce aristas básicas b , y seis aristas laterales h ; de doce ángulos sólidos a .

Este sistema suele también denominarse *romboédrico*, porque puede tener por tipo el romboedro, que es una forma hemiédrica derivada del prisma exagonal. En efecto, si se truncan alternativamente ángulos a (fig. 12), hasta hacer desaparecer las caras laterales m , resultará el rom-

boedro, como lo indica la figura 13, en la cual aparecen truncados los ángulos impares 1, 3, 5 de la base superior, dejando intactos los pares 2, 4, 6, originándose así tres caras del expresado sólido, cuyo ángulo triédrico se halla situado en el centro del exágono, y por consiguiente, en el eje mismo del prisma. Repitiendo la operación hacia abajo, ó sea sobre ángulos alternados de la base inferior, resultarán las otras tres caras del romboedro, cuyo ángulo triédrico a estará asimismo sobre el eje, y será igual al superior a . En este sistema existen ángulos sólidos de dos especies, á saber: dos a , cada uno de los cuales está formado por tres ángulos planos iguales, que serán agudos ú obtusos, según sea mayor ó menor su inclinación sobre las caras m ; seis e , que son los laterales, cada uno de los cuales se compone de dos ángulos planos agudos y uno obtuso, ó vice-versa; las caras, son todas rombos iguales, y por consiguiente,

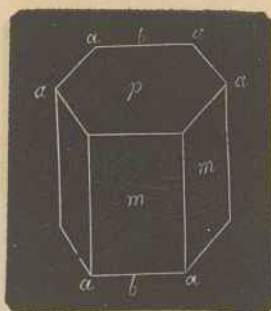


Fig. 12.

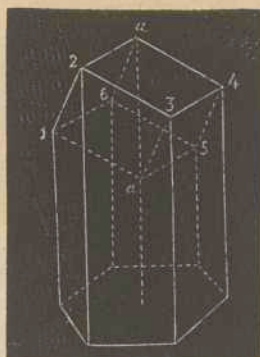


Fig. 13.

de la misma especie, cuya notación es p ; las aristas son todas de la misma especie, y tienen por notación b .

Si del romboedro se quiere hacer derivar el prisma exagonal, no hay más que truncar los ángulos e , hasta hacer salir las aristas de las intersecciones de las facetas modificantes e^1 , y luego truncar de nuevo estas aristas, de que resultan, por fin, las facetas e^2 que equivalen á las caras laterales m del prisma exagonal.

Cristalizan en este sistema: el cuarzo, la turmalina, el espato calizo, etc.

14. **Cuarto sistema: Ortorómbico.**—La forma fundamental de este sistema es el prisma recto de base rómbica (fig. 14). Consta de dos caras básicas p , que son rombos, y cuatro m , que son, en general, rectángulos. Sus aristas son de tres especies, á saber: ocho horizontales b , y cuatro verticales, las dos g opuestas que corresponden á los dos diedros agudos, y las dos h , también opuestas, que corresponden á los diedros obtusos. Los ángulos sólidos son de dos especies: cuatro a constituidos por

dos ángulos planos de 90° y uno obtuso, y cuatro e constituidos por dos ángulos planos de 90° y uno agudo. Cristalizan en este sistema el peridoto, el hipersteno, la baritina, la enstatita, etc.

15. **Quinto sistema: Monoclínico.**—Tiene por tipo el prisma unioblicuo ya descrito (8). Consta de dos caras básicas b , que son rombos inclinados (fig. 15), y cuatro laterales verticales m , que son paralelógramos. Los ángulos sólidos son de tres especies, y las aristas de cuatro, á saber: dos ángulos o , dos ángulos a , y cuatro ángulos e ; cuatro aristas básicas b , contiguas dos á dos; cuatro básicas d , también contiguas dos á dos; dos g laterales y opuestas, limitadas por las ortodiagonales; dos h , también opuestas y laterales, limitadas por las diagonales inclinadas. Con respecto á ángulos sólidos y aristas hay que considerar dos casos: que la ortodiagonal sea la diagonal menor, ó la mayor. En el primer caso, los dos ángulos o están formados por dos ángulos planos obtusos y uno agu-



Fig. 14.

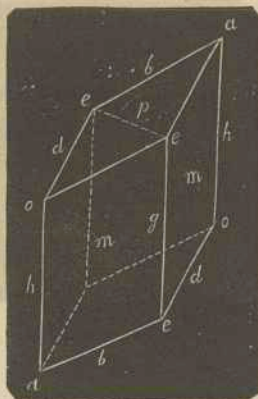


Fig. 15.

do, los dos a por tres ángulos planos agudos, los cuatro e por dos ángulos planos obtusos y uno agudo; las aristas b corresponden á diedros agudos, las d á diedros obtusos, las h opuestas corresponden á diedros agudos, las g á diedros obtusos. En el segundo caso, los ángulos o están formados por tres ángulos planos obtusos, los a por dos ángulos planos agudos y uno obtuso, los e por dos ángulos planos agudos y uno obtuso; las aristas b y las d , como en el caso anterior; las dos h opuestas corresponden á diedros obtusos, y las dos g á diedros agudos.

Cristalizan en este sistema: la ortosa, la mica, el piroxeno, el anfíbol, etc.

16. **Sexto sistema: Triclínico.**—El tipo de este sistema es el prisma doblemente oblicuo ya descrito. Como no es fácil representarlo en perspectiva de un modo diferente del prisma unioblicuo, es necesario, para entenderlo, recurrir á las consideraciones expuestas (8), y en virtud de

ellas construirlo en madera ó en jabón de glicerina. Así se verá que consta de caras de tres especies, m , p , t . Cada dos aristas opuestas son de la misma especie, de que resulta que las hay de seis especies, á saber: b , c , d , f , g , h . Los ángulos sólidos son de cuatro especies, a , e , i , o .

Cristalizan en este sistema un corto número de minerales: labrador, albita, axinita, etc.

17. **Predominancia de ciertos sistemas cristalinos en la naturaleza.**—No todos estos sistemas están igualmente representados entre los cristales naturales. De una manera aproximada puede decirse que los que cristalizan en los sistemas cúbico, exagonal y monoclinico están sensiblemente equiparados. El número de los que cristalizan en el sistema ortorómbico es doble del que corresponde á cada uno de los expresados. El cuadrático cuenta casi una mitad. En el triclinico sólo cristalizan quince ó diez y seis minerales.

18. **Zonas.**—Toda serie de facetas ó de caras naturales ó artificiales de un cristal, cuyos planos sean paralelos á una recta situada en uno de estos planos ó fuera de ellos, se designa con el nombre de *zona* de esta recta. Por ejemplo, si en un prisma ortorómbico se truncan las cuatro aristas verticales, hasta hacer desaparecer las caras m , resultarán cuatro facetas laterales, á saber: dos g^1 y dos h^1 , paralelas todas ellas á la arista $h^1 g^1$, que se denomina *arista de la zona*. Del propio modo, si en un prisma monoclinico se efectúa la truncadura g^1 , y luego la pg^1 , esta faceta estará limitada por dos aristas, una hacia p y otra hacia g^1 , cada una de las cuales podrá considerarse como arista de la zona que comprende las truncaduras pg^1 , las caras p y g^1 , como asimismo cualquiera sección artificial que pueda hacerse en el cristal paralelamente á la expresada arista de zona.

19. **Ejes cristalográficos.**—Se designan con este nombre ciertas rectas ideales que se consideran en el cristal, y ocupan, con respecto á las aristas, posiciones determinadas, subordinadas á la simetría del sólido.

Si se consideran tres rectas perpendiculares entre sí, situadas dentro del cristal, y se imagina que se trasladan paralelamente á sí mismas, es evidente que este cambio de lugar no entrañará alteración de relaciones con las aristas, de manera que, en rigor, es dado considerarlas no como tres líneas únicas, sino como tres direcciones rectangulares que pueden concebirse en el centro del cristal ó en cualquier parte suya, toda vez que subsisten invariables sus relaciones con los elementos del cristal. Estas tres direcciones son los *ejes cristalográficos*, y en cada uno de los sistemas están determinados como sigue:

En el sistema cúbico, por las perpendiculares á las caras, ó lo que es lo mismo, en virtud de lo que acaba de explicarse, por las aristas b que les son, tres á tres, paralelas.

En el cuadrático, por las perpendiculares á las caras, ó por las aristas b y h .

En el exagonal, por las tres perpendiculares á las bases, á dos caras laterales opuestas, y á dos aristas de los diedros formados por las otras caras, ó lo que es lo mismo, por estas dos últimas rectas, que pueden trasladarse idealmente sobre la cara p , y estar, por consiguiente, contenidas en ella, y por la arista h , que es paralela al eje de figura del sólido.

En el ortorómbico, por las dos diagonales de las bases y por la recta que une las intersecciones, ó lo que es igual, por las aristas de zona pg^1 y ph^1 , y por las aristas h ó g , que, á su vez, equivalen á la de zona $h^1 g^1$.

En el monoclinico, por la ortodiagonal, por la perpendicular á las dos aristas que limitan las dos diagonales inclinadas, y por las aristas h ó g , ó lo que es equivalente, por la arista de zona ph^1 , por la perpendicular á las aristas que limitan las diagonales inclinadas, y por la arista de zona $h^1 g^1$.

En el triclínico, por las perpendiculares á las aristas verticales opuestas, y por estas mismas aristas, que, á su vez, equivalen á la de la zona $h^1 g^1$, única que puede ajustarse á la dirección de uno de los ejes.

Es de la mayor importancia que el lector se fije bien en la significación de los ejes cristalográficos y en la posición que ocupan en cada sistema, á fin de no confundir las ideas que á este punto se contraen con las relativas á otros ejes, como los de figura, ópticos, de elasticidad, de rotación de macla, que serán estudiados más adelante.

20. **Maclas.**—Es frecuente el caso en que los cristales de una misma especie mineral se presenten agrupados y como medio penetrados unos dentro de otros, y hasta hay minerales, como ciertos feldespatos, que no se presentan, generalmente, sino afectando tal particularidad. Otros, por el contrario, como el olivino, no se presentan nunca maclados. Estas agrupaciones, aunque en aparente desorden muchas veces, obedecen, sin embargo, á leyes constantes, y constituyen lo que se llaman *maclas*. La macla es *simple* cuando consta de dos cristales acoplados ó compenetrados, y *múltiple* cuando intervienen más cristales en su formación; y tanto en uno como en otro caso la ley que preside en la posición recíproca de los cristales componentes es la misma.

Una macla simple puede considerarse como procedente de la rotación más ó menos completa que uno de los cristales hubiese efectuado sobre el otro, al rededor de una recta perpendicular á las caras acopladas, ó de una arista que resulte común por superposición de dichas superficies. En el primer caso, el plano de una de estas caras gira sobre el de la otra, que se llama *cara de composición*, sin dejar, por consiguiente, de estar en contacto suyo; en el segundo, la arista que sirve de eje permanece fija, y uno de los planos se separa para ocupar posición distinta.

En el primer caso, cuando el ángulo de rotación es de 180° , cada punto del cristal que suponemos móvil pasa á ocupar una posición diametralmente opuesta á la que antes ocupaba, ó á la del punto similar del cristal fijo, originándose de aquí una agrupación que se denomina *hemitropia*. Sean *A* y *B* dos cristales triclinicos derivados, representados en perspectiva en la fig. 16, cuyas facetas más desarrolladas son las dos g^1 y las cuatro pg^1 , acoplados por la cara de composición g^1 , y *EJ* el eje de rotación, perpendicular á dicha cara. Si es *A* el cristal fijo, y *B* efectúa una semirotación en el sentido de la flecha, es evidente que el punto *b* se trasladará sobre *d*, y este á su vez sobre *b*.

21. Imagínese que en uno de los cristales, en *A* por ejemplo, existe una recta ó dirección *xx*; esta misma dirección, considerada en el otro cristal, en uno cualquiera de sus puntos, ocupa, antes de girar, la posición *yy*, paralela á *xx*. Sea *PP* un plano perpendicular al g^1 ó de composición de la macla, en cuyo caso la intersección de ambos será la recta *CQ*, paralela á la arista pg^1 , puesto que esta lo es al plano de composición. Proyectando sobre el primero las dos rectas

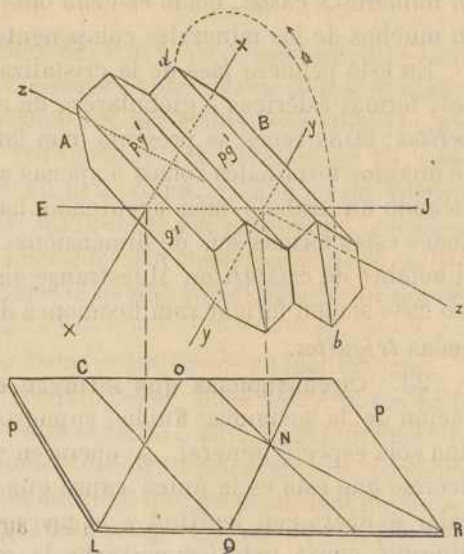


Fig. 16.

xx é *yy*, sus proyecciones serán *OL* y *NQ*. Si ahora se imprime una semi-rotación al cristal *B*, la recta *yy* pasará á ocupar la posición *zz*, y su proyección será la *NR*; siendo fácil comprender que el ángulo *QNR* quedará bisecado por la recta *NI* paralela á *CQ*.

De aquí se deduce que cuando el plano de proyección es perpendicular al de macla de dos cristales hemitropos, la proyección de la arista paralela á este plano es bisectriz del ángulo que forman las proyecciones respectivas de las dos direcciones consideradas en los cristales.

Una construcción y un razonamiento análogos harían ver, con la misma facilidad, que cuando el plano de proyección no es perpendicular al de la macla, la proyección de la arista no es bisectriz del expresado ángulo.

Estas tres últimas consideraciones, que por de pronto no encuentran aplicación, la tendrán muy importante al hacer el análisis óptico de los minerales microscópicos.

II

Estados y aspectos diversos de la cristalización

22. **Individualización cristalogénica rudimentaria.**—El primer esbozo de orientación de los ejes cristalográficos, y por consiguiente, de individualización cristalogénica en el seno del magma, ha quedado patente en numerosos casos, como es dado observarlo por medio del microscopio en muchos de los minerales componentes de las rocas ígneas.

En esta primera fase de la cristalización, el mineral afecta, unas veces, formas esféricas ó globulares, de excesiva pequeñez, llamadas *globulitos*; otras veces se presenta con formas cilindroideas ó prolongadas, de ángulos terminales romos ó apenas acusados, llamadas *longulitos*, indicando un trabajo más acentuado hacia la forma poliédrica definida. Todas estas formas son de dimensiones microscópicas y se designan con el nombre de *cristalitos*. Muéstranse aislados y asociados, y en este último caso suelen formar ramificaciones de variada configuración, denominadas *triquitos*.

23. **Circunstancias que influyen en la cristalización.**—La cristalización de la sustancia flúida, supuesta homogénea, ó sea formada por una sola especie mineral, se opera en virtud del enfriamiento, pudiendo decirse que esta es la única causa que aquí interviene. Si la pérdida de calor se opera con lentitud y el magma permanece tranquilo, ó sin que ninguna causa exterior perturbe la marcha del fenómeno, las fuerzas cristalinas que se desarrollan en cada punto de su masa actúan libremente y orientan numerosas moléculas en el mismo sentido, de que resultan cristales de formas perfectamente definidas, y, en general, de dimensiones apreciables á la simple vista, y, aun á veces, considerables, que se designan por esta razón con el nombre de *macroscópicos*. Un aumento de temperatura entorpece la cristalización ó la suspende; un descenso rápido la apresura, y origina lo que se llama *cristalización confusa* ó aglomeración de pequeños cristales; efecto que puede asimismo provenir de la agitación tumultuosa del magma.

Si esta agitación ha sido, en cierta manera regulada, como, por ejemplo, cuando el cambio de lugar de las moléculas flúidas, en un espacio más ó menos circunscrito, se halla dirigido en un solo sentido, ú obedece á un movimiento general en una determinada dirección, los pequeños cristales que se forman aparecen también dirigidos y alineados, en series numerosas, en esta misma dirección, imprimiendo á la masa sólida ó á la roca que constituyen una estructura particular llamada *fluidal*.

Cuando el magma es heterogéneo, como acontece en la mayor parte de las rocas, la cristalización está sometida á las mismas leyes, separándose sucesivamente cada uno de los minerales integrantes. Esta separación se efectúa, en general, según el orden de menor á mayor fusibilidad, si bien hay frecuentes casos en que el orden sufre, de hecho, alteraciones, observándose entonces que la cristalización del mineral más refractario de la mezcla ha sido precedida por la de otro que lo es menos, lo cual enseña que en la producción del fenómeno no sólo interviene la tendencia á la solidificación, si que también y de un modo muy eficaz, la tendencia á cristalizar.

Ocurre asimismo que ciertos minerales han ido trasformándose lentamente después que cristalizaron, á consecuencia de acciones secundarias nacidas de las condiciones especiales á que estuvo sometida la roca, y dado origen á minerales nuevos. Por ejemplo, el peridoto se ha trasformado en serpentina, el piroxeno en calcedonia. Cuando esta sustitución de materias tiene lugar, obsérvase que el nuevo mineral conserva la forma cristalina del mineral trasformado; por más que esta no pertenezca casi nunca al sistema del primero. De ahí que el fenómeno sea designado con el nombre de *epigenia*.

El microscopio permite apreciar todas estas fases y sustituciones, y conocer la marcha que siguió la cristalización, pues basta fijarse en la manera de estar de los cristales de cada mineral, para poder deducir la época relativa de su formación. Fúndase esta deducción en una consideración bien sencilla, á saber, que un mineral que presente manifiesta su forma poliédrica y se halle englobado dentro de otro mineral ó de una masa de cristales que se amolden á su forma sin penetrarla, ó á lo más penetrándola por rendijas ó roturas, les ha precedido forzosamente en la consolidación.

Facil es, pues, distinguir en una roca las fases sucesivas de cristalización de sus minerales componentes. Los de primera consolidación pertenecen á dos categorías, que hacen relación á otros tantos tiempos sucesivos: unos se distinguen, en general, por su mayor tamaño, y por conservar intactos ó geométricamente apreciables los perfiles de las formas cristalinas que les son peculiares, si bien ha ocurrido con frecuencia que, una vez formados, experimentasen la influencia corrosiva ó mecánica del magma, todavía fundido, que los envolvía, y se presenten rotos ó con sus ángulos y aristas romos ó alterados. Otros son de dimensiones sumamente pequeñas, se hallan englobados dentro de aquellos, y presentan sus ángulos y líneas casi incólumes, lo cual denota que su consolidación fué anterior á la de los cristales que los encierran. Estos minerales englobados son, en rigor, los que deben considerarse como de primera consolidación; sin embargo, en razón á su escasa abundancia

relativa, aunque nunca ó casi nunca dejan de observarse en los cristales comprendidos en la misma denominación, no merecen ser separados de la fase que á estos se refiere.

Los de segunda consolidación se distinguen, en general, por su menor tamaño, y tanto á estos como á los de la segunda categoría de la primera fase, se les aplica la denominación de *microlitos*. Esta segunda fase terminó con la solidificación completa del magma. La estructura fluidal puede aquí desarrollarse, del propio modo y por idénticas causas, que cuando el magma era homogéneo.

Aún es dado distinguir más fases en la formación de los minerales. Será, por ejemplo, la tercera, aquella durante la cual tomaron origen los que proceden, por vía de epigenia, de los minerales preexistentes completamente formados, como se ha dicho de la serpentina y de la calcedonia.

24. Inclusiones.—La solidificación del magma petrogénico se efectuó casi siempre en presencia de gases y vapores que acompañaron su erupción ó reposaron sobre su superficie al ponerse en contacto con la atmósfera. De aquí que al cristalizar los minerales pudiesen aprisionar en su masa pequeñas porciones de aquellos flúidos, que quedaron allí encerrados para siempre, alojándose en diminutas cavidades ú oquedades, de formas redondeadas ó irregulares. Estas *inclusiones* son *líquidas* ó *gaseosas*, según que el flúido que contienen sea de una ó de otra naturaleza. Existen también *inclusiones vítreas*, que proceden de la intrusión de sustancias que, ó no tuvieron tiempo ó no se hallaron en condiciones de cristalizar, y afectan formas parecidas á las expresadas ú ofrecen el aspecto de ramificaciones más ó menos coloreadas.

En las inclusiones de la primera categoría ha ocurrido, en numerosos casos, que como el líquido llenó por completo la cavidad, á una elevada temperatura, el enfriamiento subsecuente de la roca ha entrañado la disminución de su volumen y ocasionado un vacío ó burbuja, saturada de vapor de dicho líquido, cuya extrema é incesante movilidad es, por cierto, uno de los fenómenos más interesantes y curiosos de la Mineralogía micrográfica. Estas inclusiones con burbuja movil se cuentan á millares en un reducido espacio, en ciertos minerales; el cuarzo del granito, de la granulita y del gneis, ofrecen de ello un ejemplo de los más notables, observándose con frecuencia que se hallan dispuestas en series alineadas, y muchas veces situadas en un plano.

El líquido que encierran suele ser el agua ó el ácido carbónico. Su naturaleza se determina por un procedimiento que no entraña, en teoría, ninguna dificultad. Consiste en medir, primero, el volumen de la cavidad y el de la burbuja, con lo cual se obtiene el del líquido, sin más que restar el segundo volumen del primero; calentando luego el mineral se

ve, para un aumento dado de temperatura, qué disminución de volumen ha experimentado la burbuja, deduciéndose lo que ha aumentado el del líquido, con cuyos datos es dado conocer su coeficiente de dilatación, y por consiguiente, su naturaleza. Cuando este líquido es el agua, basta enfriar la preparación para ver que en el momento en que la temperatura desciende un poco más abajo de cero, la burbuja queda inmovil, lo cual prueba que el líquido encerrado es el agua, puesto que su punto de congelación así lo indica.

No se ha dado, hasta ahora, explicación satisfactoria de los movimientos incesantes de la burbuja, pues unos los hacen depender simplemente de las trepidaciones del suelo, que se comunican al instrumento y á la preparación; y otros en la constitución misma de la materia, fundándose en que, admitido el movimiento de los átomos, pueden estos influir sobre una agrupación material de excesiva pequeñez, como es la burbuja, y ponerla en movimiento. Para apreciar si alguna de las dos explicaciones es racional he llevado á cabo diversas experiencias, que voy á reseñar someramente. En unas he hecho actuar, junto al fenómeno, las fuerzas que se hallan más íntimamente relacionadas con la constitución de la materia; en otras me he colocado en condiciones de poder hacer variar la intensidad de la presunta causa, para ver si la magnitud de los efectos guardaba relación con las expresadas variaciones.

1.^a He colocado sobre la preparación microscópica un electro-imán formado por un cilindro hueco, cuyo eje permite el paso del objetivo del instrumento. Al hacer pasar la corriente de una pila de tres elementos Bunsen gran modelo, ó de un carrete de inducción, no se nota alteración alguna en los movimientos de la burbuja. Tampoco se nota si el electro-imán se sitúa á un lado de la preparación.

2.^a Coloco entre la preparación y el cubre-objeto, una pequeña cantidad de agua acidulada, y hago pasar, á través de la misma, la corriente de los tres elementos dispuestos en tensión; el agua se descompone, pero ningún efecto se nota en los movimientos. Idéntico resultado se obtiene empleando corrientes inducidas.

3.^a He repetido la observación en plena tranquilidad del campo, y en puntos céntricos de las grandes poblaciones, donde el tránsito de carruajes produce trepidaciones, por decirlo así, continuas, y no he notado que los movimientos de las burbujas revistieran mayor amplitud, ni otra irregularidad que la ordinaria.

Fijando bien la atención en la esencia del fenómeno, tal como la pone de manifiesto la observación microscópica, aparece desde luego que la burbuja se mueve como si su posición de equilibrio cambiase sin cesar, ni más ni menos que la burbuja de un nivel de aire cuyo soporte se hiciese bascular continuamente en todos sentidos. De todo ello se deduce

que ninguna de las explicaciones propuestas responde á la solución del problema. La primera, porque los efectos no se modifican al poner en acción fuerzas que no se distinguen, en cuanto á su naturaleza, de las que intervienen en la constitución de la materia; la segunda, por dos razones: en primer lugar porque las trepidaciones del suelo, aun las más imperceptibles para los sentidos, son de un orden de magnitud excesivamente superior al de los movimientos de la burbuja, como lo sería un vaivén brusco, impreso al instrumento, que no produce, visiblemente, ningún efecto, y, en segundo, y sobre todo, porque las vibraciones que origina la trepidación del suelo se efectúan en sentido vertical, y no alteran, por consiguiente, la inclinación de la preparación sobre el horizonte. Añádase á todo esto que al tomar como objeto de observación inclusiones de forma elíptica muy prolongada, y disponer la preparación de suerte que el eje mayor de la elipse fuese vertical, he notado en la burbuja una tendencia manifiesta á ocupar la parte inferior de la inclusión y efectuar allí sus excursiones, pasando á ocupar la parte opuesta luego que se invierte de arriba abajo la preparación, lo cual denota que no se sustrae á la acción de la gravedad.

Siendo, pues, evidente que la verdadera causa del fenómeno debe buscarse en otra parte, no será aventurado pensar que reside en los movimientos lentos de báscula que experimenta el suelo, descubiertos por M. Dufour. Este físico ha demostrado que, durante el año, el suelo de Sécheron (Suiza) sube de un lado y baja del opuesto, y vice-versa. En el trascurso de 1878 á 1879 la amplitud de la oscilación completa del lado del este fué de 28'', y mucho mayor en el de 1879 á 1880. Independientemente de este movimiento general en el sentido de este á oeste, suele haber otro, diurno, en el mismo sentido, cuya amplitud, cuando existe, varía de algunas décimas de segundo á 3'', pasando por un máximo y por un mínimo, que ocurre, respectivamente, entre 6^h y 8^h de la noche, y 6^h y 8^h de la mañana. Obsérvase, además, un movimiento anual en el sentido del meridiano, cuya amplitud no ha excedido de 4'',89. Estas oscilaciones se hallan, hasta cierto punto, en relación inmediata con las variaciones de la temperatura en la aludida localidad. M. Dufour consigna que entre las diversas causas que pueden modificar el fenómeno, deben citarse la configuración y la naturaleza del suelo.

De la exposición de hechos que precede se desprende que el movimiento angular del suelo, en el sentido vertical, se efectúa con intermitencias, ó con aceleraciones y retardos en pequeñísimos intervalos, como lo prueba en escala mayor la existencia de la oscilación diurna dentro del movimiento general ánuo. Ahora bien, si el factor esencial en los movimientos incesantes de la burbuja debe ser, forzosamente, una serie continua de variaciones de inclinación de la placa sobre el horizonte,

no cabe duda de que las que resultan de las oscilaciones diurna y anual del suelo ocurren á la dificultad de una manera que no deja nada que desear.

La presencia de burbuja móvil es, por de pronto, un caracter seguro para distinguir las inclusiones líquidas de las gaseosas y vítreas. Más adelante se darán á conocer otros caracteres que permitan diferenciar estas últimas entre sí.

Los pequeñitos cristales ó microlitos de primera consolidación encerrados en la masa de los grandes cristales de la misma fase, y hasta dentro de otros microlitos de segunda consolidación, se designan también, á causa de su manera de estar, con el nombre de *inclusiones*.

III

Preparación de la placa delgada

25. El estudio de los minerales microscópicos reclama una preparación especial de la roca que los contiene, que consiste en adelgazarla hasta el punto de que resulten perfectamente visibles por transparencia. Esta es la parte exclusivamente práctica del trabajo científico, y acaso la única un tanto enojosa, si cabe que alguna lo sea, teniendo por objetivo la preciada conquista de la verdad natural.

La marcha de la operación comprende tres partes, y es como sigue:

1.^a De la roca que se trata de examinar se hacen saltar por medio del martillo algunos cachos, se elige entre los más delgados el que difiera menos de la forma de placa, y se toma de él un pedazo del tamaño de una moneda de dos céntimos, poco más ó menos. Este pedazo se coge con los dedos, y su cara menos áspera se desbasta restregándola sobre un plano de arenisca dispuesto horizontalmente, ó mejor, aplicándola sobre una muela de afilar, de grano grueso, puesta en movimiento por medio de un manubrio. De un modo ó de otro lo que importa es obtener una superficie lisa y bien plana sobre una de las caras. Cuando esto se ha conseguido se la acaba de pulir frotándola, á mano, contra una lámina de vidrio deslustrado, sobre la cual se ha depositado una pequeña cantidad de polvos de esmeril del más fino. La intervención del agua en todas estas operaciones las facilita notablemente.

2.^a Trátase ahora de alisar y planificar la cara opuesta. Para esto se tiene preparado un rectángulo de vidrio, de 4 á 5 centímetros de lado, por 3 á 4 de base y 5 á 6 milímetros de grueso, cuyas aristas vivas deben haberse restregado sobre la muela de arenisca, á fin de evitar que

causen cortes en los dedos. Depositase sobre este plano una cantidad de *bálsamo del Canadá*, como un volumen algo menor al del fragmento de la roca; se coge por un ángulo con unas tenazas, y manteniéndole horizontal se pasea lentamente, á cierta distancia, por encima de la llama tranquila de una lámpara de alcohol. El bálsamo, cuya consistencia, á frío, es bastante grande, sobre todo cuando no es nuevo, se derrite, se escampa sobre una gran parte de la lámina, y al cabo de pocos minutos empieza á desprender vapores blancos, primero por los bordes, y muy luego por toda la superficie. Este es el momento crítico. Se aparta entonces del calor la lámina, se la deposita, sin precipitación, sobre una mesa bien horizontal, y se aplica encima la cara alisada de la roca, apretando con fuerza para desalojar de entre las dos superficies en contacto las burbujas gaseosas que casi siempre se forman. Basta dejar enfriar el conjunto para que la roca y el vidrio queden tenazmente adheridos.

El objeto de esta operación es hacer servir de mango la lámina de vidrio, y poder de este modo alisar la cara libre, ni más ni menos que como se ha hecho con la primera. El éxito depende de saber apreciar el instante en que el bálsamo caliente tiene la consistencia adecuada. Si los vapores blancos se desprenden durante un intervalo demasiado largo, la consistencia resulta excesiva, y la sustancia aglutinante, después de fría, se agrieta, se desprenden sus pedazos en los alrededores de la roca, durante el trabajo de desgaste, los bordes de esta van quedando sin defensa y desapareciendo, viéndose poco á poco mermar su superficie. sobre todo al llegar á los últimos límites del pulimento. Si la consistencia es insuficiente, la placa no puede resistir al rozamiento y se desprende de la lámina por poco que se insista sobre esta. Se conoce que el bálsamo posee el grado de consistencia conveniente, en que, después de frío, no presenta rendijas, ni se deja impresionar por la uña. Adquirida la seguridad de que ambas condiciones se realizan, la cara libre se somete al desgaste y al pulimento, hasta conseguir que la plaquita no levante, sobre la superficie del vidrio, mayor grueso que el de un papel fino de fumar, ó en otros términos, hasta que aplicándola, mojada, sobre un escrito, pueda leerse á su través. Inútil parece advertir que el grueso ha de ser igual en todos sus puntos. Una placa bien preparada debe tener un espesor de 1 á 3 *centésimas de milímetro*.

3.^a La última parte de la operación consiste en trasladar la plaquita desde la lámina de vidrio grueso que ha servido para trabajarla, á otra de la misma sustancia, pero más delgada, llamada *porta-objeto*, que ha de servirle de soporte definitivo, operación que viene á reducirse á montar la placa. Para esto se deposita sobre el porta-objeto una cierta cantidad de bálsamo, y se la coloca encima de la mesa del operador, á corta distancia suya. Se deposita también sobre la placa una pequeña cantidad

de bálsamo, se coge la lámina gruesa con las tenazas, se calienta como de ordinario, y cuando se nota que al inclinarla, la plaquita se desliza en el sentido de la inclinación, se empuja esta hacia el borde con la punta de una pluma de acero, y se la deja caer suavemente sobre el bálsamo preparado del porta-objeto.

Ahora se coge con las tenazas esta segunda lámina, se la calienta del propio modo, y cuando empiezan á formarse burbujas y á desprenderse vapores blancos, se la vuelve á colocar encima de la mesa, se apoya ligeramente la punta de la pluma sobre la placa, para que el líquido la impregne por todas partes, se deposita sobre ella una laminita de vidrio muy delgada, llamada *cubre-objeto*, y se apoya sobre ella el mango de la pluma, á fin de desalojar las burbujas y de que el contacto entre la placa y las láminas sea perfecto. El bálsamo excedente se acumula al rededor del cubre-objeto y forma un reborde que, después de enfriado, se hace desprender con un cortaplumas.

Esta parte de la operación es la que exige más destreza, pues hay que evitar que el bálsamo se endurezca demasiado é impida las últimas manipulaciones, y además otros varios inconvenientes que suelen ocurrir con frecuencia; á saber: que el bálsamo tome un color amarillento, lo cual es de muy mal efecto, y hasta puede quitar transparencia á la preparación; que queden burbujas entre las láminas y la placa; que al insistir sobre el cubre-objeto se rompa; y, en fin, que el grado de consistencia del bálsamo inutilice la preparación, por exceso ó por defecto. Lo primero proviene casi siempre de que al pasear la lámina sobre la llama se ha aproximado demasiado y se ha inflamado el bálsamo; lo segundo, de que el cubre-objeto se dejó caer de plano, ó de que la roca no ha sido bastante removida en el seno de la materia aglutinante caliente; lo tercero, se evita, como es natural, no exagerando la presión; lo cuarto, tomando las precauciones ya descritas.

El procedimiento que acabo de describir es el que empleo siempre, y mediante el cual obtengo preparaciones de bondad irreprochable. Los autores describen otros, que difieren, en algunos pormenores, del explicado. Por lo demás, hay que tener en cuenta que el éxito de toda manipulación exige imprescindiblemente cierto tiempo de práctica, único crisol en que se depuran las dificultades de detalle.

PARTE SEGUNDA

CRISTALOGRAFÍA ÓPTICA

I

Fenómenos y principios fundamentales

26. **Éter.**— Los fenómenos del calor y de la luz, y el cálculo matemático que con ellos se relaciona, ponen de manifiesto que todos los cuerpos del Universo y el espacio inter-planetario ó intersidéreo que los separa, se hallan llenos de un flúido material llamado *éter*, de tenuidad tan extrema, que se sustrae á la acción de la atracción y permite á sus moléculas libres movimientos en todos sentidos, aun dentro de la materia tangible ó ponderable.

27. **Luz.**— Todo cuerpo luminoso, por el hecho de serlo, tiene la propiedad, ó al menos actúa como si la tuviera, de poner en vibración las moléculas del éter que le circunda; estas, á su vez, actúan del propio modo sobre sus contiguas, y así sucesivamente se va propagando el movimiento vibratorio hasta una distancia indefinida del punto origen. De esta consideración preliminar se deduce que la luz consiste, *objetivamente*, en el movimiento vibratorio del éter; *subjetivamente*, en la sensación particular que este movimiento produce en el órgano de la visión.

El espacio en que se propaga la luz se llama *medio*, ya se le considere en el vacío, ya en el seno de la materia de los cuerpos. *Medio homogéneo* es aquel que presenta en todos sus puntos la misma composición y densidad.

En todo medio homogéneo la luz se propaga en línea recta. Toda dirección, considerada á partir del manantial de donde emana la luz, es un *rayo luminoso*. Un conjunto de rayos constituye un *haz*.

En el vacío la luz se propaga con una velocidad de 77,000 leguas kilométricas por segundo; en el agua y en los demás líquidos esta velocidad es menor.

28. Reflexión.—Cuando un rayo luminoso se propaga en un medio homogéneo y tropieza con una superficie, toma otra dirección á partir del punto de encuentro y continúa propagándose en línea recta. El rayo recibe entonces el nombre de *incidente*, antes de tropezar con la superficie, y de *reflejado* á partir de ella. *Ángulo de incidencia* es el que forma el primero con la normal á la superficie, y *ángulo de reflexión* el que forma el segundo con la expresada normal. También suelen contarse uno y otro ángulo á partir de la superficie reflejante. La experiencia enseña que el ángulo de *incidencia es igual al de reflexión*, y que ambos se hallan contenidos en un mismo plano, perpendicular á la superficie reflejante.

Si se coloca el ojo en el trayecto del rayo reflejado, se percibe la *imagen* del punto de donde proceden los rayos incidentes. Esta imagen no tiene existencia tangible, por cuya razón se llama *virtual*, y se halla situada en la prolongación ideal del rayo reflejado, detrás de la superficie reflejante.

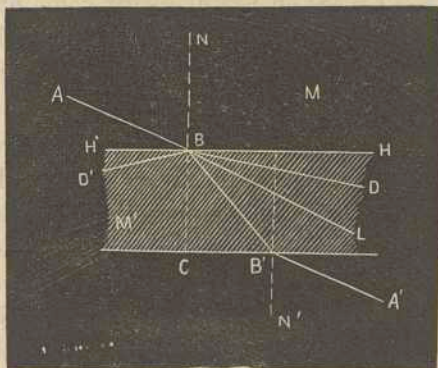


Fig. 17.

29. Refracción.—Cuando un rayo AB (fig. 17) camina en un medio homogéneo M , y tropieza con otro M' , también transparente, pero más denso, como el agua, no sólo se refleja, sino que además penetra en él, propagándose aquí también en línea recta BB' , según una dirección que no es prolongación de la del rayo incidente, sino que se acerca más á la normal que la del primero. Este rayo se llama *refractado*, y *ángulo de refracción* el $B'BC$ que forma con la normal. Si la refracción tiene lugar en orden inverso al considerado, que en este caso sería del agua al aire, el rayo, al salir á este medio se separa más de la normal, pero prescindiendo de nombres la situación de los dos rayos con respecto á dicha recta no varía, lo que suele expresarse diciendo que la refracción inversa se efectúa por los mismos caminos. En tal caso el ángulo de incidencia pasa á ser el $B'BC$ que antes era de refracción, y viceversa.

La experiencia y el cálculo demuestran también las dos leyes siguientes, formuladas por Descartes:

1.^a Los ángulos de incidencia y de refracción están contenidos en un mismo plano, perpendicular á la superficie de separación de los dos medios.

2.^a Para dos medios dados, el cociente que resulta de dividir el seno del ángulo de incidencia, cualquiera que sea su valor, por el de refracción correspondiente, es un número constante.

Así, pues, designando por i el primer ángulo, por r el segundo, por n el número constante, la segunda ley se expresará algebricamente escribiendo

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = n.$$

Esta relación, que varía para cada medio, se designa con el nombre de *índice de refracción*. Del aire al agua vale $\frac{4}{3}$ ó 1,3; del aire al vidrio, $\frac{3}{2}$ ó 1,5. Si en vez de elegir como primer medio el aire, se elige el vacío, el índice se llama *absoluto*. Un medio es tanto más *refringente* cuanto mayor es su índice. Designando por n el índice absoluto de una sustancia, por n' el de otra sustancia, la relación entre los dos índices será $\frac{n}{n'}$, poniendo por numerador el que entraña menor ángulo de refracción.

30. Puesto que tratándose de la marcha del rayo del agua al aire, el ángulo de incidencia es siempre menor que el de refracción, según se ha visto más arriba, es evidente que debe haber una amplitud $CB L$ del primero, á la cual corresponda un valor de 90° para el segundo, y de resultados el rayo tendrá que salir por $B H$ rasante á la superficie de separación de los dos medios. La amplitud $L B C$ se llama entonces *ángulo límite*. Si todavía suponemos otro rayo $D B$ que se aparte más de la normal, ya no puede salir al aire; en tal caso experimenta la *reflexión total* y se propaga hacia $B D'$.

En el caso del ángulo límite, y considerando que la refracción se efectúa del medio M al M' , el ángulo de incidencia $H B N$ es recto, y teniendo en cuenta que entonces $\text{sen } i = 1$, la relación del índice viene á ser $\frac{1}{\text{sen } r} = n$, que conduce á esta otra

$$\text{sen } r = \frac{1}{n},$$

en donde se ve que para determinar el seno del ángulo límite de una sustancia, no hay más que dividir la unidad por su índice, ó lo que es lo mismo, invertir los términos de este. Del agua al aire vale dicho ángulo $40^\circ 35'$.

Supongamos, por último, que el medio M' posee una segunda superficie de limitación paralela á la primera. El rayo $B B'$, al tropezar con

ella en B' , sale ó *emerge* propagándose por $B'A'$, en una dirección paralela á BA , y forma, por lo tanto, con la normal $B'N'$, un ángulo de *emergencia* $A'B'N'$ igual al ABN de incidencia, lo cual se comprende por razón de simetría y por la antes apuntada sobre la refracción en orden inverso.

31. **Dispersión.**—Sea ACD (fig. 18) la sección transversal de un prisma de una sustancia sólida y trasparente, de vidrio, por ejemplo, formado por tres caras. Un rayo IB que incida sobre la cara AD se refracta en el prisma, acercándose á la normal, y sale por la segunda cara AC ; pero como esta tiene una posición inclinada sobre la primera, el rayo emergente no es paralelo al incidente, sino que se inclina hacia el lado CD , que aquí se conviene en llamar *base* del prisma, del cual es *ángulo refringente* el A opuesto. Obsérvase en este fenómeno que si el rayo incidente es de luz blanca, del Sol, por ejemplo, el emergente sale en forma de haz escampado VER , y está constituido por siete especies de luz de diversos colores, dispuestos de este modo, á partir del menos refrangible: rojo, naranjado, amarillo, verde, azul, azul indigo y violado. Este fenómeno se llama *dispersión* de la luz. Las luces coloreadas que resultan se llaman *simples*, *elementales* ó *monocromas*.

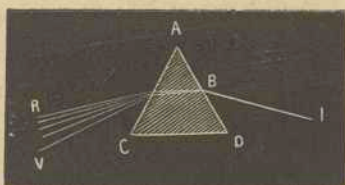


Fig. 18.

El prisma tiene, pues, la propiedad de descomponer la luz blanca que lo atraviesa, y aunque en rigor esta descomposición tiene lugar desde que el rayo penetra en él, no se hace, sin embargo, apreciable á la simple vista hasta después de la emergencia, por el corto espacio que media entre el punto de entrada y el de salida, siendo necesario recibir el haz emergente sobre una pantalla blanca colocada á cierta distancia, para que los colores aparezcan bien definidos. El conjunto de estos se denomina *espectro luminoso*.

El hecho de dispersarse el haz refractado desde su entrada en el prisma, prueba que cada rayo coloreado posee un índice de refracción que le es propio; y como este quebrado es tanto mayor cuanto mayor sea la diferencia entre el ángulo de incidencia y el de refracción, se sigue forzosamente que el rayo violado, ó sea el más refrangible, puesto que es el que más se aparta de la normal, será el que tenga mayor índice, y el rojo, ó menos refrangible, el que lo tendrá menor.

Entre dos colores consecutivos del espectro no existe una línea de demarcación que permita apreciar dónde termina el uno y comienza el otro, sino que se hallan enlazados por tránsitos insensibles. Obteniendo espectros muy amplificadas se ha llegado á averiguar que los colores no son

continuos, sino que están sembrados de numerosas rayas negras trasversales, sumamente finas. Nueve son las más visibles ó principales, que se designan con las letras del alfabeto, y cuyo orden de situación es el siguiente: la *A* en el límite exterior del rojo, *B* en el rojo mismo, *C* en el principio del naranjado, *D* en el del amarillo, *E* y *b* en el verde, *F* en el azul, *G* entre este y el violado, *H* en el límite de este color, ó sea en el extremo visible del espectro.

Una de las aplicaciones más útiles de las rayas consiste en hacerlas servir de puntos de referencia, cuando se trata de precisar el valor del índice de refracción de una sustancia, pues se comprende que, dada la dispersión de la luz al penetrar en ella, el índice reviste valor distinto según que el rayo refractado que se considera se acerque más ó menos á la normal, y aún dentro de un mismo color cabe la incertidumbre inherente á ser un espacio bastante ancho el que dicho color ocupa. Por el contrario, el índice entrañará toda la precisión apetecible si dentro de este color se elige una raya determinada. Así, pues, cuando se dice que el índice de una sustancia se refiere á la raya *D*, por ejemplo, toda ambigüedad desaparece, puesto que el rayo amarillo que coincidiese con dicha raya ocupa, en el propio color, una posición determinada é invariable.

32. **Recomposición de la luz.**—Los colores del espectro pueden volver á formar luz blanca, sin más que reunirlos todos sobre un mismo punto. Con este objeto basta colocar en el lugar que ocupa el espectro sobre la pantalla, siete espejos planos, de modo que cada color sea recibido sobre un espejo, y hacer que estos reflejen los siete colores sobre un punto determinado, en el cual se percibe una imagen blanca. Demuéstrase también por otras diversas experiencias, resultando ser una verdad experimental la recomposición de la luz.

33. **Lentes.**—Con este nombre se designan los medios transparentes y homogéneos terminados por dos caras curvas, que suelen ser dos casquetes esféricos, ó por una cara curva y un plano. El medio que las constituye es siempre más refringente que el exterior. Se denominan *lentes convergentes* cuando son más gruesas en el centro que en los bordes, como la representada en corte en *LL'* (fig. 19); y *divergentes* en el caso contrario. Las consideraciones que voy á exponer se refieren principalmente á las primeras.

En toda lente se llama *eje principal* la recta *PF'* que pasa por los centros *KK'* de las caras. Dicha recta pasa necesariamente por un punto *O*, llamado *centro óptico* de la lente, cuya posición, con respecto á esta, varía con la curvatura de sus caras. Si son iguales, se halla en el medio de la lente; si son una curva y un plano, está en la intersección del eje principal con la cara curva. Cualquiera otra recta *ES* que pase

por el centro óptico y forme con el eje principal un ángulo más ó menos agudo es un *eje secundario*.

Supongamos que sobre la lente LL' incide un rayo IB paralelo al eje principal, lo cual equivale á decir que el punto de donde parte el rayo se halla situado sobre este eje, á una distancia infinita de la lente. Al tocar en B el rayo forma, con la normal NA' ó radio de curvatura de la cara LKL' , el ángulo de incidencia IBN , y se quiebra por Bc aproximándose á la normal NA' , según las leyes de la refracción (29). En c vuelve á salir al aire, y toma la dirección cF separándose de la normal cA ó radio de curvatura de la cara LK' , viniendo á cortar en F al eje principal. Todos los rayos que incidan paralelamente á este eje vendrán á cortarle en el mismo punto, originándose en esta concurrencia la *imagen real* del punto que emite los rayos. Dicha imagen puede hacerse visible sobre una pantalla que se coloque en el lugar del cruzamiento de

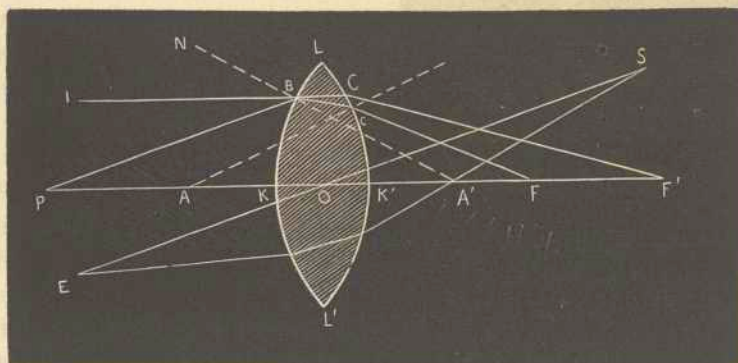


Fig 19.

los rayos. El punto F es el *foco principal* de la lente, y FK' la *distancia focal principal*. Se comprende sin dificultad que, para un mismo medio refringente, la distancia focal será tanto mayor, ó lo que es lo mismo, la lente será tanto menos convergente, cuanto menor sea la curvatura de sus caras.

A medida que el punto de donde parten los rayos se aproxima á la lente, aumenta el ángulo de incidencia, para los que la tropiezan en un mismo punto B . Si el luminoso está en P , por ejemplo, el ángulo de incidencia es PBN , de resultas el ángulo de refracción ha de ser mayor que en el caso precedente, y el rayo se quiebra por BC , yendo á cortar al eje en un punto F' más apartado de la lente que en aquel caso. El punto F' se llama *foco conjugado* del punto P . La razón de este nombre se encuentra en la ya apuntada sobre la refracción en orden inverso, pues es evidente que si el punto luminoso se traslada á F' , su imagen

real estará en P . Del propio modo, si dicho punto se coloca en el foco principal F , los rayos emergentes serán paralelos al eje y la imagen estará en el infinito, ó en otros términos, no habrá realmente imagen, por falta de cruzamiento efectivo de dichos rayos.

34. Continuemos aproximando á la lente el punto de donde parten los rayos, y considerémosle situado á una distancia P (fig. 20), menor que la focal principal $F'K$. En este caso los rayos emergentes se sepa-

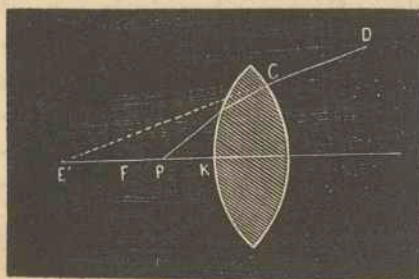


Fig. 20.

ran del eje y no podrán cortarle, ni por consiguiente cruzarse mutuamente, para formar imagen real del punto P , pero sus prolongaciones le cortarán idealmente en E' , y darán en este punto lo que se llama *imagen virtual*, cuya existencia es análoga á la que entraña la que producen los espejos planos y no puede, como esta, hacerse visible sobre una pantalla. Sólo el ojo colo-

cado de modo que reciba los rayos emergentes puede percibirla en el expresado punto de cruzamiento.

Todas estas consideraciones son igualmente aplicables al caso en que el punto que emite los rayos se halla situado sobre un eje secundario, sobre el cual tiene lugar, del propio modo, la formación de las imágenes real y virtual.

35. **Aberración de esfericidad.**— En lo que va dicho se ha prescindido del espesor de la lente, y es necesario ahora hacer ver su influencia en los resultados. Sea L

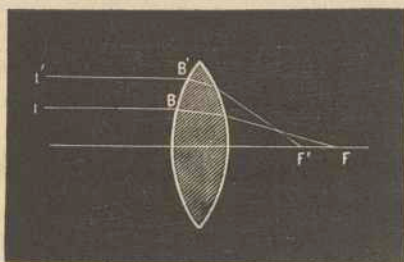


Fig. 21.

(fig. 21) la lente, é IB un rayo que incide sobre el punto B , paralelamente al eje principal. Este rayo se refracta y emerge, yendo á formar el foco principal en F . La experiencia y el cálculo demuestran que cualquiera otro rayo $I'B'$, cuya incidencia se efectúe más lejos del centro de la lente, va á cortar al eje en otro

punto F' menos apartado de esta que el anterior. Para demostrar este resultado de un modo experimental no hay más que adaptar á una lente convergente un cartón delgado provisto de una serie de agujeros dispuestos en línea recta, y presentar el conjunto al Sol, en sentido perpendicular á sus rayos. Esparciendo un poco de humo al lado opuesto se ve cómo los hacecillos luminosos que pasan por la región central de la lente dan

un foco más apartado que los que la atraviesan por sus bordes. Este fenómeno se llama *aberración de esfericidad*, porque depende, evidentemente, de la curvatura de las caras. Se concibe que su efecto ha de ser tanto mayor cuanto más curvas sean estas, ó en otros términos, cuanto mayor sea el espesor de la lente, con relación á su diámetro, y de ahí la razón de que, en teoría se consideren siempre las lentes como de espesor nulo, ó lo que es lo mismo para la práctica, como de curvaturas poco acentuadas ó de pocos grados.

La aberración que pueda existir, aun en este caso, se corrige dando á las caras curvaturas especiales, con lo cual se consigue que todos los rayos que atraviesan la lente converjan en un solo punto. La lente así construída se designa con el nombre de *aplanética*. También puede corregirse interceptando por medio de un diafragma anular los rayos que pasan por los bordes, pero en tal caso la imagen está menos iluminada, por la sencilla razón de que concurren menos rayos en su formación.

36. **Aberración de refrangibilidad.**— Toda cara curva de una lente puede considerarse como formada por una multitud de elementos planos infinitamente pequeños, y en este supuesto, el trayecto que recorre un rayo, desde el punto de incidencia al de emergencia, viene á pertenecer á un medio de caras inclinadas, ó sea á un prisma. Resulta de aquí que en las lentes, lo mismo que en los prismas, la luz blanca debe descomponerse en sus colores elementales, y así es en efecto, teniendo lugar la dispersión de modo que los rayos rojos se apartan más del eje que los violados, porque dicho eje viene á ser como la base del prisma que produjese la misma dispersión. Por eso los rayos rojos dan un foco más apartado de la lente que los violados. Este fenómeno se llama *aberración de refrangibilidad ó cromática*, porque la causa reside en la diferencia de índices de refracción de los rayos rojos y violados, y también porque el resultado viene á traducirse por la coloración de la imagen.

Su efecto se corrige en gran parte sobreponiendo á una lente convergente de *crown-glass* otra divergente de *flint*, cuyas curvaturas se han dispuesto de suerte que la doble lente resulte convergente. Esta doble asociación constituye lo que se llama una *lente acromática*.

Enseña el cálculo, y confirma la experiencia, que para conseguir el acromatismo perfecto, es decir, para hacer que los rayos blancos antes de refractarse en la lente continúen siéndolo después, sería necesario, en rigor, emplear siete lentes, ó sea tantas como colores se cuentan en el espectro de la luz blanca, pero en la práctica basta acromatizar los rayos rojos y los amarillos, que son los más luminosos, y por consiguiente los que sobresalen más en la coloración de la imagen.

37. **Imagen de un objeto.**— Colocado un objeto delante de una lente, la imagen que resulte será, evidentemente, el conjunto de focos ó de

imágenes de cada uno de sus puntos. Para determinarla bastará, pues, encontrar el lugar que dichas imágenes ocupan.

Principiemos por suponer el objeto AB (fig. 22) á una distancia de la lente mayor que la focal principal FO . Dirigiendo desde los extremos A y B los ejes secundarios AOA' y BOB' , sobre estos han de estar los extremos de la imagen, al otro lado del objeto. Para determinarlos no hay más que considerar cualesquiera rayos AC y BD que, saliendo de cada uno de los puntos A y B , atraviesan la lente y van á formar, respectivamente, en A' y en B' las imágenes reales de A y de B . El cruzamiento de los ejes secundarios en el centro óptico O explica porqué está invertida la imagen del objeto.

No tiene duda que el tamaño de esta será tanto menor cuanto más distante se halle el objeto, en primer lugar porque el ángulo de los ejes secundarios extremos, entre los

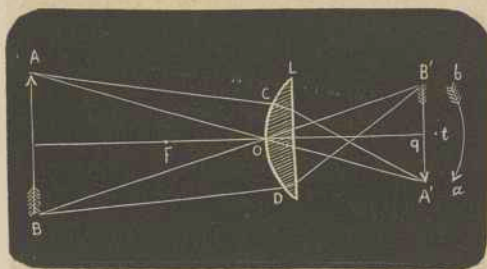


Fig. 22.

cuales ha de estar limitada, disminuye, y en segundo, porque disminuye también su distancia á la lente. Cuando el objeto se halla á considerable distancia, la imagen se define en el foco principal, y su tamaño es el menor posible. Por la propiedad de los focos conjugados se comprende asimismo que si

el objeto es $A'B'$, su imagen será AB , y, por analogía, que cuanto más se acerque el objeto al foco principal, tanto más distante se hallará la imagen y mayor será su tamaño, y cuando aquel coincida con dicho foco la imagen se formará en el infinito, ó lo que es igual, no existirá propiamente.

38. Vamos á considerar ahora lo que sucede cuando el objeto AB (fig. 23) se sitúa entre la lente y el foco principal F . Dirijamos el eje secundario AO y prolonguémosle en ambos sentidos. Un rayo AC que parte del extremo A , se refracta por CT y converge por TH , divergiendo del eje secundario AOH , por cuyo motivo no puede cortar le ni, por consiguiente, formar imagen real, y sólo su prolongación le corta idealmente en A' , en donde estará la imagen virtual del punto A . Del propio modo se verá que la imagen virtual del punto B está en B' , de suerte que $A'B'$ será la imagen virtual del objeto. Aplicando el ojo á la cara de lente opuesta al objeto se percibirá dicha imagen. Su tamaño es siempre mayor que el del objeto, á causa de hallarse constantemente situada al mismo lado que este. Cuando el objeto coincide con el foco principal, la imagen se define en el infinito, según se ha visto ya, luego

poco antes de la expresada coincidencia la imagen será lo mayor posible.

39. En todo lo que acaba de exponerse se ha supuesto que si el objeto se hallaba contenido en un plano, la imagen lo estaba también en otro paralelo al primero, lo cual entraña un error que es necesario saber apreciar. Para saber hasta qué punto se ajusta esta suposición á la verdad, obsérvese que un punto céntrico (fig. 22) del objeto dista menos de la lente que los extremos A y B , de que resulta que su imagen se forma en un punto t , más lejos que A' y B' . La imagen total no será, pues, la recta $A'B'$ contenida en un plano paralelo á AB , sino una línea curva que pase por B' , t y A' . Haciendo las construcciones, punto por punto, se verá que la imagen es una curva ab ; por consecuencia, para que la imagen se defina con limpieza es necesario que se pinte sobre una superficie igualmente curva. Evidentemente, este fenómeno se deja sentir tanto más, cuanto mayor es el ángulo que forman los ejes secundarios extremos.

40. Se llama *aumento* de una lente la relación entre el valor gradual del ángulo subtendido por la imagen virtual, y el del objeto,

considerando que una y otro se refieren á la misma distancia. Puesto que $A'B'$ (figura 23) es la imagen del objeto AB , consideremos que este se halla colocado en ab , sobre su imagen misma, y la relación de que se trata será $\frac{A'OB'}{aOb}$. Si estos ángulos no son excesivamente grandes, es bastante lícito admitir que son proporcionales á sus tangentes; en efecto, de sus mitades se obtienen las igualdades

$$\text{tang } A'Oh = A'h \quad ; \quad \text{tang } aOh = ah,$$

y sensiblemente

$$\frac{A'Oh}{aOh} = \frac{A'h}{ah},$$

ó también

$$\frac{A'OB'}{aOb} = \frac{A'B'}{ab},$$

en donde se ve que la relación anterior equivale á la de los tamaños de la imagen y del objeto. Designando respectivamente por D y d las dis-

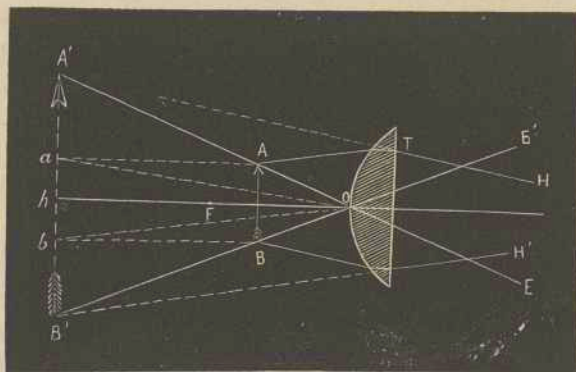


Fig. 23.

lancias de una y otro á la lente, los triángulos semejantes $A'OB'$ y AOB dan

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{D}{d}.$$

Teniendo, además, en cuenta que cuando la imagen alcanza su máximo tamaño la distancia d discrepa apenas de la focal principal, que llamaremos f (38), y que la distancia ideal D á que aquella se define puede suponerse equivalente á la de la vista distinta del ojo, la relación del aumento, tratándose de lentes de pequeñas dimensiones, se reduce simplemente á $\frac{D}{d}$.

41. **Ojo humano.** — El órgano de la visión puede asimilarse, en su esencia, á un sistema constituido por una lente convergente, llamada *cristalino*, y una pantalla posterior llamada *retina*, sobre la cual van á pintarse las imágenes reales é invertidas que da aquella lente. Las aberraciones que la misma pudiera entrañar se hallan casi totalmente corregidas por sus curvaturas especiales y por un diafragma anular anterior, llamado *iris*, cuya abertura ó *pupila* restringe el paso de los rayos á la región central del cristalino, evitando así la intervención de los bordes del mismo.

Los objetos de pequeñas dimensiones, como por ejemplo, la letra ordinaria de los impresos, necesitan, para ser percibidos con comodidad y limpieza, hallarse colocados á una distancia dada del ojo, que se llama *distancia de la vista distinta*. Para el ojo bien conformado vale de 25 á 30 centímetros. Una distancia mayor ó menor constituye, respectivamente, una vista *prébita* ó *miope*.

42. Debe hacerse observar, sin embargo, que cuando se mira un objeto á través de una lente convergente, para percibir su imagen virtual, la distancia de la vista distinta á que el ojo refiere esta imagen no es igual á la que le corresponde cuando mira directamente el objeto, sino algo más corta, lo cual procede del esfuerzo que tiene que poner en acción en aquel caso para adaptarse á ver en condiciones que no son las habituales. Para demostrarlo, basta mirar fijamente durante un rato la imagen virtual obtenida como queda dicho y dirigir luego rápidamente la vista sobre un impreso; obsérvase entonces que han de trascurrir algunos instantes para que el ojo recobre la facultad de distinguir las letras á la distancia que le es habitual. Este fenómeno se hace, sobre todo, perceptible cuando se opera con una lente muy convergente. Cuando esta convergencia es la que suelen tener las lentes llamadas *de aumento*, cuya distancia focal no suele exceder de 5 á 10 milímetros, el esfuerzo del ojo equivale sensiblemente al que hay que desarrollar para ver, directamente, á la distancia *mínimum*, distancia que para una visión ordinaria de 30

centímetros, se reduce á 20, poco más ó menos. Por este motivo, cuando se hace aplicación de la fórmula $\frac{D}{d}$ hay que dar á D el valor de la mínima distancia de la visión distinta.

43. **Doble refracción.**— Cuando un rayo de luz penetra en un medio homogéneo, como el vidrio ó un cristal del sistema cúbico, no se origina más que un rayo refractado, pero cuando el medio es un cristal de los cinco últimos sistemas (12 á 16), como, por ejemplo, el espato de Islandia, el rayo incidente da origen, en general, á dos refractados, y de aquí el nombre de *doble refracción* con que se designa el fenómeno, para distinguirle del que tiene lugar en la *refracción sencilla*, única de que se ha tratado hasta ahora, llamándose *cristales birefringentes* aquellos en que se observa la expresada propiedad.

Existe, no obstante, en el espato de Islandia, que es el cristal que tomamos como ejemplo, una dirección en que el rayo no se bifurca, y es cuando el incidente penetra paralelo al eje del cristal (19). La recta que posee esta propiedad se llama *eje óptico*, y también, aunque con notoria inexactitud, *eje de doble refracción*.

Importa hacer observar que esta recta no entraña el caracter exclusivo con que á primera vista se presenta, pues *no es una línea única, sino una dirección*, y esto se comprende teóricamente reflexionando que, considerado el cristal como una agrupación de moléculas cristalinas de la misma forma y dispuestas del mismo modo (4), todas tienen su eje orientado en el mismo sentido, de que resulta, por decirlo así, una suma de ejes que producen, en todo el espacio que ocupan, los mismos fenómenos. Prácticamente se confirma este resultado tallando dos caras artificiales, perpendicularmente al eje del cristal, en uno y otro extremo del mismo, y viendo que el rayo que incide sin inclinarse sobre una de ellas, en cualquiera de sus puntos, atraviesa el cristal sin bifurcarse.

Hay cristales que poseen dos direcciones en que el rayo no se bifurca. De aquí la distinción entre *cristales de un eje* y *cristales de dos ejes*. A la primera categoría pertenecen todos los de los sistemas cuadrático y exagonal ó romboédrico. A la segunda, los de los sistemas ortorómbico, monoclinico y triclínico.

Todo medio dotado de la propiedad de la doble refracción, más ó menos acentuada, se llama *anisotropo*. El medio que no la posea se llama *isotropo*. En la primera clase están comprendidos el vidrio templado, y los cristales de los cinco últimos sistemas. En la segunda, el vidrio ordinario, las sustancias colóides y los cristales del sistema cúbico.

44. **Cristales de un eje.**— En estos el eje óptico coincide con el de cristalización, que es, á su vez, el de simetría inherente á la forma cristalina primitiva. Todo plano, ideal ó efectivo, que, pasando por el eje óptico, sea perpendicular á una cara natural ó artificial del cristal, es una

sección principal. Sin embargo, téngase presente que esta segunda condición no es absolutamente indispensable, y que basta la primera para el rigor de la definición.

El fenómeno de la bifurcación, dentro del cristal, se hace muy visible trazando un punto negro sobre un papel blanco y colocando encima un romboedro bien trasparente de espato de Islandia. Mirando á través de la sustancia se descubren dos imágenes del punto. Manteniendo el ojo fijo y haciendo girar el cristal sin apartarle del papel, se observa que una de ellas da vueltas al rededor de la otra que permanece fija. Estos dos rayos se distinguen entre sí por sus propiedades especiales; uno de ellos, el que corresponde á la imagen fija, se ajusta siempre á las dos leyes de la refracción sencilla, y se llama *rayo ordinario*; el otro sólo las sigue en un plano perpendicular á la sección principal, y se llama *rayo extraordinario*.

La bifurcación de que se trata indica que el índice de refracción es distinto para cada rayo. Los cristales en que es mayor el del ordinario se

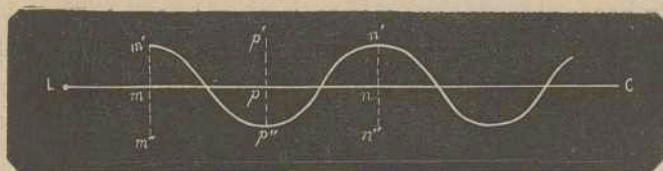


Fig. 24.

llaman *negativos*; si es menor se llaman *positivos*. Entre los primeros figuran el espato de Islandia y la turmalina; entre los segundos, el cuarzo.

45. **Cristales de dos ejes.**—El ángulo que forman estos ejes varía con la naturaleza del cristal, y, para un mismo cristal, con la temperatura, siendo, en general, diferente de 90° . La recta que divide por mitad el ángulo agudo se llama *bisectriz aguda* ó *línea media*, y la que biseca el ángulo obtuso, *normal* ó *línea suplementaria*. Ni el rayo ordinario, ni el extraordinario se ajustan, en general, á las leyes de la refracción. Sin embargo, uno de ellos las sigue cuando la refracción se efectúa en un plano perpendicular á la bisectriz, y el otro en el perpendicular á la normal.

46. **Teoría de la propagación de la luz.**—Admitido que la luz consiste en el movimiento vibratorio del éter, la hipótesis que explica el fenómeno se denomina *teoría de las ondulaciones*.

Para hacerse cargo de las circunstancias que reviste esta propagación del movimiento, sin arrastrar las moléculas en el sentido en que se efectúa, sea *L* (fig. 24) un manantial de luz simple, de luz roja, por ejem-

plo, y LC la dirección en la cual vamos á estudiar la propagación. El manantial pone en vibración las moléculas de éter que le rodean, y llega un momento en que el movimiento alcanza á la molécula m y empieza esta á oscilar á un lado y á otro de la recta LC , con una amplitud $m'm''$. El movimiento continúa propagándose de molécula en molécula, y supongamos que sea mn el trayecto que aquél recorre en tanto que la molécula m efectúa una vibración completa, ó sea desde que partiendo del punto m , se traslada á m' , pasa á m'' y vuelve al punto m de partida. La molécula n se pondrá en vibración cuando la m comience la segunda; al hallarse esta en m' , la n estará en n' , y ambas se encontrarán en todo momento dirigidas en el mismo sentido, á igual distancia y al mismo lado de la recta LC , animadas de velocidades iguales y paralelas. El intervalo mn que el movimiento recorre, necesario para que dos moléculas se ajusten á estas condiciones, ó se encuentren en la misma *fase* de vibración, se llama *longitud de ondulación*. Este intervalo suele designarse con la letra griega λ .

Consideremos ahora otra molécula p , situada en medio del intervalo mn . Esta molécula empieza á oscilar cuando la m se halle á la mitad de su excursión, es decir, cuando después de haber llegado á m' vuelve á m para trasladarse á m'' . Ambas parten, pues, de la recta LC en el mismo instante, pero en tanto que la primera continúa su camino y se dirige á m'' , la p se traslada á p' ; ambas se hallan, en todo momento, en posiciones opuestas con respecto á la recta LC , animadas de velocidades iguales y contrarias. El intervalo mp , necesario para que dos moléculas se hallen en opuesta fase de vibración, equivale, como se comprende sin dificultad, á una *semi-longitud* de ondulación.

Enseña la observación: 1.º que el *color* de una luz lo determina la *duración* de la vibración del éter; 2.º que la *intensidad* la determina la *amplitud* de la vibración; y 3.º que la velocidad de propagación del movimiento vibratorio es la misma para las diferentes luces coloreadas ó elementales que componen la luz blanca. Síguese de aquí que la *longitud de ondulación* es diferente para cada color, puesto que depende del tiempo que tarda en efectuarse una oscilación completa. Experimentalmente se ha determinado el valor de dicha longitud que corresponde á cada color, resultando ser de 62 *cientmilésimas de milímetro* para el rojo, y de 42 *cientmilésimas* para el violado; los colores intermedios tienen longitudes comprendidas entre estos valores extremos.

Esto entendido, consideremos dos rayos paralelos de luz del mismo color, sumamente próximos, que parten de un mismo manantial, y que, para fijar mejor las ideas, imaginaremos son recibidos, en un punto de su trayecto, sobre una pantalla. Si á igualdad de distancia del manantial estos rayos se encuentran en la misma fase de vibración, así continuarán

en todo su camino, y, por consiguiente, al llegar á la pantalla la molécula etérea que allí se encuentra estará solicitada por dos fuerzas iguales y dirigidas en el mismo sentido, que la obligarán á vibrar con doble fuerza, de que resultará en dicho punto doble intensidad de luz. Obsérvese que lo mismo sucederá si uno de los rayos experimenta sobre el otro un retardo de una, dos, ó un número cualquiera de longitudes de ondulación, ó lo que es igual, si el retardo es de dos, cuatro, seis, ó un número par de semi-longitudes.

Si el retardo es de una, tres, ó un número impar de semi-longitudes, la molécula se hallará solicitada en todo momento por dos fuerzas iguales y de sentido contrario, y, por lo tanto, permanecerá en reposo, de que resultará total oscuridad, produciéndose lo que se llama una *interferencia*. No cuesta trabajo comprender que si el retardo es de una fracción de semilongitud podrán ocurrir dos casos: que sea mayor ó menor que $\frac{1}{4} \lambda$; en el primer caso la intensidad queda aumentada, en el segundo disminuida.

47. Resumiendo la doctrina expuesta será permitido concluir: que *dos rayos paralelos muy próximos interfieren siempre que uno de ellos se retarda sobre el otro un número impar de semilongitudes de ondulación.*

Estas ideas teóricas pueden hacerse aún más inteligibles, recurriendo á ejemplos experimentales. Cuando sobre la superficie tranquila del agua de un estanque se arroja una piedra, véanse aparecer, al rededor del punto herido, un sistema de ondas circulares, que se van propagando y alejando sucesivamente de su centro. Si se coloca un cuerpecillo flotante en el trayecto de las mismas, se observa que se halla animado de un movimiento vibratorio, sin cambiar de lugar, lo cual prueba que dicho movimiento es transversal, ó que se efectúa solamente en sentido perpendicular á la dirección de la propagación, y además, que esta funciona sin arrastrar la materia que en ello interviene.

Arrojando otra ú otras piedras en puntos distintos, nuevos sistemas de ondas se originan, observándose entonces que las ondas se entrecruzan sin entorpecerse, efectuándose la propagación de cada sistema como si funcionase aisladamente. Haciendo aplicación de este resultado al éter, se concibe bien que una molécula pueda vibrar á un mismo tiempo solicitada por diferentes fuerzas, procedentes de otros tantos manantiales de luz, y así se comprende porqué no se perturban mutuamente distintas luces que brillan en un mismo recinto.

48. Las consideraciones que preceden dan idea exacta de lo que es un rayo de luz. Hay que advertir, no obstante, que la dan tan sólo para un caso particular, ó sea cuando las vibraciones del éter están todas contenidas en un mismo plano, circunstancia de que es fácil apercibirse observándola en la fig. 24 que ha intervenido en la demostración. Para ad-

quirir idea completa ó en toda su generalidad, imagínese que por el punto m pasa un plano perpendicular á la dirección LC , y que la vibración $m'm''$ de la molécula m gira en dicho plano al rededor de esta recta. Haciendo extensivo esto mismo á las vibraciones de todas las moléculas, á lo largo de LC , resultará lo que se llama un rayo de *luz natural*. La diferencia entre un rayo de esta naturaleza y el que se origina en las condiciones antes expresadas acabará de comprenderse perfectamente al tratar de la polarización.

49. La teoría de las ondulaciones explica, por medio del cálculo, todos los fenómenos de la óptica. Por lo que concierne al de la refracción, que es el que principalmente interesa para nuestro objeto, hace ver que consiste en la diferente velocidad que posee la luz en los distintos medios, siendo tanto menor cuanto más refringente es este. Designando por v y v' las velocidades correspondientes á dos medios entre los cuales existe la relación de la refracción $\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = n$, hay también esta otra, que recibirá util aplicacion en más de un caso, según se explicará más adelante

$$\frac{v}{v'} = n.$$

Como, para una misma luz homogénea, la rapidez de la vibración no varía, cualquiera que sea el medio en que se propague, y si sólo la velocidad de propagación, se sigue que cuanto menor sea esta velocidad, menor ha de ser también la longitud de ondulación que en dicho medio afecta.

50. **Polarización de la luz.**—Cuando un rayo luminoso tropieza con un plano de vidrio negro, con una incidencia de $35^\circ 25'$, contada de la superficie, el reflejado que resulta tiene, entre otras propiedades, las siguientes:

1.º No puede reflejarse de nuevo cuando incide bajo un ángulo del mismo valor, sobre otro plano de vidrio negro y el plano de la segunda incidencia es perpendicular al de la primera.

2.º No pasa á través de una turmalina tallada paralelamente al eje de cristalización, cuando este eje es paralelo al plano de incidencia, ó coincide con él, lo cual viene á ser lo mismo, en tanto que pasa sin obstáculo cuando le es perpendicular.

El rayo que posee estas propiedades se dice que está *polarizado*, designándose con el nombre de *polarización* el fenómeno que á ello se refiere. En el caso que se acaba de considerar, la polarización tiene lugar por reflexión. Se llama *ángulo de polarización* de una sustancia el que forma el rayo incidente con un plano pulimentado de la misma, cuando el reflejado resulta lo más polarizado posible. Su valor varía con la sustancia; para el vidrio vale $35^\circ 25'$, para la obsidiana $33^\circ 30'$. Los líquidos polari-

zan debilmente la luz, y los metales apenas la polarizan. *Plano de polarización* es el que contiene al expresado ángulo; su posición, dada la propiedad de la turmalina, puede determinarse facilmente, puesto que dicho plano ha de ser paralelo al eje de la misma, cuando queda interceptado el paso del rayo.

La luz puede polarizarse también por simple y por doble refracción. Este último medio es el que más interesa conocer.

51. Mirando directamente las dos imágenes que produce un romboedro de espato calizo, no se nota entre ellas diferencia de intensidad, pero si entre el cristal y el ojo se interpone una turmalina y se la hace girar sobre sí misma, se observa que la ordinaria desaparece cuando el eje de la turmalina es paralelo á la sección principal del romboedro, y la extraordinaria cuando dicho eje la es perpendicular, lo cual denota que el rayo ordinario emergente está polarizado en el plano de la sección principal, y el extraordinario en un plano perpendicular al mismo. Los dos rayos emergentes, que proceden, evidentemente, de un rayo único no polarizado ántes de penetrar en el cristal, lo están, pues, en ángulo recto á la salida.

52. Los aparatitos destinados á producir facilmente luz polarizada, ó á conocer qué lo está y á determinar la posición del plano de polarización, se denominan *polariscópios* ó *analizadores*. Los principales son: la turmalina y el prisma de Nicol.

53. **Turmalina.**—Un rayo de luz polarizada no pasa á través de una placa de turmalina tallada perpendicularmente al eje, á lo menos si es bastante coloreada. Si está tallada en sentido paralelo á esta dirección, el rayo pasa cuando su plano de polarización es perpendicular al eje, y queda interceptado cuando dicho plano le es paralelo. Como la turmalina es un cristal birefringente, infiérese de estos resultados que absorbe en el primer caso los dos rayos, ordinario y extraordinario, y sólo uno de ellos en el segundo. Para saber cuál de los dos es ahora el transmitido, no hay más que interponer, á la salida del rayo emergente, una segunda turmalina y hacerla girar sobre sí misma; se observa que cuando su eje es perpendicular al de la primera, resulta completa oscuridad; de donde se deduce que el plano de polarización del rayo emergente es paralelo, ó contiene al eje de la turmalina que lo produce, y está, por consiguiente, en el plano de su sección principal. Ahora bien, se sabe que el rayo polarizado en dicho plano es el extraordinario, luego este es el transmitido, y el ordinario el absorbido.

El mismo resultado tiene lugar si en vez de ser polarizado el primer rayo incidente, lo es de luz natural, quedando así completamente demostrado que la turmalina absorbe siempre el rayo ordinario.

54. **Prisma de Nicol.**—Sea *NAMD* (fig. 25) un romboedro de es-

pato de Islandia, cuyas aristas AN y AM son iguales y algo más cortas que la contigua AC . El eje óptico será AD , determinado por la recta que une los dos ángulos sólidos opuestos obtusos iguales, cuya notación cristalográfica en el sistema romboédrico es a (13), y $ABCD$ la sección principal perpendicular á las caras superior é inferior, que es, á la vez, un plano de simetría que contiene las diagonales menores AB y CD de las caras rómbicas opuestas. Imagínese que se le corta por un plano APD que pasa por los ángulos sólidos obtusos A y D y es perpendicular á la sección principal. Volviendo á juntar las dos caras artificiales así descubiertas, después de haber interpuesto entre ellas una capa de bálsamo del Canadá, resulta un *prisma de Nicol*, ó como suele decirse habitualmente, un *nicol*. El instrumento se funda en que el índice de refracción

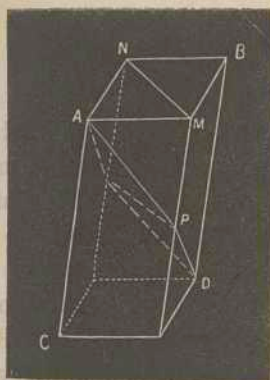


Fig. 25.

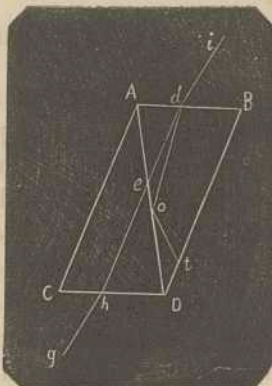


Fig. 26.

del bálsamo es menor que el ordinario y mayor que el extraordinario del espato.

Representemos aparte, en $ABCD$ (fig. 26), la sección principal. AD será la traza del nuevo plano que la corta. Sea id el rayo incidente, que cae sobre la cara AB , con una inclinación igual ó poco distinta de la que indica la figura. Se bifurca á partir de d , originándose el ordinario do y el extraordinario de . Si la cara AD ha sido cortada de modo que su inclinación sobre los rayos que han de atravesar el prisma en el sentido, poco más ó menos, de su longitud, que es AC , sea un poco menor que el complemento del ángulo límite del rayo ordinario, considerado para el caso en que el medio contiguo fuese el bálsamo, no tiene duda que, en las condiciones expresadas, ya no podrá salir al segundo medio y experimentará, forzosamente, la reflexión total por ot (30). El rayo extraordinario, que no se encuentra en tales condiciones, sufrirá una pequeña desviación al atravesar la capa de bálsamo, continuará propagándose hacia eh , y emergerá en la dirección hg paralela á la id . Ennegre-

ciendo las caras laterales del prisma, el rayo ordinario, al tropezar con ellas, quedará anulado, y sólo se transmitirá el extraordinario.

Para calcular la inclinación que debe darse á la cara AD sobre AC , es necesario, pues, conocer el ángulo límite del rayo ordinario para el caso de los dos medios expresados. Sea n_o el índice ordinario, que vale 1,658, n_b el del bálsamo, cuyo valor es 1,549; el índice de que se trata se halla representado por $\frac{n_o}{n_b} = 1,0704$ (29). Llamando L al ángulo límite, ya se sabe que (30)

$$\text{sen } L = \frac{1}{1,0704},$$

y calculando esta expresión por logaritmos, se obtiene $L = 69^\circ 7'$, y de aquí

$$\text{complemento de } L = 20^\circ 53',$$

que es la inclinación buscada.

Este dato sirve también para determinar la longitud que debe darse al prisma, relativamente á su ancho, tomado sobre la diagonal menor de las bases, conocida que sea la inclinación que la arista AC tiene sobre la diagonal AB en el romboédro de espato. Para esto, sabiendo que en dicho cristal los ángulos planos obtusos que concurren en A son de $105^\circ 5'$, un cálculo de trigonometría esférica, demasiado prolijo para encontrar aquí cabida, permitirá conocer que el ángulo BAC vale $109^\circ 8'$, valor que, por lo demás, puede también obtenerse midiéndole directamente. El ángulo CDA será, pues, de $88^\circ 15'$, ó sea la diferencia $109^\circ 4' - 20^\circ 53'$; representando por l aquella longitud, y tomando por unidad la diagonal menor, será

$$l = \frac{\text{sen } 88^\circ 15'}{\text{sen } 20^\circ 53'},$$

y haciendo el cálculo, $l = 2,8$. En donde se ve que esta longitud ha de ser, próximamente, tres veces mayor que la diagonal menor. Ocurre con frecuencia que no se toman en cuenta con rigurosa exactitud estas prescripciones; se ve, en efecto, que algunos constructores toman una longitud que no es más que el doble de la anchura, pero en tal caso la inclinación de la cara artificial no puede obtenerse sino invadiendo en parte las rómbicas de las bases, y por consiguiente, disminuyendo el ancho del haz extraordinario susceptible de transmitirse.

55. **Primeras nociones sobre la distribución del éter en los cuerpos cristalinos.**—Empecemos por estudiar esta distribución en los cristales de un eje, y tomemos por de pronto como ejemplo un romboédro de espato de Islandia, que es un cristal negativo (44). La bifurcación del rayo

al penetrar en el cristal, prueba que los índices de los rayos ordinario y extraordinario son diferentes, y, como consecuencia, que las velocidades con que dichos rayos se propagan lo son asimismo. Sea abd (fig. 27) una faceta artificial tallada en el extremo i del eje cristalográfico del romboedro, perpendicularmente á dicho eje. Un rayo si que incida en dirección oblicua sobre esta cara, da origen al extraordinario ie y al ordinario io , el cual, por acercarse más á la normal, indica que su propagación se efectúa con menor velocidad que la del extraordinario, deduciéndose de aquí que el éter está más apretado en el trayecto seguido por el primero que en el segundo, ó lo que es igual, afecta mayor densidad en el sentido del eje del cristal que en el perpendicular.

56. Si ahora se hace girar el rayo si al rededor de la normal, es fácil observar que en todas las posiciones se hallará contenido en el plano de la sección principal, lo propio que los rayos refractados ie é io . Si el rayo si describe un cono recto al rededor de aquella línea, los dos refractados describen también conos rectos al rededor de la misma, lo cual prueba que *el éter se halla dispuesto de una manera regular en todas las secciones perpendiculares al eje*. Cuando el rayo incidente coincide con la normal, se observa que no hay más que un solo refractado, el cual sigue la alineación del incidente y se ajusta, por lo tanto, á la dirección que se llama *eje óptico*. Sin embargo, el fenómeno que aquí tiene lugar es, en rigor, un poco más complejo, pero bajo el punto de vista práctico ó experimental, que es el que interesa para nuestro objeto, la interpretación del *eje óptico*, tal como se acaba de explicar, es perfectamente exacta.

Si en un cristal negativo se talla una cara paralela al eje, y se hace incidir sobre ella un rayo contenido en un plano perpendicular á dicho eje, los dos refractados están igualmente contenidos en el plano de incidencia y obedecen á la ley de los senos. Existe, pues, en este caso, verdadero índice de refracción para el rayo extraordinario, como lo hay siempre para el ordinario. Este resultado podía, desde luego, preverse, pues el plano de incidencia corta al cristal según una sección en la que la densidad del éter es constante ó uniforme, y de resultas la velocidad de la luz debe ser también la misma en todas las direcciones contenidas en dicho plano.

Consideraciones análogas harían ver que en los cristales positivos las moléculas del éter están más apretadas en el sentido perpendicular al eje, y que su distribución al rededor de esta dirección es, igualmente, uniforme.

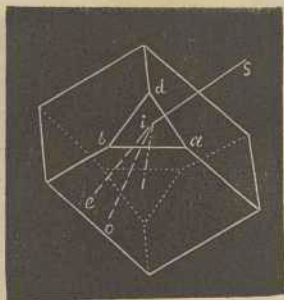


Fig. 27.

57. Diríase, en virtud de los resultados que se acaban de consignar, que en los cristales negativos el prisma primitivo ha sido aplastado de base á base, y que en los positivos ha sido comprimido por todas las caras laterales á la vez. Para ampliar las ideas que á esto se contraen, supóngase que los dos medios *A* y *B* (fig. 28) son de una misma sustancia isotropa, y que se la va á modificar la densidad del éter, ó lo que es equivalente, á convertirla en anisotropía, por medio de la compresión en determinado sentido. Si la presión actúa de arriba abajo, como en *A*, resultarán dispuestas las cosas como si las moléculas del éter se hallasen aplastadas, y si en sentido lateral, comprimidas, como en *B*. En el primer caso el rayo refractado ordinario es *io*, y el extraordinario *ie*, más separado de la normal *xx*, que aquí hace las veces de eje óptico. En el segundo, el ordinario *io* forma con la normal un ángulo de refracción de la misma amplitud que en el primer caso, puesto que, por su propia natu-

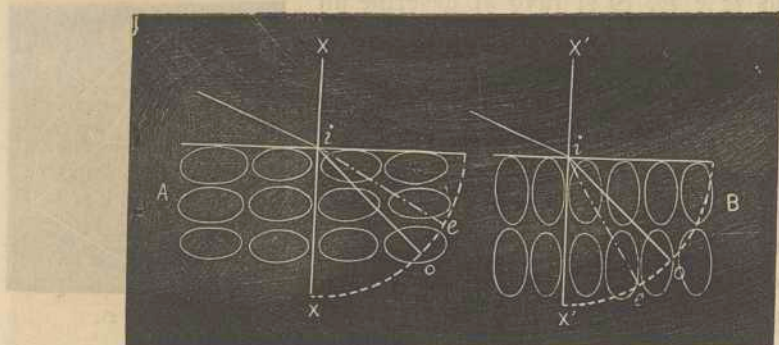


Fig. 28.

raleza, continúa funcionando como si las condiciones del medio no hubiesen variado, en tanto que el extraordinario debe ser ahora *i' o'*, menos separado de la normal que antes lo estaba. En efecto, si en el primer caso la dirección del extraordinario era *ie*, en el segundo ha de ser tal, que, en igualdad de camino, tropiece siempre con el mismo número de moléculas, ó las tropiece bajo el mismo ángulo con relación á los ejes mayores de las mismas, y como es evidente que esta condición sólo queda satisfecha separándose el rayo de la normal en *A*, y aproximándose á ella en *B*, mientras que la dirección del ordinario subsiste invariable, resulta demostrado lo que se propuso.

58. En todo rayo de luz polarizada las vibraciones son perpendiculares al plano de polarización.—Fijémonos primero en el rayo ordinario de un cristal de espato de Islandia. Este rayo obedece á la ley de los senos, y como á ello es inherente, según ya se sabe, que su velocidad ha de ser la misma en todos sentidos, resulta que la dirección de las vibraciones del éter ha de formar con el eje un ángulo constante, puesto

que, dada la distribución del éter en el sentido perpendicular á esta dirección, sólo así puede subsistir aquella uniformidad de propagación, cualquiera que sea la posición del rayo. Pero, por otra parte, se sabe también (46 y 47) que las vibraciones son perpendiculares al rayo, luego para que esto se verifique, y además el ángulo que forman con el eje sea constante, es forzoso que sean perpendiculares al plano de la sección principal, pues, de no serlo, sólo habría una posición del rayo en la cual quedarían satisfechas ambas condiciones, que sería cuando coincidiese con el eje xx' (fig. 29); en cualquiera otra posición, como xd , las vibraciones formarían con el eje ángulo distinto. Esto entendido, y recordando que el rayo ordinario se halla polarizado en el plano de la sección principal (51), queda demostrada la proposición. Como este resultado no tiene excepción, será lícito generalizarlo, y sentar que el rayo extraordinario, cuyo plano de polarización es perpendicular á la sección principal, vibra en el plano de esta misma sección.

Las propiedades ópticas de la turmalina pueden servir, del propio modo, para demostrar lo que precede. Enseña, en efecto, la experiencia, que una turmalina tallada perpendicularmente al eje, impide el paso á todo rayo que incida normal á la cara de entrada, que aquí es la base del prisma primitivo, y como es sabido que las vibraciones son perpendiculares al rayo, resulta evidente que la turmalina extingue en este caso las vibraciones perpendiculares al eje. Sábese, asimismo, por la experiencia, que una turmalina tallada paralelamente al eje, no da tampoco paso al rayo ordinario, lo cual prueba que ahora, como antes, las vibraciones son perpendiculares al eje, toda vez que se produce el mismo efecto; pero en este caso las vibraciones son, además, necesariamente perpendiculares al plano de la sección principal, puesto que el eje se halla contenido en dicho plano, y como el rayo está polarizado en el mismo, resulta también demostrada la proposición. La fig. 30 hace tangible lo que se acaba de explicar: xx' es el eje óptico del cristal, abc la sección principal, si un rayo incidente que, al penetrar en i se bifurca, vibrando el ordinario io según las amplitudes punteadas, las cuales son, visiblemente, perpendiculares al eje, y por lo tanto, á la sección principal. Diríase que la turmalina representa aquí el papel de una reja con un solo sistema de hierros paralelos, á través de los cuales se quisiera hacer pasar una lámina plana; mientras que esta sea paralela á los hierros, su paso tiene lugar sin dificultad, pero desde que les sea perpendicular queda cerrado el paso.

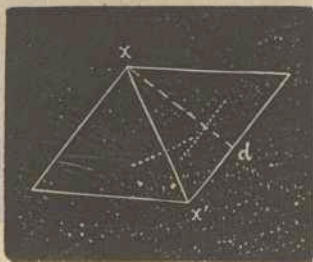


Fig. 29.

Haciendo aplicación de esta doctrina al prisma de Nicol, y recordando lo expuesto en el párrafo (51), no será fuera de propósito dejar consignado una vez más que el rayo ordinario, anulado en las paredes ennegrecidas, vibra en sentido perpendicular á la sección principal, y que el extraordinario vibra en el plano de esta misma sección, cuya posición está determinada por las diagonales menores de las dos caras rómbicas opuestas.

59. Ahora puede adquirirse completa idea acerca de la diferencia que existe entre luz polarizada y luz natural. En ambas, las vibraciones del éter son perpendiculares al rayo, pero en tanto que en la primera se hallan siempre contenidas en un plano perpendicular al de polarización, en la segunda giran rápidamente al rededor del rayo. Compréndese asi-

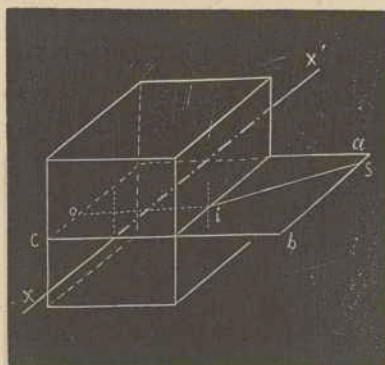


Fig 3ª.

mismo que las consideraciones (46 y 47) se refieren á luz polarizada, y, por consecuencia, que *sólo cuando los rayos están polarizados y sus planos de vibración se confunden sensiblemente son posibles las interferencias.*

60. **Polarización rotatoria.**—Cuando un rayo polarizado atraviesa una placa de cuarzo tallada en sentido perpendicular al eje, el emergente se halla todavía polarizado, pero en un plano distinto del primero. En algunos cuarzos el nuevo plano ha girado á la de-

recha, en otros á la izquierda del primitivo. En el primer caso se llaman *dextrógiros*, en el segundo, *levógiros*. La rotación es diferente para cada color, y tanto más acentuada cuanto más refrangible es este. Para un mismo color y una misma sustancia, el ángulo de la rotación es proporcional al espesor de la placa.

61. **Elipsóide inverso de elasticidad óptica.**—El estudio de la distribución del éter en los cristales de un eje, expuesto más atrás (55 á 57), ha hecho conocer que la densidad es distinta según que se trate de la dirección del eje óptico ó de un plano perpendicular al mismo. Falta aun determinar el valor relativo de la densidad en cada una de estas dos direcciones, como también en cualquiera otra, y generalizar las conclusiones, á fin de establecer una teoría completa de la distribución del éter en los cuerpos cristalinos, ora se trate de los isotropos, ora de los anisotropos, ya sean estos cristales de uno ó dos ejes.

Consideremos en primer lugar un cristal negativo unieje, un espato de Islandia, por ejemplo. Cortemos una sección paralela al eje y hagamos incidir sobre ella un rayo de luz polarizada. Para mejor inteligencia,

supondremos que la sección es horizontal, de suerte que el plano de incidencia será vertical, y dispongamos las cosas de modo que, cualquiera que sea la posición que deba darse al rayo incidente, su plano de polarización sea siempre perpendicular al de incidencia, con el objeto de que sus vibraciones se hallen constantemente contenidas en este plano, circunstancia que no ha de olvidarse en todo el curso de las consideraciones que voy á exponer.

62. Esto sentado, empecemos por hacer que el rayo incida normal á la superficie, y por ajustar el plano de sus vibraciones al de la sección principal ó que contiene el eje óptico. Al penetrar en el cristal, el rayo no se bifurca, por la sencilla razón de que efectuándose sus vibraciones en el sentido de la sección principal, y obligándole á penetrar en tales condiciones, hace las veces de rayo extraordinario ya preparado y continúa vibrando del propio modo, observándose que al refractarse se separa de la normal, en una dirección forzosamente contenida en un plano vertical. Permaneciendo fijo el plano del incidente podrá conseguirse, dando á este cierta dirección, que el refractado coincida con la normal. Ahora bien, como esta recta se halla, del propio modo, contenida en un plano perpendicular á la sección principal, y en él se verifica (56) que el rayo extraordinario tiene verdadero índice, es consiguiente que, dadas las condiciones en que ahora se considera, su velocidad ha de ser la misma que tendría si se propagase en cualquiera otra dirección contenida en el expresado plano, y siempre mayor que la del rayo ordinario que pudiera acompañarle, á ser posible, que no lo es, que el rayo incidente se bifurcase. Representando, pues, por V y v , respectivamente, las velocidades que posee fuera y dentro del cristal, y dado el valor de su índice, ó sea 1,483, se tendrá $\frac{V}{v} = 1,483$, de donde

$$v = \frac{V}{1,483}.$$

63. Dispongamos las cosas de modo que las vibraciones del incidente sean perpendiculares al eje, y hagámosle incidir normal á la superficie. En estas condiciones, no se bifurca tampoco, porque funciona como rayo ordinario ya preparado, y por su naturaleza así adquirida se refracta según la misma normal; pero tanto en esta dirección, como en cualquiera otra contenida en el plano de la sección principal, único en donde puede propagarse con el carácter de rayo ordinario, su índice es mayor que el del extraordinario que pudiera acompañarle si el incidente se bifurcase, y de resultas menor su velocidad. Representándola por v' , y sabiendo que el índice vale 1,658, se tendrá de una manera análoga

$$v' = \frac{V}{1,658}.$$

64. Ahora bien, puesto que la velocidad del rayo es menor cuando puede propagarse en el plano de la sección principal que cuando se propaga en sentido perpendicular á la misma, y toda vez que la normal á la sección, según la cual hemos estudiado el movimiento en ambos casos, es común á los planos que marcan las dos direcciones rectangulares, es evidente que la relación de las velocidades v y v' será inversamente comparable á la de las densidades del éter en cada uno de los dos sentidos. Designándolas por d y d' , será, después de hacer las sustituciones convenientes,

$$\frac{d}{d'} = \frac{1,658}{1,483}.$$

65. Luego las densidades del éter, en las direcciones del eje y de un plano perpendicular son entre sí, respectivamente, como los índices ordinario y extraordinario. Si se representa, pues, por la longitud AB (fig. 31) la densidad correspondiente á la primera dirección, la otra quedará representada por una recta CD perpendicular, y de una longitud tal, que si aquella vale 1,658, la segunda valga 1,483.

66. Obtenidos estos resultados cortemos en un cristal de espato una sección que forme con el eje óptico un ángulo cualquiera, coloquémosla horizontal, de que se sigue necesariamente que el eje se halle contenido en un plano vertical, y ajustemos las vibraciones del rayo vertical incidente á coincidir con dicho plano, como en el primer caso. Al penetrar en el cristal, el rayo no se bifurca, observándose que el refractado se acerca más á la normal, y que para hacerle seguir esta dirección no hay que inclinar el incidente tanto como antes, lo cual prueba que su índice es ahora mayor, y su velocidad menor, y por consecuencia que no continúa aquí funcionando exactamente como rayo extraordinario, sino con un caracter intermedio entre este y el del ordinario. Para comprenderlo mejor, obsérvese que su índice tiende á igualarse con el del ordinario. Midiéndole, se encontrará valer, por ejemplo, 1,570.

Hagamos que las vibraciones del incidente normal sean perpendiculares al plano vertical que contiene al eje óptico. El refractado que resulta es prolongación del incidente, lo cual prueba que, en estas condiciones, continúa funcionando como rayo ordinario, y que su velocidad es la misma que tenía en el segundo caso.

Haciendo ahora lo propio que antes, es decir, considerando que para una misma dirección, que en todos los casos ha sido, en definitiva, la normal, las velocidades son inversamente comparables á las densidades

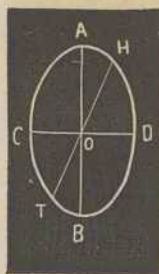


Fig. 31.

en las dos direcciones rectangulares, designando por d'' la nueva, y atendido que d no ha variado, se tendrá

$$\frac{d}{d''} = \frac{1,658}{1,570} .$$

Sea AOH (fig. 31) el ángulo que la nueva sección forma con el eje óptico OA . Puesto que d no varía, la recta AB continuará representando la densidad en el sentido del eje, de modo que si tomamos sobre TH una longitud tal que se halle con AB en la relación de 1,658 á 1,570, quedará representado el valor relativo de la densidad en la nueva dirección.

Operando sobre otras secciones que formen con el eje ángulos más abiertos se verá que á medida que el ángulo crece, la densidad, en la dirección del plano vertical que contiene al eje, disminuye, llegando á un mínimo cuando el ángulo es de 90° , en cuyo caso alcanza el valor que corresponde á la dirección perpendicular al eje óptico, ó sea CD . Uniendo los extremos de las rectas que se van construyendo con arreglo al procedimiento explicado, se ve que la curva resultante es una elipse cuyo eje mayor coincide con el eje óptico. Como este resultado es el mismo en todos sentidos al rededor de la expresada dirección, síguese que la densidad del éter, en el espato de Islandia, puede considerarse como representada por un elipsóide de revolución prolongado. Es fácil observar que este resultado se halla en perfecta armonía con el de las experiencias descritas (55 á 57).

67. Sometido á idénticas operaciones un cristal de turmalina, se obtiene un elipsóide de revolución un poco menos prolongado que el del espato. En los cristales uniejes el elipsóide es prolongado en los negativos, y achatado en los positivos. Interesa mucho hacer comprender que el elipsóide no es un sólido geométrico alojado dentro del cristal; y á este propósito es oportuno recordar lo que se dijo acerca de la existencia y de la interpretación del eje óptico (43). Así como esta línea no es única, sino una dirección, del propio modo el elipsóide de que se trata no es sino la interpretación de los diversos valores que afecta la densidad del éter en las distintas direcciones del cristal, y por consiguiente, aplicable á toda su masa considerada en conjunto, como á la más ínfima de sus moléculas similares. Esta figura, así interpretada, se llama *elipsóide inverso de elasticidad óptica*, ó simplemente *elipsóide de elasticidad*.

68. Una serie de consideraciones análogas á las expuestas conduciría á determinar prácticamente el elipsóide en los cristales de dos ejes, y se vería que su figura no es de revolución, sino de tres ejes desiguales, como el que resultaría de un huevo aplastado en el sentido del eje menor, ó de una naranja comprimida en el sentido del eje mayor.

Representemos el nuevo elipsóide en la figura 32, en la cual $\alpha\alpha'$ es el eje mayor, $\gamma\gamma'$ el menor y $\beta\beta'$ el eje medio, por más que la perspectiva parezca indicar que este último sea el menor. En un elipsóide de esta forma pueden hacerse siempre dos secciones circulares $M\beta N\beta'$ y $C\beta D\beta'$ producidas por la intersección de dos planos que contienen al eje medio $\beta\beta'$, é inclinadas simétricamente á un lado y á otro del eje mayor $\alpha\alpha'$ y del menor $\gamma\gamma'$. Cualquiera otra sección que se haga en el elipsóide, es una elipse. Levantando desde el centro O dos perpendiculares OA y OB á las secciones circulares, estas rectas, igualmente inclinadas sobre el eje $\alpha\alpha'$ en virtud de la simetría misma de la figura, y forzosamente contenidas en el plano determinado por los ejes $\alpha\alpha'$ y $\gamma\gamma'$, marcan las direcciones de los ejes ópticos del cristal, en donde se ve que

el plano de los ejes ópticos está siempre contenido en el que determinan los de mayor y menor elasticidad.

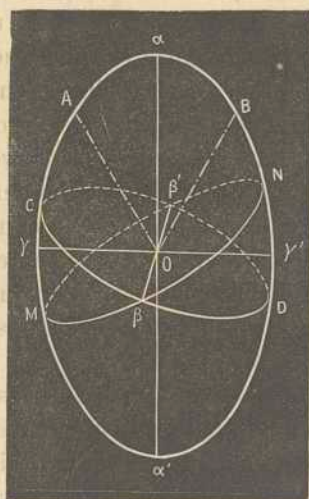


Fig. 32.

69. La disposición misma de la figura indica que el ángulo diedro formado por los planos $\beta N\beta'$ y $\beta C\beta'$ es suplemento del $\angle AOB$ de los ejes ópticos, pues este es igual al que $\beta N\beta'$ forma con $\beta D\beta'$. La recta Ox que divide por mitad al ángulo agudo de los ejes ópticos se llama *bisectriz aguda* ó simplemente *bisectriz*.

A medida que el elipsóide es más achatado en el sentido del eje menor, ó lo que es equivalente, á medida que aumenta la diferencia entre los ejes de elasticidad medio y menor, el ángulo de los ejes ópticos aumenta también. Por el contrario, á medida que

dicha diferencia disminuye, el ángulo disminuye del propio modo, y cuando los dos ejes son iguales, los ejes ópticos coinciden con el mayor de elasticidad, y se reducen, por lo tanto, á una dirección única, lo cual significa que en tal caso el elipsóide es de revolución, y el cristal de un eje y negativo, toda vez que su elipsóide es prolongado (67).

Si, permaneciendo constante el eje menor $\gamma\gamma'$, aumenta el medio $\beta\beta'$, los ejes ópticos OA y OB divergen más; y cuando $\alpha\alpha'$ y $\beta\beta'$ llegan á ser iguales los ejes ópticos se ajustan sobre la recta $\gamma\gamma'$; por lo tanto, el elipsóide es de revolución al rededor del eje menor, y achatado, indicando así que el cristal es de un eje, y positivo.

Estas dos consideraciones permiten comprender que si el elipsóide de elasticidad de tres ejes desiguales se toma como punto de partida de una teoría general de la distribución del éter, los cristales de un eje se ha-

llan en ella comprendidos como un caso particular, puesto que resultan cuando hay dos ejes de elasticidad iguales.

En lo sucesivo llamaremos frecuentemente α al eje mayor, β al medio y γ al menor.

Por analogía con las denominaciones establecidas en los cristales de un eje, los de dos se llaman *negativos* cuando el ángulo de estos ejes no excede de 90° , y *positivos* en el caso contrario. En los primeros la bisectriz coincide con α ; en los segundos con γ .

En la exposición de esta teoría se ha hecho completa abstracción del color del rayo luminoso, y, sin embargo, es necesario tenerlo en cuenta, como se va á ver por el ejemplo siguiente. Al hablar de los índices ordinario y extraordinario del espato de Islandia (51 á 56) nada se ha dicho sobre si se referían á luz blanca, ó de un determinado color, y como, de hecho, en un cristal, el índice del rayo de un mismo nombre varía sensiblemente del rojo al violado, es natural que á cada uno de estos colores extremos corresponda un elipsóide de elasticidad distinto. En el ejemplo citado se han tomado los índices ordinario y extraordinario que corresponden á la raya *D* del espectro solar (31), ó sea para el color amarillo. Si se quisiera determinar el elipsóide correspondiente al rojo, habrían de tomarse para aquellos índices, respectivamente, los valores 1,650 y 1,482. Para el violado, 1,683 y 1,497. Por lo demás, aquí mismo se ve, y es un hecho general, que para un mismo cristal, la diferencia de los índices de los colores extremos es siempre muy pequeña, y por consiguiente, que no hay apenas error en admitir que los diversos elipsóides coloreados se confunden en uno solo. También el calor interviene en la forma del elipsóide, pero las variaciones ordinarias de la temperatura ambiente no la modifican, en general, de una manera sensible, de suerte que, entre esos límites, puede suponerse constante.

70. Fenómenos ópticos en la elipse de sección del elipsoide.—Se acaba de ver que todas las secciones hechas por el centro del elipsoide son elipses, y que son círculos, y que no puede haber más de dos en este caso, cuando se hallan dirigidas en sentido perpendicular á los ejes ópticos. Cualquiera que sea el sentido en que esté hecha, se designa con el nombre de *elipse de sección*, resultando ser circular ó de iguales ejes cuando es perpendicular á un eje óptico. Adviértase que *toda sección hecha en un cristal, grande ó pequeño, pasa, en rigor, por el centro del elipsoide*; y para comprenderlo basta tener presente que el elipsoide está en todo el cristal, como en cualquiera parte suya (67).

Procediendo con el método acostumbrado, recurramos á lo más sencillo, y al efecto consideremos una sección cualquiera hecha en un cristal de espato calizo, como la que sirvió para el estudio en el párrafo (66). Sea *ABCD* (fig. 33) la elipse de sección que resulta. Es evidente que

sus ejes están situados de modo que uno de ellos, AC , coincide con el plano $ASPC$ de la sección principal ó que contiene al eje mayor de elasticidad EP , y el otro, DB , coincide con el eje menor. Cuando el elipsoide de elasticidad es prolongado, como en el caso presente, el eje mayor de la elipse de sección coincide siempre con el plano de la sección principal. Cuando es achatado, el eje menor de la elipse es el que se ajusta á dicho plano.

Un rayo de luz natural que incida perpendicularmente sobre la superficie $ABCD$, da lugar á un ordinario y á un extraordinario, polarizados en ángulo recto, y cuyas vibraciones se efectúan, forzosamente, en el sentido de los ejes de la elipse de sección, lo cual es una consecuencia de la naturaleza misma del rayo (48), y de lo expuesto en el párrafo (51).

Un rayo de luz polarizada, cuyas vibraciones se efectúen en el sentido de uno cualquiera de estos ejes, no se bifurca (62, 63 y 66), pero si la dirección de aquellas no se ajusta á esa condición, se bifurca como un rayo de luz natural, y el ordinario y el extraordinario que resultan efectúan también sus vibraciones en el sentido de los ejes de la elipse. Hay, sin embargo, una diferencia esencial entre uno y otro caso, y es, que con la luz natural el ordinario y el ex-

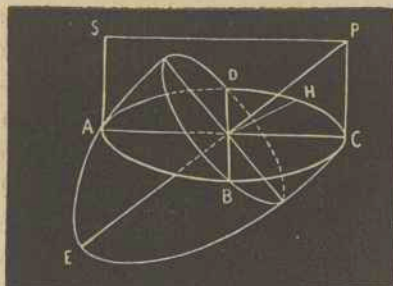


Fig. 33.

traordinario poseen igual intensidad, en tanto que con luz polarizada sus intensidades son, en general, desiguales. El cálculo y la experiencia enseñan que cuando las vibraciones del incidente normal polarizado forman con los ejes de la elipse de sección un ángulo diferente del recto, ó lo que es lo mismo, cuando no coinciden con ninguno de ellos,

1.º Las intensidades ó amplitudes de vibración del ordinario y del extraordinario están representadas por los lados del paralelógramo que tuviese por diagonal la amplitud de vibración del incidente.

2.º Las velocidades con que se propagan, dentro del cristal, estos dos rayos, son inversamente proporcionales á los ejes de la elipse de sección.

Como se ve, esto no es más que resumir la doctrina desarrollada en las consideraciones 62 á 68 y 70. Ambos principios son generales é igualmente aplicables á los cristales de dos ejes.

71. Sea, en uno de estos cristales, $ABCD$ (fig. 34), la elipse de sección, OM y ON los ejes ópticos, EP la bisectriz, que aquí supon-dremos coincide con el eje de elasticidad x . Dada la construcción misma de la figura, resulta evidente que el plano que pasando por el eje AC de

la elipse, sea perpendicular á la sección, contiene la recta OP . Imaginando ahora que el plano que da lugar á la sección permanece fijo, y que se hace girar el elipsoide al rededor del eje α , de que resultarán otras elipses de sección en lugar de la $ABCD$, es también evidente que los ejes ópticos describirán al rededor de α un cono recto, y que si en una cualquiera de sus posiciones, como, por ejemplo, en la representada en la figura, se dirigen por ON y OM planos perpendiculares á la elipse de sección, ó lo que es lo mismo, si por la normal OZ y por los ejes ópticos ON y OM se hacen pasar planos, el ángulo LOK que formen las intersecciones OK y OL quedará bisecado por el eje AC de dicha elipse.

Facilmente se concibe que el ángulo LOK alcanza su máximo valor cuando MN es paralela al plano de la elipse de sección, reduciéndose á cero cuando dicha recta coincide con el plano ZOC . Recordando ahora (68) que el plano de los ejes ópticos contiene los ejes mayor y menor de elasticidad, podrá concluirse que, en el primer caso, la recta MN ó su paralela DB , puesto que en los cristales sólo se trata de direcciones, marcará la posición del eje menor de elasticidad; y que en el segundo marcará la del eje medio β .

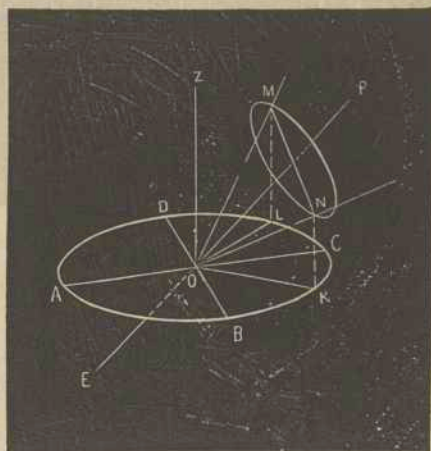


Fig. 34.

72. Las dos últimas consideraciones conducen, pues, á formular este otro principio general: *Uno de los ejes de la elipse de sección coincide siempre con la traza que sobre la misma determina el plano que biseca el ángulo diedro formado por los planos que pasan por la normal á la sección y por los ejes ópticos.*

No cuesta tampoco trabajo comprender que los cristales de un eje pueden ser considerados como un caso particular que deriva del general antes estudiado, bastando para ello concebir que es nulo el ángulo de los ejes ópticos. El principio que acaba de formularse les es, por consiguiente, aplicable.

73. **Luz polarizada convergente.**—Fijando la atención en las consideraciones relativas á la luz polarizada se verá que en ellas sólo ha intervenido un rayo ó un haz de rayos paralelos. Vamos ahora á estudiar los fenómenos á que da lugar la luz convergente cuando penetra en estas condiciones dentro de un cristal.

Para disponer un haz de luz convergente polarizada, recíbese un haz

de rayos paralelos sobre una lente convergente LL' (fig. 35), y se coloca detrás una turmalina T tallada como de costumbre, y cuyo eje supondremos paralelo á la dirección AB . El haz emergente definitivo es cónico y polarizado, y sus vibraciones se efectúan paralelamente á dicha dirección. Si á cierta distancia se recibe este haz sobre una segunda turmalina T' , cuyo eje CD sea perpendicular al de la primera, la luz quedará aquí completamente interceptada (58), pero si se interpone entre ambas una placa I de un cristal de un eje tallada perpendicularmente al mismo,

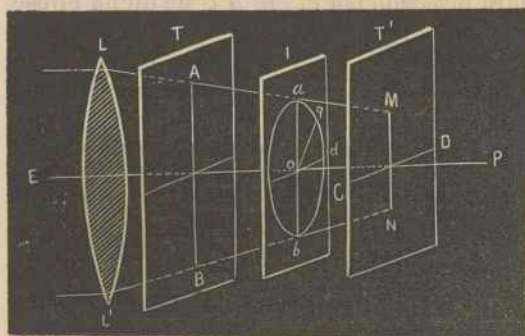


Fig. 35.

y se mira á través de la segunda turmalina, se percibe una serie de anillos concéntricos, alternativamente claros y oscuros, atravesados por una cruz negra, cuyos brazos se ensanchan á medida que se alejan del centro (fig. 36 A).

La explicación de este fenómeno estriba en la circunstancia de ser cónico el haz emergente y de efectuar

tuarse en un solo sentido sus vibraciones. Siendo EP la dirección del eje óptico de la placa I , todos los planos que se hagan pasar por esta recta podrán considerarse como secciones principales del cristal. Imagínense dos planos perpendiculares que, ajustándose á esta condición,

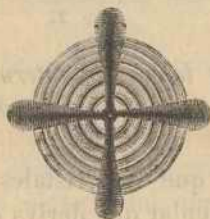


Fig. 36.—A.



Fig. 36.—B.

pasen, respectivamente, por las rectas AB y CD . Uno de ellos es $AMBN$, y si consideramos la luz polarizada en él contenida, veremos que llega sin modificarse á la segunda turmalina, en razón á que atraviesa la placa I según una sección principal ab , resultando, en definitiva, completa extinción á lo largo de la recta MN . La luz contenida en el otro plano perpendicular atraviesa también la placa sin modificarse, puesto que por cada uno de los puntos de la sección principal cd en que la tro-

pieza, puede considerarse que pasa un plano paralelo á la sección principal ab , y por consiguiente, al de las vibraciones, de que resulta completa oscuridad á lo largo de la recta CD . En estas dos direcciones rectangulares se percibirá, pues, una cruz negra.

Consideremos ahora un rayo situado fuera de estos planos, y concibamos que el elipsoide de elasticidad del cristal es cortado por un plano perpendicular al rayo. La sección será una elipse, y á poco que se reflexione se verá que el plano de las vibraciones no se ajusta á ninguno de sus ejes, originándose, en consecuencia, un rayo ordinario y un extraordinario, que vibrarán en el sentido de estos ejes, ó sea uno en el de la sección principal que pase por dicho punto, y otro en sentido perpendicular. Sea oq la sección principal de que se trata, y representémosla aparte en oq (fig. 37). KH y CD serán los ejes de la elipse de sección, y si AO es la dirección de las vibraciones, y aq su amplitud, qt y qm serán las direcciones y amplitudes de vibración de los rayos ordinario y extraordinario, los cuales han adquirido, al atravesar el cristal, una diferencia de marcha ($70. 2^\circ$), á causa de su desigual propagación en el mismo.

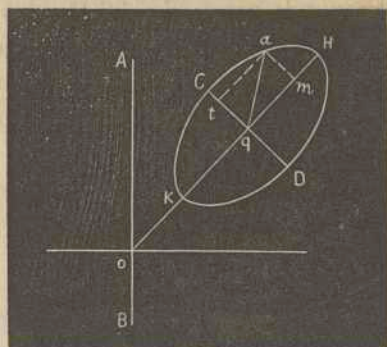


Fig. 37.

Al llegar á la segunda turmalina, cada uno de estos rayos se bifurca á su vez, resultando, en suma, dos ordinarios y dos extraordinarios. Los primeros quedan absorbidos en la turmalina, por la propiedad que esta posee; los segundos pasan, y como ahora

sus vibraciones son paralelas, caminan sumamente próximos y proceden de rayos que entrañan diferencia de marcha, podrá ocurrir que interfieran si esta diferencia es de una ó de un número impar de semilongitudes de ondulación, ó que se produzca aumento de intensidad en la luz si es de dos ó de número par de semilongitudes.

Ambos fenómenos deben tener lugar. En efecto, si suponemos que el rayo oblicuo emergente que acaba de considerarse da origen á interferencia, ha de haber, necesariamente, otro rayo más ó menos oblicuo, que por atravesar mayor ó menor espesor de la placa dé lugar á que la diferencia de marcha sea de un número par de semilongitudes y se aúnen las vibraciones. Pero en virtud de la simetría misma de condiciones al rededor del eje general EP (fig. 35) del sistema de turmalinas y placa, cada uno de los resultados expresados tiene lugar sobre todos los puntos de esta equidistantes del centro o (fig. 35), luego hé aquí explicada la formación de los anillos.

Para observar todos estos fenómenos no es necesario anteponer á la primera turmalina una lente convergente, pues la luz difusa del cielo ó de un fondo claro, que llega con todas las oblicuidades posibles y penetra así en el ojo, produce el mismo efecto.

Cuando se opera con luz homogénea, los anillos son alternativamente negros y del color de la luz. Cuando esta es blanca, los colores se superponen en parte, y producen anillos irisados.

Si la placa es de un cristal de dos ejes, tallada en sentido perpendicular á la bisectriz, ocurre considerar dos casos: que el plano de los ejes coincida con una de las secciones principales de las turmalinas, dispuestas como queda dicho, ó que biseque el ángulo recto que ellas forman. En el primer caso aparecen dos series de anillos, una sobre el extremo de cada eje, las cuales á cierta distancia de los centros se unen y vienen á formar una serie única de anillos ovales, atravesados por una cruz negra, cuyo brazo más delgado pasa por los centros de aquellas series. En el segundo caso, (fig. 36 B), los anillos presentan sensiblemente el mismo aspecto, y por cada centro pasa una rama de hipérbola oscura, cuyos extremos aparecen como difuminados, y cuya posición es simétrica con respecto á la línea de centros, pero que se disloca tan luego como aquel ángulo difiere del semirecto.

74. Determinación del elipsoide de elasticidad en los cristales de dos ejes.—La experiencia precedente da idea de un procedimiento práctico

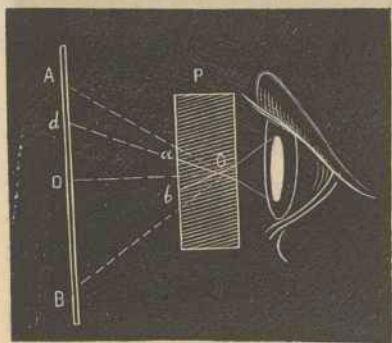


Fig. 38.

que puede emplearse para determinar el ángulo de los ejes ópticos y al propio tiempo la posición del plano que los contiene, y por lo tanto, la de los ejes del elipsoide. Para ello no hay más que tallar placas del mineral y someterlas á la observación entre las turmalinas, hasta encontrar una en que las curvas de un mismo orden sean iguales y regulares en los dos sistemas de anillos, á fin de tener la certidumbre de que la placa ha sido tallada perpendicularmente á la bisectriz. Una

vez esto conseguido se observan los sistemas de modo que el ojo los vea proyectados sobre un fondo plano bien iluminado. Sea *P* (fig. 38) la placa, *ao* y *bo* sus ejes ópticos. El ojo percibe los centros de los anillos sobre los puntos *A* y *B* del fondo, cada uno de los cuales se halla en la prolongación ideal del rayo que, siguiendo dentro del cristal la dirección del eje, se refracta al salir al aire, desviándose de aquella dirección, y penetra así en el ojo. Midiendo la distancia *AB* que media entre los cen-

tros, la DO del fondo á la placa, y llamando I al ángulo AOD , cuyo vértice supondremos en O , despreciando el espesor de la placa, se tendrá en primer lugar

$$\text{tang } I = \frac{AB}{2DO};$$

pero I puede considerarse como opuesto en el vértice, y por consiguiente, igual al ángulo de incidencia al cual corresponde el de refracción DOd , luego si llamamos V á este último y n al índice máximo de la sustancia (45), se tendrá también

$$\text{sen } V = \frac{\text{sen } I}{n},$$

y $2V$ será el valor del ángulo de los ejes ópticos.

Este procedimiento se recomienda por su sencillez. Aplicado al aragonito, cuyo índice máximo, para los rayos amarillos, es 1,686, me ha dado $2V = 18^{\circ}20'$, valor que concuerda exactamente con el que proporcionan otros procedimientos que reclaman el auxilio de instrumentos complicados.

75. Forma general del elipsoide de elasticidad, y posición de sus ejes en cada uno de los sistemas cristalinos.—La existencia del elipsoide, conforme se ha ido viendo, se desprende de la interpretación de hechos experimentales, independientemente de toda concepción acerca de la estructura de los cuerpos cristalinos, y por consecuencia, de la forma típica de cada sistema. No obstante esta independencia, la forma misma del cristal y la manera de estar de sus ejes cristalográficos establecen condiciones de posición en los de elasticidad. Estas condiciones se subordinan, en principio, á la simetría; y así, cuando al cristal se le puede hacer dar una semirevolución al rededor de una recta, sin que la orientación de la molécula fundamental varíe, se dirá que esta recta es un eje de simetría cristalográfica, que coincide necesariamente con un eje de elasticidad, puesto que el elipsoide, cualquiera que sea su forma, ha girado del propio modo, conservando nuevamente la misma orientación. En esta evolución, los extremos de los otros dos ejes, situados en el plano de la semirotación, son los únicos que quedan dirigidos en opuesto sentido al que antes tenían, pero ambos se ajustan sobre sus propias rectas, y por lo tanto, la orientación de la figura vuelve á ser la misma.

De aquí se deduce que allí donde hay un eje de simetría en el cristal, allí existe también un eje de elasticidad. No debe, empero, olvidarse que la recíproca puede dejar de ser cierta, en atención á que hay sistemas, como el monoclinico, que no tienen más que un eje de simetría, y aun

que no tienen ninguno, como el triclinico, y sin embargo, el elipsoide es de tres ejes.

Sistema cúbico.—En este sistema todas las direcciones pueden ser consideradas como ejes ópticos, á lo menos con arreglo á la interpretación que se da á estas líneas. Los ejes cristalográficos y los de elasticidad son todos iguales, y por consiguiente, el elipsoide es una esfera.

Sistemas cuadrático y exagonal.—Estos sistemas tienen un eje principal de simetría, que es el cristalográfico, y coincide con el de revolución del elipsoide, y por lo tanto, con el eje óptico, á saber, con α si el elipsoide es prolongado, y con γ si es achatado. Los otros dos ejes de elasticidad, situados en un plano perpendicular á aquella dirección, son iguales, resultando ser $\beta = \gamma$ en el primer caso, y $\alpha = \beta$ en el segundo. En este sentido la sección es, evidentemente, circular, ó lo que es lo mismo, hay un número infinito de ejes de simetría contenidos en ella.

En el sistema cuadrático, la posición del eje de revolución está determinada por la arista lateral h , y los otros dos por las básicas b . En el exagonal, dicho eje lo determina, del propio modo, la arista h , y los otros dos la b , si bien en este sistema, considerado como romboédrico, el eje de revolución está determinado por la arista $e^1 e^2$, como en la turmalina y el cuarzo. En ambos sistemas no puede haber dispersión, ni de los ejes de elasticidad, ni, por consecuencia, del eje óptico. En efecto, aunque á cada color corresponda, en rigor, un elipsoide, el eje de revolución es común á todos, y de resultas, los ejes de elasticidad de la misma categoría coinciden siempre. Todo se reduce, pues, á que los elipsoides de los distintos colores no sean igualmente achatados ó igualmente prolongados, aunque, como ya se dijo, (69), las diferencias son insignificantes.

Sistema ortorómbico.—Tiene tres planos de simetría: $p, h^1 g^1$, y tres ejes de simetría, que son los cristalográficos, á saber: $h^1 g^1$, y las dos diagonales pg^1, ph^1 de las bases p , cada uno de los cuales coincide con uno de elasticidad, y por lo tanto, el elipsoide es de tres ejes. Lo único que queda por determinar son las longitudes relativas de los tres últimos, y esto sólo se consigue por la observación en cada caso particular; en unos minerales α coincide con h^1 , en otros, con la diagonal mayor ph^1 , ó con la menor pg^1 de la base. En este sistema no puede haber dispersión de los expresados ejes, porque han de ajustarse forzosa é invariablemente á los cristalográficos. Dos de estos determinan la posición del plano de los ejes ópticos, los cuales pueden ofrecer dispersión en razón á las diferencias de longitud que pueden existir entre los de elasticidad del mismo orden, correspondientes á los distintos colores.

Sistema monoclinico.—El único plano y el único eje de simetría son, respectivamente, g^1 y la ortodiagonal. Esta dirección es, pues, el único

eje cristalográfico que determina la posición de un solo eje de elasticidad, sin que desde luego sea dado fijar cuál sea; los otros dos están contenidos en el plano perpendicular g^1 , que contiene, igualmente, los otros dos ejes cristalográficos, que no coinciden ya con los de elasticidad.

Puede ocurrir que la ortodiagonal coincida con el eje β , en cuyo caso g^1 es el plano de los ejes ópticos; ó que coincida con uno de los otros dos, α ó γ , en cuyo caso el plano de estos, que es, á la vez, el de los ejes ópticos, pasa por la ortodiagonal.

Sistema triclinico.—Este sistema carece de todo eje de simetría, y por consiguiente, no existiendo relación alguna necesaria entre los ejes cristalográficos y los de elasticidad, no es posible fijar de antemano la posición de estos últimos. Sólo por medio de la observación directa es dado determinarla en cada caso particular.

Estas consideraciones son de la mayor importancia, pues en virtud de ellas es dado llegar á determinar por medio del microscopio el sistema cristalino á que pertenece el mineral sometido al análisis.

II

El Microscopio

76.—Principio del instrumento.—Reducido á su expresión más simple, el microscopio consta de una lente convergente, de corto foco, situada cerca del objeto, y que por esta razón se llama *objetivo*; y de otra lente, también convergente, llamada *ocular*, que amplifica la imagen real del objeto dada por la primera.

Un objeto *ad* (fig. 39), colocado antes y muy cerca del foco principal del objetivo *B*, tiene su imagen real, invertida y amplificada en *AD*. Esta imagen hace las veces de objeto ante un ocular plano-convexo *O*, colocado á una distancia menor que la focal principal, de que resulta, en definitiva, una imagen virtual *mt* mucho más amplificada. Situando en *J*, cerca de la cara plana del ocular, la pupila del ojo, penetran en él los dos haces emergentes que proceden de los extremos *A* y *D*, y cuyas prolongaciones ideales hacen ver la imagen virtual entre *m* y *t*.

El objetivo y el ocular están montados en tubos, pudiendo deslizarse el del segundo dentro del otro, para alejar ó acercar las lentes y conseguir fácilmente que la imagen se vea lo mejor posible, en cuyo caso se dice que está *enfocado* el objeto. A fin de que este se halle muy iluminado se coloca debajo un espejito plano ó cóncavo que recibe la luz difusa de la atmósfera ó de una lámpara, y la refleja en el sentido del ob-



jeto y del eje general del instrumento. El objeto se coloca sobre una lámina de vidrio, llamada *porta-objeto*, y se cubre con otra muy delgada, de menor tamaño, llamada *cubre-objeto*. La *preparación* así dispuesta se deposita, cuando debe ser observada, sobre un soporte plano, llamado *platina*, que forma parte del instrumento.

Pero en un microscopio así construido no podría menos de dejarse sentir el efecto de las aberraciones de esfericidad y refrangibilidad, si bien fuera dado atenuarlas, aunque nunca destruirlas completamente, por medio de diafragmas, lo cual entraña, como es fácil recordar (35), gran pérdida de luz. De aquí la necesidad de que el ocular sea acromático, y que el objetivo lo sea también, y además, aplanético.

77.—**Objetivo.**—El acromatismo del objetivo se obtiene adaptando

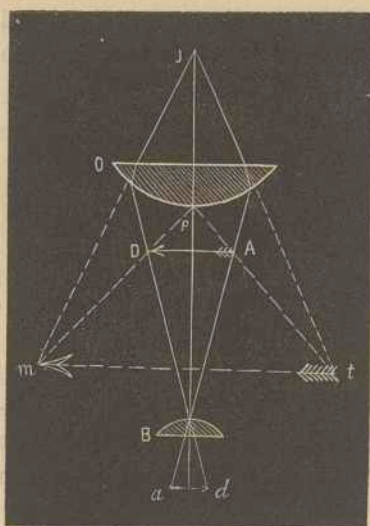


Fig. 39.

una lente plano-cóncava de flint á una bi-convexa de crown, cuyas curvaturas se han calculado de modo que la doble lente resulte aplanética y acromática para los dos colores extremos más acentuados, el rojo y el azul violado, ó para el rojo y el amarillo. En el primer caso los bordes de la imagen presentan una coloración ligeramente amarilla ó verdosa; en el segundo, azulada. A fin de evitar que entre las dos lentes sobrepuestas se interponga polvo ó se condense la humedad, se las hace adherir de una manera definitiva, encolándolas por medio de bálsamo del Canadá. Un objetivo de microscopio consta de dos, tres ó cuatro lentes acromáticas como la descrita, situadas á corta distancia

unas de otras y montadas en un tubo que se atornilla en el extremo del instrumento. El sistema así constituido actúa como una sola lente de mayor aumento. Las caras planas están vueltas hacia el objeto, y la que mira á él inmediatamente se llama *cara frontal*, designándose con el nombre de *distancia frontal* la que media entre esta cara y el objeto.

Dado el principio en que se funda el microscopio no cuesta trabajo comprender que, con un mismo objetivo y un mismo ocular, podrían obtenerse todas las ampliaciones imaginables, sin más que ir acercando el objeto al foco principal de aquella lente, pues á medida que el expresado intervalo disminuyese, la imagen real iría aumentando de tamaño y definiéndose á una distancia mayor, que llegaría á ser considerable y reclamaria, por consecuencia, tubos de longitud desmesurada. Para obviar

este inconveniente y obtener grandes ampliaciones á distancias cortas, no hay más remedio que disminuir la focal del objetivo, y esto se consigue reduciendo su tamaño. Los objetivos más potentes que hoy se construyen son tan pequeños que es preciso valerse de una lente de aumento para distinguirlos.

El *ángulo de abertura* de un objetivo es el que forman los rayos extremos que, partiendo de un punto céntrico del objeto, inciden sobre la cara frontal. Sobreentiéndase que estos rayos, para ser realmente útiles, han de concurrir en el mismo punto de la imagen producida por la concurrencia de otros que incidan en la parte central de la misma cara, porque de otra suerte, es decir, á no realizarse esta condición, de nada serviría que la lente posea grande ángulo de abertura. Por lo dicho se comprende que en un objetivo rigurosamente aplanético, este ángulo será el formado por los rayos que, partiendo de un punto céntrico del objeto, pasan por los bordes de la cara frontal. Su amplitud es una medida de la bondad del objetivo, pues cuanto mayor sea será prueba de que recoge más rayos emanados del objeto y da, por consiguiente, una imagen más iluminada. El objetivo de mayor fuerza que construye Nachet, uno de los mejores fabricantes franceses, posee un ángulo de abertura de 170° .

Dos modificaciones importantes se han introducido en los objetivos, á saber:

la *corrección* y la *inmersión*. La primera consiste en hacer que la distancia de las lentes en su montura pueda variarse á voluntad, á fin de adaptar su situación recíproca á las condiciones ópticas que establece el espesor variable del vidrio que cubre las preparaciones y el líquido ó el medio que las envuelve. La segunda, que es, en la práctica, la más útil, consiste en introducir la cara frontal del sistema en un líquido, que

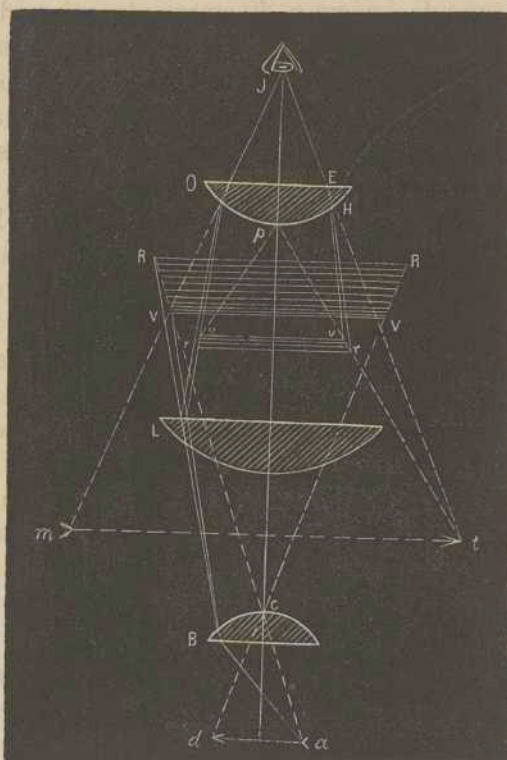


Fig. 40.

suele ser la glicerina, el aceite, ó simplemente el agua destilada, á fin de evitar la gran divergencia que toman los rayos al salir del vidrio cubre-objeto al aire, y favorecer así su entrada en el objetivo.

78. **Ocular.**—El acromatismo del ocular pudiera también obtenerse por el procedimiento empleado en los objetivos. Sin embargo, como este medio entraña la disminución de convergencia de la lente, y en el caso que ahora se considera no sería fácil emplear más de una, se recurre á otro medio, que reúne, además, otras ventajas.

Sea B (fig. 40) un objetivo simple, y ad un objeto, cuya imagen real, invertida y amplificada se forma al otro lado, sobre los ejes secundarios acR y dcR ; pero como los rayos que pasan por el objetivo experimentan en él la dispersión, la imagen se compone, en rigor, de una serie de imágenes diversamente coloreadas, hallándose la roja en RR y la violada en VV (36). Interponiendo entre esta imagen y el objetivo una lente plano-convexa L , los haces cónicos que iban á formar los extremos RR , VV , de la imagen, se refractan en la nueva lente y se hacen más convergentes, reduciendo la dimensión de aquella y trasladándola á $rrvv$. Bien se echa de ver que los rayos rojos que llegan del objetivo inciden sobre la cara curva de la nueva lente con mayor oblicuidad que los violados, y se comprende asimismo la posibilidad de que al refractarse en ella, el foco de la imagen roja se forme antes que el de la violada, como lo indica la figura, para lo cual no hay más que aumentar ó disminuir la curvatura de la cara. Si ahora se coloca en O una lente plano-convexa, cuya distancia focal sea un poco mayor que la que la separa de la imagen, y cuyo centro óptico p coincida con la recta que pasa por r y v , los rayos rH , vH que parten de estos puntos encuentran á la lente en sentido inverso al de su dispersión en la misma, y será, del propio modo, posible calcular la curvatura de suerte que unos y otros emerjan por EJ en perfecta coincidencia, y den por resultado una imagen virtual definitiva incolora en mt .

Una vez calculadas las curvaturas de ambas lentes y la distancia que debe mediar entre ellas, datos que también pueden obtenerse directamente ensayando diversas lentes plano-convexas, alejándolas ó acercándolas, hasta obtener el efecto deseado, se las monta en un tubo, y queda así constituido el *ocular de Huyghens*, mediante el cual desaparecen los pequeños defectos de acromatismo que pudieran existir todavía en el objetivo.

79. **Campo.**—En el punto en que se define la imagen real MT (fig. 41), se coloca dentro del ocular un anillo plano ó *diafragma* $PMTQ$ cuyo objeto es limitar el espacio visible ó *campo*, á fin de impedir que se vean las imágenes de puntos h , g de la preparación demasiado separados del eje principal, las cuales irían á formarse sobre puntos H y G situados fuera del plano en que se define la MT de otros más céntricos. De

este modo se corrige el defecto inherente á la excesiva amplitud del ángulo de los ejes secundarios (39), y se consigue *planificar* el campo, de que resulta que, al enfocar un objeto, todos los otros situados en su mismo plano perpendicular al eje principal y comprendidos en el campo, quedan también sensiblemente enfocados.

Ahora puede comprenderse otra de las ventajas de la lente *C*, llamada *de campo* ó *colectora* precisamente porque lo ensancha utilizando mayor número de ejes secundarios. En efecto, el punto *d*, que sin ella iría á formar su imagen en *D*, sería invisible, puesto que el haz convergente en cuyo extremo debiera encontrarse, tropezaría con el diafragma; pero en virtud de la inflexión que la lente *C* le hace experimentar, la nueva imagen se forma en *M* dentro del campo.

El campo se mide por la amplitud del ángulo de los ejes secundarios que pasan por los bordes del diafragma. Si estos ejes no experimentasen la inflexión que la lente colectora les imprime, la medida de que se trata sería la del ángulo subtendido por el diámetro del diafragma y cuyo vértice es el centro óptico del objetivo. De todos modos, si el círculo del diafragma se considera como sobrepuesto á aquella lente, podrá suponerse, sin error sensible, que el expresado diámetro, que llamaremos *d*, se ajusta á tales condiciones, y en este supuesto, y llamando *D* á la distancia que media entre la lente colectora y el objetivo, y α al ángulo en cuestión, se tendrá

$$\text{tang } \alpha = \frac{d}{D}.$$

80. **Círculo de Ramsden.**—Considerado el círculo iluminado del campo como un objeto, no hay duda de que la imagen virtual de un punto cualquiera de su circunferencia, ó lo que es igual, del borde mismo

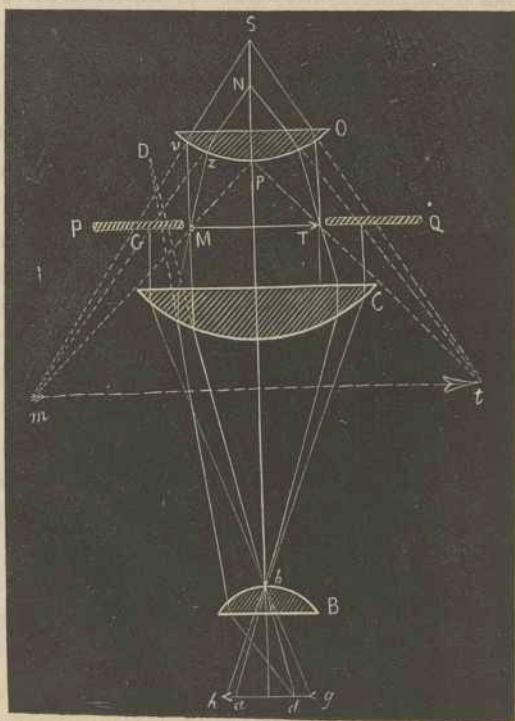


Fig. 41.

del diafragma, será la que resulte de todos los rayos que, emanados de dicho punto, caen sobre la lente de aumento del ocular y emergen divergentes. Pero de todos los rayos que partan de un punto M del diafragma hay algunos, como los contenidos en el espacio vmz , singularmente útiles ó *eficientes*, por lo luminosos, á causa de ser las prolongaciones mismas del haz convergente cuyo vértice está en M y recoge gran cantidad de luz, por interesar una parte considerable del objetivo.

Otro tanto puede decirse del punto T' , de que resulta que al emerger los haces procedentes de M y T' se cruzan de S á N . Como esto mismo es aplicable á todos los puntos de la circunferencia, es consiguiente que el haz total emergente debe ser un cono hueco, y que si la pupila se sitúa en el espesor SN cerca del vértice, recibirá la suma de rayos útiles para percibir el campo. La sección de este cono entre S y N es el *ánulo ocular* ó *círculo de Ramsden*. Cuanto más pequeña es la lente de aumento del ocular, menos distante de ella se encuentra este círculo; y por eso cuando se emplean oculares de mucho aumento hay que colocar el ojo junto á la lente misma.

81. **Micrómetro.**—**Ocular micrométrico.**—El micrómetro es una laminita de vidrio, de un grueso comparable al de los cubre-objeto, dispuesta en una montura de metal ó de madera, sobre la cual se han trazado rayas paralelas equidistantes muy finas, cuyos intervalos corresponden á fracciones muy pequeñas de milímetro. Los hay en que esta unidad está dividida en 10 partes, en otros en 100, en 500, y hasta en 1,000 partes. Así dispuesta la lámina, se llama *micrómetro objetivo*, porque sirve para ser colocada como objeto, delante del objetivo.

Cuando la laminita se engasta en el anillo del diafragma que limita el campo, el ocular que la lleva se llama *micrométrico*. En los contruidos por Nachet la plaquita lleva trazadas 50 divisiones que comprenden una longitud exacta de 5 milímetros, de suerte que cada división equivale á una décima de milímetro.

82. **Retículo.**—Así se llama una cruz formada de rayas muy finas trazadas sobre una laminita de vidrio, que se coloca sobre el diafragma. En algunos oculares la cruz está formada por hilos de platino muy finos; pero por mucho que lo sean, siempre resultan demasiado gruesos. El punto de cruzamiento debe coincidir con el centro del campo.

83. **Cámara clara.**—Este instrumento consiste en un pequeño prisma de vidrio cortado de manera que, colocándole encima del ocular permite ver, simultáneamente, la imagen del objeto que se observa con el microscopio, proyectada sobre un papel blanco colocado fuera del cuerpo del instrumento, y la extremidad de un lápiz, con el cual se pueden ir siguiendo los contornos y los menores detalles de la imagen.

Para conseguir cierta destreza en esta operación es necesaria alguna

práctica en la graduación de las luces, pues si la imagen está mucho más iluminada que el papel, no se ve bien el lápiz, y si sucede lo contrario no se distinguen los detalles. Esta graduación se facilita mucho por medio de un vidrio de color azulado, montado en un anillo, como lo deja ver en perspectiva la figura 42, el cual puede interponerse, á voluntad, entre el ocular y el prisma, amortiguando así la excesiva claridad de la imagen.

La figura 42 representa la cámara clara que construye Nachet.

84. **Aumento** — El *aumento* del microscopio, como el de una simple lente (40), es la relación entre el ángulo subtendido por la imagen virtual y el que subtiende el objeto, lo cual supone, necesariamente, que una y otro se refieren á igual distancia de la lente de aumento del ocular. Aquí, como allí, puede admitirse que estos ángulos son proporcionales á sus tangentes, y definir el aumento diciendo que es la relación entre el tamaño lineal de la imagen y el del objeto. Es necesario fijarse bien en que el aumento de que se trata es el *lineal* ó en *diámetro*, como usualmente se llama, porque hace referencia á una sola dimensión del objeto, comparada con su homóloga de la imagen.

La dificultad práctica del asunto radica en determinar el lugar en que se define la imagen virtual, ó lo que es lo mismo para el caso, la distancia de la vista distinta á que dicha imagen se halla referida por el ojo. Algunos autores, y entre ellos Robin, en su gran tratado sobre el microscopio, dicen ser esta distancia mucho menor que la de la vista distinta ordinaria, y se fundan en consideraciones análogas á las que he empleado al exponer el hecho cuando se trata de la imagen virtual producida por una lente muy convergente (40 y 42). Mi larga práctica en la observación microscópica y telescópica me ha enseñado, por el contrario, que si bien á primera vista parece como que deba existir paridad de condiciones entre aquel caso y estos dos, no la hay en modo alguno.

Lo que ocurre, y en ello no se ha fijado nadie hasta ahora á lo que parece, es que cuando se mira con el microscopio se da instintivamente á los ojos una disposición idéntica á la que toman en el estrabismo, y de ahí que sea fácil equivocarse, interpretando el trabajo que entraña esta disposición como un esfuerzo de adaptación, cuando en rigor es otro el fenómeno que se origina. La prueba concluyente de que esto es así y no de otro modo está en que si se da á los ojos la indicada disposición, prescindiendo ó no de que se mire fijamente un objeto determinado, ó lo que



Fig. 42.

es lo mismo, sin que tenga que intervenir ningún trabajo especial de acomodación, y se aplica entonces el ojo al ocular, se percibe distintamente la imagen.

Entiendo que también es dado explicar teóricamente de un modo racional el fenómeno de que se trata. En efecto, con una simple lente, esta y el ojo deben colocarse á una distancia del objeto tanto menor cuanto más corta es la focal principal; de que resulta que el ojo necesita hacer un esfuerzo de acomodación comparable, aunque no igual, al que tendría que efectuar para ver, sin lente, al mínimum de distancia. Verdad es que en el caso actual la lente misma facilita las condiciones de visibilidad, pero no tanto que las asimile á las ordinarias de la visión distinta, y esto se comprende observando que todos los rayos que, emanados de un punto dado del objeto, caen sobre la lente, poseen igual intensidad y forman un haz emergente ancho y, por consecuencia, poco intenso, que al penetrar en el ojo le obliga á un esfuerzo de adaptación parecido al que entraña la aproximación directa del objeto. Por el contrario, cuando se mira con el microscopio, los rayos eficientes (80) caen sobre la lente con menor divergencia que caerían los que procedieran de un objeto que se colocase á igual distancia, fuera del instrumento, como en el caso anterior, resultando, en suma, que ahora los haces emergentes son menos divergentes y obligan al ojo á un trabajo de acomodación casi insensible. Si á esto se añade que la visión está actualmente favorecida, por tratarse de rayos muy luminosos, se comprende aun mejor porqué la imagen se halla referida á la distancia de la visión distinta.

Fijado este primer punto, nada más fácil que proceder á la medida del aumento. No hay más que servirse de un objeto lineal de dimensión conocida, trasladar idealmente, por medio de la cámara clara, su imagen sobre una regla dividida, colocada exteriormente en sentido perpendicular al eje del microscopio y á una distancia del ocular igual á la de la visión distinta del observador, y ver cuántas unidades de la regla comprende la imagen amplificada de una unidad igual del objeto; este número expresará el aumento. Por ejemplo, el objeto es un micrómetro objetivo en que el milímetro se halla dividido en 10 partes, y la regla lo está en milímetros; si la imagen de una sola división micrométrica comprende 25 de la regla, el aumento será

$$\frac{25}{0,1} = 250 .$$

Hay otro método, que no reclama ni cámara clara, ni regla dividida. Consiste en servirse del ocular micrométrico, y en ver cuántas de sus divisiones comprende una sola del mismo orden del micrómetro objetivo, con lo cual se obtiene la relación entre el tamaño de la imagen real am-

plificada que da el objetivo, y el del objeto. Multiplicando esta relación por el aumento propio de la lente terminal del ocular, obtenido como quedó explicado (42), el producto será la expresión del aumento. Por ejemplo, si en los micrómetros objetivo y ocular el milímetro está dividido en 10 partes, y la imagen de una división del primero comprende 30 del segundo, la primera relación será $\frac{30}{1} = 30$, y si suponemos que es 20 el aumento de la lente de este nombre, el definitivo será $30 \times 20 = 600$.

Así practicados, los dos procedimientos dan resultados concordantes. El segundo tiene el inconveniente de no dar el aumento más que para el caso en que se emplee el ocular micrométrico. Hay, sin embargo, fácil manera de remediarlo, colocando, como en el caso anterior, al lado del instrumento, una regla dividida, pero á distancia arbitraria del ocular, y viendo cuántas divisiones comprende la imagen de un objeto cualquiera. Separando ahora el ocular micrométrico, y sustituyéndole por otro que no lo sea, se ve cuántas divisiones de la regla comprende la imagen del mismo objeto. Es evidente que entre el número que resulte en esta operación y el que resultó en la anterior hay la misma relación que entre los aumentos respectivos; así, pues, llamando n al número y a al aumento relativos al nuevo ocular, n' y a' á las mismas cantidades del micrométrico, será

$$\frac{n}{n'} = \frac{a}{a'} \quad , \text{ de donde } a = \frac{a'n}{n'} .$$

Por cualquiera de estos procedimientos se determina el aumento que corresponde á cada sistema compuesto de un objetivo y de un ocular dados. Es indispensable, al hacer esta determinación, anotar á qué distancia del objetivo se ha situado el ocular, pues como el tubo que lo contiene puede aproximarse ó alejarse del primero, á lo cual es inherente un aumento mayor ó menor, importa precisar bien, en cada caso, la distancia que los separa. Generalmente suele operarse á la máxima y á la mínima que permite el juego mismo de los tubos del instrumento.

Los aumentos más considerables obtenidos hasta el día se elevan á 4,000 diámetros, á lo menos los que merecen realmente llamarse prácticos, pues si bien se han conseguido aumentos muy superiores á esta cifra, reclaman una serie de condiciones de observación difíciles de realizar. Por lo demás, un aumento claro de 1,000 á 2,000 diámetros basta cumplidamente, y aun sobra, para todas las exigencias de la investigación petrográfica.

85. **Tamaño de los objetos microscópicos.**—Para medir el tamaño efectivo de estos objetos pueden seguirse dos procedimientos. Uno de ellos consiste en trasladar su imagen, por medio de la cámara clara, sobre un papel blanco colocado á la distancia de la vista distinta. Midiendo



esta imagen y dividiendo el número que resulte, por el del aumento, el cociente expresará el tamaño absoluto del objeto. Por ejemplo, si aquella mide 5 milímetros sobre el papel, y el aumento es de 600, la dimensión del objeto, en milímetros, es de $\frac{5}{600} = 0^{\text{mm}},008$. La razón de esto se comprende observando que aquí se procede en orden inverso al prescrito en la medida del aumento.

Otro procedimiento muy expedito es el siguiente. Se coloca delante del objetivo el micrómetro de este nombre, y se ve cuántas divisiones del ocular micrométrico comprende la imagen real amplificada de una del primero. Por ejemplo, si los micrómetros objetivo y ocular están divididos en décimas de milímetro, y la imagen de una división del primero comprende 20 de las del segundo, cada una de estas equivaldrá á $\frac{0,1}{20} = 0^{\text{mm}},005$. Bien se deja entender que este valor sólo corresponde al objetivo empleado con el ocular micrométrico, y á una distancia fija entre ellos. De aquí la necesidad de determinarlo para cada objetivo en particular, y de operar á distancias fijas, que suelen ser, como para el aumento, la máxima y la mínima que permite el juego mismo de los tubos del instrumento. El tamaño de un objeto se mide de este modo con suma rapidez, pues todo se reduce á una simple observación. Por ejemplo, si con un objetivo dado, cada división del micrómetro ocular vale $0^{\text{mm}},003$, y la imagen comprende media división, el tamaño del objeto será de $0,5 \times 0^{\text{mm}},003 = 0^{\text{mm}},0015$.

86. **Poder definidor.**— Así se designa la propiedad que tiene el microscopio, de definir con toda limpieza la imagen de los pequeños detalles del objeto. Como la perfecta formación de esta imagen depende, en primer término, de la bondad óptica del objetivo, puesto que el papel del ocular se limita tan solo á amplificar, dicho se está que á él se refiere, principalmente, el poder definidor.

Aun establecida en estos términos, la definición no entraña tampoco precisión absoluta, por la imposibilidad de fijar el límite de pequeñez de un objeto ó de sus menores detalles, en lo cual cabe, como es fácil concebir, mucha ambigüedad. Lo importante en este punto es comprender que el poder definidor marca el límite á que es posible elevar el aumento con un objetivo dado, puesto que de nada serviría que la imagen siguiera amplificándose más allá de este extremo, si sus contornos y detalles visibles resultan confusos y mal definidos. El cuerpo más diminuto que es posible ver distintamente con los buenos microscopios ha de tener, por lo ménos, una dimensión de $0^{\text{mm}},0003$, ó sea casi igual á la longitud de ondulación del color rojo, ó la mitad de la del violado (46).

Algunos autores establecen distinción entre el poder definidor y el *separador*, diciendo que este último hace relación á la facultad de aislar las imágenes de objetos ó detalles sumamente contiguos; pero bien con-

siderada, esta facultad no difiere esencialmente de la anterior, pues una y otra radican en las cualidades ópticas del objetivo, en su acromatismo y aplanetismo, y es evidente que no aparecerá separado lo que no sea, al propio tiempo, perfectamente definido.

Para juzgar de la potencia óptica de un microscopio se hace uso de los *testa-objetos*, que son cuerpos que contienen detalles de estructura sumamente pequeños. Las escamitas de cierta especie de mariposa, que contienen 13 estrías en el espacio de una centésima de milímetro; algunas diatomeas, como la *Navicula sigmoidea*, que contiene 41,3 estrías en el mismo espacio, pueden servir de ejemplo.

87. **Aspecto de las burbujas y cavidades.**—Los cuerpos sólidos transparentes que se presentan en la observación petrográfica poseen casi siempre, y con frecuencia en extraordinaria abundancia, burbujas y cavidades microscópicas huecas ó llenas de diversos líquidos, y hasta formadas por medios sólidos de refringencia distinta de la del que les rodea, que se designan con el nombre de *inclusiones* (24). Revisten en cada caso un aspecto característico que permite, en general, diferenciarlas entre sí, siendo necesario, por la importancia que entrañan en el estudio de las rocas, tener conocimiento previo de la interpretación que hay que dar á cada una de estas apariencias.

Sea *G* (fig. 43) una esfera hueca ó inclusión gaseosa en un medio sólido *M* transparente, y *B* el objetivo del microscopio. El rayo *A*, procedente del espejo, incide en *a* sobre la esfera, y se transmite hacia *q* sin desviarse. El *C* la encuentra en *c*, se quiebra por *ch* y luego por *hp*. El *D*, por *dm* y luego por *mt*; suponiendo, por simplificar, que de *h* á *p* y de *m* á *t* no hay nueva desviación, lo cual no es exacto, puesto que hay nuevo cambio de medio, aunque cuando se trata de objetivos de inmersión la suposición dista apenas de la verdad. Se ve, pues, que el haz de rayos paralelos que penetra en la esfera, sale divergente, y que esta divergencia es tanto más acentuada cuanto más lejos del eje se considera la incidencia. Pero la imagen de cada región de la esfera será tanto más luminosa cuanto más rayos útiles intervengan en su formación, luego el círculo ó la figura según la cual aparecerá definida una burbuja ó inclusión de esta naturaleza será oscuro hacia la periferia, y de brillo sensiblemente igual al del medio circunvecino hacia la región central.

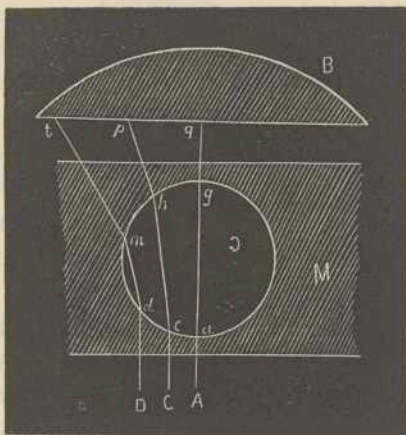


Fig. 43.

Si la burbuja es líquida, y dado que su refringencia sea inferior á la del medio que la contiene, como de ordinario acontece, la divergencia del haz que la atraviesa es menor que en el caso precedente, y los bordes que la limitan son, por lo tanto, menos oscuros.

Las inclusiones vítreas ofrecen aún menos diferencia de refringencia, y suelen distinguirse por su color, casi siempre distinto del que afecta el medio en que se hallan, y además, por la presencia frecuente de burbujas inmóviles.

88. Modelos de microscopios.— Los microscopios destinados al estudio de la petrografía y mineralogía se fundan generalmente en este principio: Cuando se hace girar á un mismo tiempo el objetivo y el objeto, la imagen gira también, con la particularidad de que cada uno de sus puntos equidista siempre del centro del campo. Síguese de aquí que el punto que corresponde á dicho centro gira sobre sí mismo ó sin cambiar de lugar, en coincidencia constante con el de cruzamiento del retículo. También se emplea otro procedimiento que consiste en mantener fijos el objetivo y el ocular y hacer girar el objeto, pero en tal caso es de absoluto rigor que el eje de rotación de este sea prolongación del eje óptico del instrumento, pues ya se comprende que por poca discrepancia que exista entre uno y otro eje la imagen se desviará notablemente del centro del campo, si bien hay medio, entre ciertos límites, de corregir este defecto, haciendo que el centro del campo vaya á colocarse en la prolongación de aquel eje.

Como no me he propuesto imprimir á esta INTRODUCCIÓN caracter de actualidad, y por consiguiente, transitorio, sino el de interés permanente que entrañan los principios y consideraciones que en ella expongo, quería abstenerme de dar á conocer los nombres de los constructores de microscopios que hoy figuran en primera línea. Me he determinado, no obstante, á hacer aquí un paréntesis en mi plan, persuadido de que, después de todo, nada se pierde, antes al contrario, en que el lector tenga noticia de aquellos nombres, dado que á ellos ha de acudir cuando trate de completar su educación en la práctica de la micrografía petrográfica. Estos nombres son: Zeis, de Jena (Alemania); Merz, de Munich; Alfredo Nachet, de París; Plösl, de Viena; Powell y Lealand, y Ross, de Londres. También son dignas de especial mención las casas de Verick, de París; de Leitz y de Seiberth, de Vetzlar.

Cada casa construye modelos de diferentes tamaños, y tiene adoptada una numeración especial para la serie de sus objetivos. Todos los constructores citados fabrican buenos instrumentos, de modo que no es posible, ni el carácter ajeno á todo interés industrial, que debe sobresalir en esta publicación lo permite, recomendar con preferencia una casa determinada. Pero me es lícito consignar, porque en ello sólo interviene un

hecho tangible, independiente de toda predilección, que el microscopio de que me sirvo se ajusta de un modo perfecto á todas las condiciones ópticas y mecánicas que exigen la teoría y la práctica, y está construido por Nachet.

Este fabricante tiene tres modelos. El mayor va acompañado, además de todos los accesorios necesarios, de un juego de cuatro oculares y otro de seis objetivos, uno de los cuales, N.º 9, es de inmersión. El aumento máximo es de 1,400 diámetros, y el precio de 1,200 francos. Al modelo medio acompañan cuatro oculares y cinco objetivos, con el N.º 9; el aumento máximo es igual al anterior, y el precio de 750 francos. Al pequeño modelo acompañan dos oculares y tres objetivos; aumento máximo, 780 diámetros, y precio 350 francos. Hay que advertir que los aumentos que dan los constructores en sus catálogos son nominales, pues aunque, en rigor, puede llegarse á las cifras que en ellos se indican, en la práctica hay que rebajarlas algún tanto, si se quiere que la imagen resulte perfectamente clara y definida. Por ejemplo, el aumento de 1,400 queda reducido á 1,200. El pequeño modelo basta, en general, para todas las necesidades del estudio;

con el modelo medio pueden llevarse á cabo toda clase de observaciones, aun las más delicadas; el gran modelo es más bién un aparato de lujo.

Para dar á conocer el microscopio, elijo el gran modelo de Nachet, toda vez que, no difiriendo en el fondo, ó en cuanto á su disposición y mecanismo, de los otros dos, la explicación les es, igualmente, aplicable. El tubo *B* (fig. 44) á que se atornilla el objetivo, está invariablemente unido al cuerpo móvil del instrumento, y puede caminar en un sentido

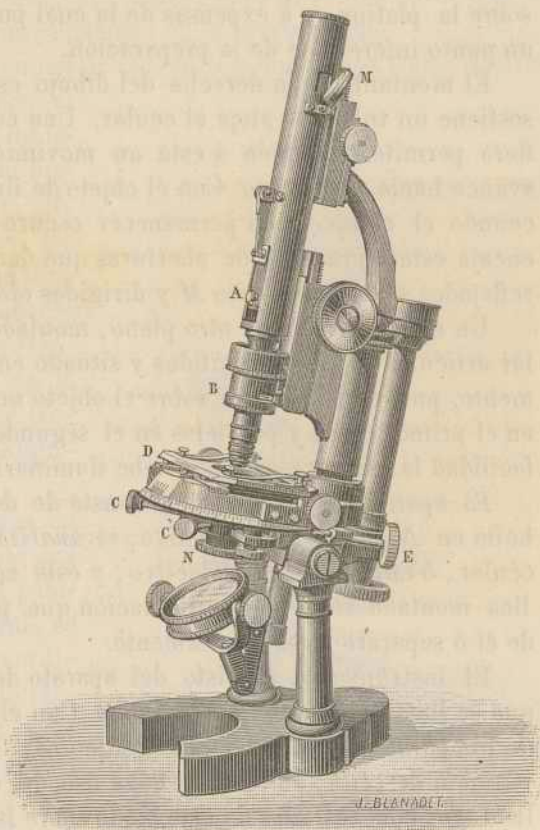


Fig. 44.

y en otro con movimientos rápido y lento; el primero se imprime á expensas de la cabeza circular horizontal, cuyo eje lleva un piñón que engrana con una cremallera; el segundo, por medio de un tornillo que en la figura aparece medio oculto por la cabeza del anterior. Este cuerpo es completamente solidario con la platina, la cual puede girar en su propio plano, con movimiento rápido, á mano, ó lento, sirviéndose del tornillo *E*. El ángulo de la rotación se mide en la graduación fija que se halla visible, inmediatamente debajo del nonio grabado sobre el borde de la platina. El porta-objetos descansa sobre una plataforma *D* que se coloca sobre la platina, y á expensas de la cual puede encontrarse rápidamente un punto interesante de la preparación.

El montante de la derecha del dibujo es fijo, y su extremo superior sostiene un tubo que aloja al ocular. Una cabeza de piñón y una cremallera permiten también á este un movimiento de retrogradación ó de avance hacia el objetivo. Con el objeto de iluminar los trazos del retículo cuando el campo deba permanecer oscuro, el ocular y el tubo en que encaja están provistos de aberturas que dan paso á los rayos exteriores reflejados sobre el espejito *M* y dirigidos oblicuamente sobre el retículo.

Un espejo cóncavo y otro plano, montados ambos en un marco circular articulado en todos sentidos y situado en la parte inferior del instrumento, pueden concentrar sobre el objeto un haz de rayos, convergentes en el primer caso, y paralelos en el segundo, graduándose así con suma facilidad la luz necesaria que debe iluminarle.

El aparato de polarización consta de dos nicoles; el *polarizador* se halla en *N*, debajo del objetivo, el *analizador* *A* se coloca encima del ocular, ó entre este y el objetivo, y está contenido en una cajita metálica montada sobre una articulación que permite, á voluntad, servirse de él ó separarle instantáneamente.

El instrumento, provisto del aparato de polarización, constituye lo que se llama *microscopio polarizante*. Con él pueden obtenerse los efectos de luz paralela y de luz convergente (73). Para lo primero sirve la disposición descrita, aunque se haga uso del espejo cóncavo, pues si bien los rayos concentrados de este modo sobre la preparación forman, en rigor, un haz convergente, que diverge á partir del objeto, la pequeñez de los cuerpos cristalinos sometidos á la observación permite suponer que son paralelos los rayos del haz. Para lo segundo se atornilla, en la extremidad del tubo *A* un sistema de lentes convergentes, que se sitúa á la distancia que conviene del objeto por medio de la cremallera superior.

Nótese bien, en virtud de lo dicho, que los efectos de luz paralela y de luz convergente no dependen de que se emplee uno ú otro espejo, sino de la pequeñez del objeto, ante la cual los rayos del haz que lo atraviesa pueden considerarse como paralelos, siendo necesario, para que la con-

vergencia se haga sensible, recoger este haz á cortísima distancia del mismo objeto, por medio de un sistema de lentes muy convergentes.

La figura 45 representa el pequeño modelo, construido con arreglo al mismo principio que los otros dos, salvo que no puede inclinarse, y que el analizador ha de colocarse siempre sobre el ocular.

89. **Medida de los ángulos de los cristales microscópicos.**—Trátase aquí solamente de los ángulos planos de los cristales, en la sección según la cual son cortados en la placa delgada de la roca que los contiene. Por lo que concierne á la medida de sus ángulos diedros, no es posible obtenerla en las condiciones expresadas, pues sería necesario que el cristal se hallase aislado, y no engastado en la preparación.

Para lo primero se hace coincidir el centro y uno de los trazos del retículo, respectivamente, con el vértice del ángulo y uno de los lados del cristal, y se anota el número de grados que marca el círculo graduado de la platina. Se hace girar esta hasta que el otro lado del ángulo venga á colocarse en coincidencia con el mismo trazo, y se anota la lectura de la graduación. La diferencia de lecturas expresará el valor del ángulo en cuestión.

90. **Marcha de los rayos en el microscopio polarizante de luz paralela.**—Al penetrar en el polarizador el rayo de luz natural, se bifurca en ordinario y extraordinario, polarizados en ángulo recto. El primero experimenta la reflexión total en el bálsamo del Canadá y desaparece; el segundo emerge y continúa efectuando sus vibraciones en el sentido de la sección principal del nicol.

Si la del analizador la es paralela, el rayo extraordinario lo atraviesa, puesto que, dada su posición con respecto al polarizador, no modifica el sentido de las vibraciones. Puede decirse, en resumen, que el analizador no representa, en tal caso, otro papel que el de prolongar la longitud del polarizador.

Si la sección principal del analizador es perpendicular á la del pola-

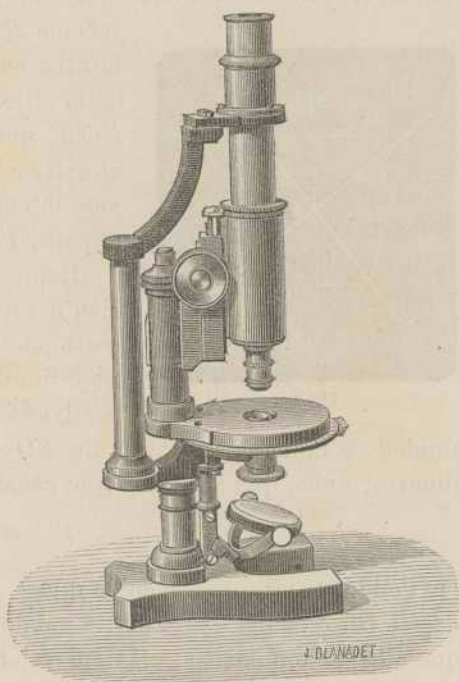


Fig. 45.

rizador, ó como suele decirse, si los nicoles están *cruzados*, el rayo extraordinario que llega del primer nicol hace, en el segundo, las veces de rayo ordinario, puesto que sus vibraciones son perpendiculares á la sección principal de este, experimenta la reflexión total y desaparece, resultando completa oscuridad en el campo del instrumento.

Si las secciones de los nicoles no son, ni paralelas, ni perpendiculares, la extinción será parcial, y tanto más acentuada cuanto menos difiera del ángulo recto el que formen las secciones principales de los nicoles.

Para explicar estos resultados por medio del cálculo, sea PS (fig. 46) la traza de la sección principal del polarizador, AN la del analizador, que es, al propio tiempo, la proyección horizontal de uno de los ejes de la elipse de sección del elipsóide (70 y 72), EE' el otro eje de la misma. El rayo extraordinario que emerge del primer nicol vibra en la dirección PS , y al entrar en el segundo se

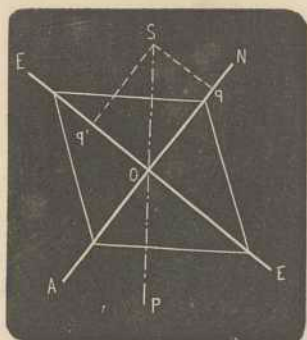


Fig. 46.

bifurca en dos componentes, según los ejes de la elipse de sección, dando lugar al ordinario, que vibra según OE y se extingue, y al extraordinario, que vibra según OA , y cuyas intensidades están dadas construyendo el paralelógramo de las fuerzas (70, 1°).

Representando SO la amplitud de vibración ó intensidad del rayo incidente, las intensidades de los dos rayos, ordinario y extraordinario, dentro del cristal, serán respectivamente Oq' y Oq . Tomando SO por

unidad, y llamando ε al ángulo SOq , la intensidad I del rayo extraordinario, único que aquí hay que considerar, tendrá por expresión

$$I = \cos^2 \varepsilon,$$

en donde se ve que á medida que ε aumenta, I disminuye, reduciéndose á cero cuando $\varepsilon = 90^\circ$. Cuando $\varepsilon = 0^\circ$ es $I = 1$, lo cual indica que alcanza entonces el máximo valor.

91. **Fenómenos á que da lugar la interposición de una placa cristalina delgada.**—Supóngase ahora que el rayo extraordinario que emerge del polarizador cuya sección principal es SP (fig. 47), encuentra en L , antes de llegar al analizador, una placa delgada de un cristal anisotrope, tallada en una dirección distinta de la perpendicular á un eje óptico. Al penetrar en el cristal, el rayo se bifurca, originándose el ordinario Lo y el extraordinario Le , cuyas vibraciones se efectúan, respectivamente, en el sentido de los ejes xx , yy de la elipse de sección, y cuyas velocidades se modifican, disminuyendo ambas por razón de la

mayor refringencia del medio, pero de un modo diferente para cada rayo, siendo esta disminución mayor para aquél que se aparta más de la normal, que aquí es la dirección del incidente. Las vibraciones, que eran únicas ó se efectuaban al unísono antes de llegar á la placa, dejan de estarlo á la salida, á causa de la diferencia de fase (46) que entre unas y otras se establece, siendo evidente que si ambos sistemas de vibraciones, en vez de ser perpendiculares, como ahora lo son, fuesen paralelos, resultarían posibles las interferencias entre rayos que caminasen infinitamente próximos, produciéndose máximo de luz en aquellos cuya diferencia de marcha fuese de dos ó número par de semilongitudes de ondulación, y extinción cuando dicha diferencia fuese de una ó número impar (47).

Nada más fácil que hacer que los dos rayos vibren paralelamente, empleando para ello el analizador, el cual descompone á cada uno en otros dos, ordinario y extraordinario. Los dos ordinarios se reflejan totalmente y desaparecen; los dos extraordinarios eu y ou' vibran paralelamente á la sección principal AN , y como la diferencia de marcha que llevan continúa siendo la misma que la de los rayos Le y Lo que les han dado origen, resulta que interfieren. Para completar la inteligencia de este resultado obsérvese que entre la disminución de la longitud de onda que en el primer rayo ocasiona el analizador, y la que ocasiona en el segundo, existe la misma relación que entre las longitudes de onda respectivas de estos rayos antes de atravesarlo; ó en otros términos, la disminución producida por el analizador es proporcional á la longitud de onda que corresponde á cada rayo antes de penetrar en él.

Si la diferencia de marcha que la placa imprime fuese la misma para todos los colores que constituyen la luz blanca incidente, el haz que emerge del analizador sería blanco, pues todos los rayos elementales que lo componen habrían sido modificados del mismo modo; mas siendo dicha diferencia distinta para cada color, síguese que cada rayo elemental emergente ha sido modificado de diverso modo, y el conjunto se halla coloreado por el matiz predominante, ó sea el que resulta de los rayos elementales que no han podido ser completamente recompuestos por los de color complementario.

Si la luz incidente es monocroma, los rayos que emergen han sido modificados todos del mismo modo. Sus interferencias producen máximo

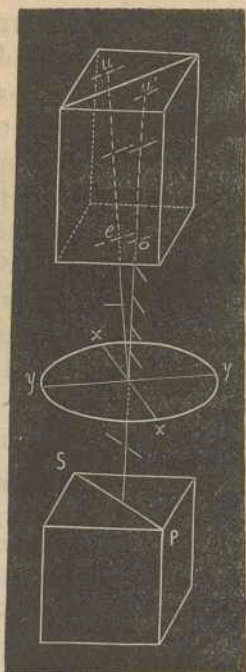


Fig. 47.

entre aquellos cuya diferencia de marcha es de un número par de semilongitudes, y oscuridad si la diferencia es de número impar, resultando compensación por uno y otro efecto y haciendo, en definitiva, que la placa aparezca del mismo color que la luz.

El color que resulta en el primer caso, cuando la luz incidente es blanca, es una función del espesor de la placa y de la diferencia entre los ángulos de refracción correspondientes á los rayos ordinario y extraordinario, de suerte que, para distintos espesores de una misma placa, y para placas de minerales distintos de un mismo espesor, la coloración varía. Lo primero se comprende considerando que si con un espesor dado se produce un determinado color, un espesor mayor ó menor, dentro de ciertos límites, ha de dar lugar á que los rayos que lo producen se recompongan con sus complementarios y formen luz blanca, quedando, en cambio, sin recomponer otros de color diferente, que quedarán, por lo tanto, de manifiesto. Sin embargo, esto sólo puede suceder entre ciertos límites de espesor, porque si este es excesivo no se acentúan bastante las diferencias de marcha de los rayos simples que la atraviesan, y saldrán formando luz sensiblemente blanca; si el espesor es considerable, llega un punto en que todos los rayos elementales han encontrado en su camino sus complementarios no recompuestos, forman luz blanca, y el haz emergente final resulta también incoloro. Por el cálculo, ó simplemente de un modo experimental, es dado determinar el espesor más conveniente que debe darse á la laminita cristalina; viéndose así que, por término medio, ha de ser de una á tres centésimas de milímetro.

Para comprender que el color del haz emergente final varía con la naturaleza del mineral de que está formada la placa, basta considerar que á medida que la diferencia entre los índices ordinario y extraordinario sea mayor, será suficiente menor grueso para que se establezca la diferencia de marcha que corresponde á una determinada coloración. Por eso, para un mismo espesor, las sustancias más birefringentes son las que más se coloran.

Ya sea blanca ó monocroma la luz incidente que se emplee, si se mantienen los nicoles fijos en una posición cualquiera, y se hace dar una vuelta completa á la platina, y por lo tanto, á la preparación, se observa que el color de la placa permanece sensiblemente invariable, pasando sucesiva y alternativamente por un máximo y por un mínimo de intensidad, cada vez que el movimiento giratorio de la platina avanza 45° sobre una posición anterior en que se ha manifestado, respectivamente, un mínimo ó un máximo.

La posición de las secciones principales de los nicoles ejerce gran influencia en estos máximos y mínimos, siendo los primeros más acentuados cuando las secciones son paralelas, y los segundos, ó sea la oscu-

mi- ridad más ó menos completa, cuando dichas secciones son perpendicula-
ido res. En el primer caso, el mayor brillo de la placa tiene lugar cada vez
la que uno cualquiera de los ejes de su elipse de sección coincide con el
es plano de las secciones principales de los nicoles. En el segundo, la ex-
tre tinción ocurre cuando uno de estos ejes coincide con la sección principal
ra- del polarizador ó del analizador.

Para explicar estos resultados por simple razonamiento, empecemos
ca- por considerar paralelas las secciones principales de los nicoles. Al ha-
ción cer coincidir con cualquiera de estos planos uno de los ejes de la elipse
ado de sección de la placa, el rayo extraordinario, que sale del polarizador
de vibrando en el sentido de la sección principal, atraviesa la placa sin bi-
re- furcarse (62, 63 y 66), y llega al analizador, en donde no se bifurca tam-
en poco, porque siendo sus vibraciones paralelas á la sección principal de
lo este nicol, continúa ejerciendo las
tos funciones de rayo extraordinario,
an- sin dar lugar al ordinario con el
y cual tendría que repartir su luz,
le, si lo hubiese, de donde resulta
su que emerge íntegro, y por con-
el secuencia, con el máximo de
le- intensidad.

Si los nicoles están cruzados,
por el rayo atraviesa igualmente la
la placa sin bifurcarse, y llega así
que al analizador, cuya sección prin-
rio cipal encuentra perpendicular á
fe sus vibraciones; funciona en él
Por como rayo ordinario, experimenta
las la reflexión total y desaparece,
resultando completa oscuridad.

92. *El microscopio polarizan- te de luz paralela proporciona, pues, desde luego, el medio de determinar, en un mineral tallado en laminilla delgada, la dirección de la extinción, ó lo que es lo mismo, de los ejes de la elipse de sección.*

93. Los principales resultados que acaban de consignarse se encuen-
si- tran corroborados por el cálculo, como se ve á continuación.

Sea ANS' (fig. 48) el campo del microscopio, PS la proyección de
ma la sección principal del polarizador, AN la del analizador, δ el ángulo
rva diedro de ambos planos, CC' y EE' los ejes de la elipse de sección de
do la plaquita mineral, ε el ángulo que el eje EE' forma con PS . Un rayo
si- O de luz homogénea vibra, al salir del polarizador, paralelamente á PS ,
bre y al penetrar en la placa se divide en dos vibraciones. Si OP representa

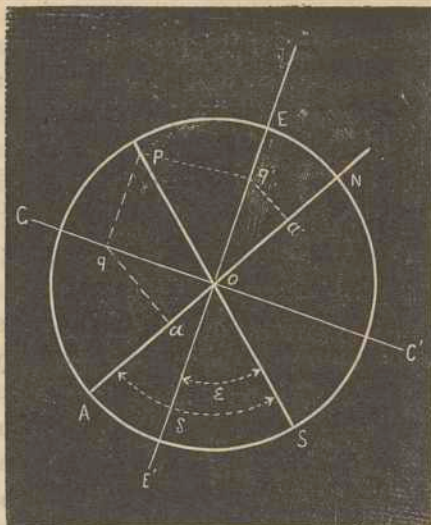


Fig. 48.]

la amplitud de vibración antes de llegar á la placa, estas dos serán Oq y Oq' , y sus expresiones

$$Oq = OP. \text{sen } \varepsilon ; \quad Oq' = OP. \text{cos } \varepsilon .$$

Al llegar al analizador, cada uno de estos rayos se divide en dos; el primero da lugar á un ordinario que vibra paralelamente á aq y se anula, y á un extraordinario, que vibra según oa y se trasmite; el segundo da lugar á un ordinario que se anula, y á un extraordinario, que vibra según oa' . Tomando por unidad la amplitud OP , las expresiones relativas á estos dos extraordinarios son

$$Oa = \text{sen } \varepsilon . \text{sen } (\delta - \varepsilon) ; \quad Oa' = \text{cos } \varepsilon . \text{cos } (\delta - \varepsilon).$$

Ahora bien, es evidente que en el ojo se sobreponen los efectos de estos dos rayos extraordinarios. Sumando, pues, sus efectos, y designando por R_e la suma se tendrá

$$R_e = \text{sen } \varepsilon . \text{sen } (\delta - \varepsilon) + \text{cos } \varepsilon . \text{cos } (\delta - \varepsilon).$$

Si en esta fórmula aumenta ε , permaneciendo constante δ , el factor $\text{sen } (\delta - \varepsilon)$ disminuye, y cuando $\delta = \varepsilon$, se reduce á cero el primer término del segundo miembro, y como entonces $\text{cos } (\delta - \varepsilon) = 1$, resulta

$$R_e = \text{cos } \varepsilon ,$$

ó sea el mínimo valor de R_e en tales condiciones.

Si en este caso crece ε , disminuye R_e , y cuando los nícoles están cruzados y es $\varepsilon = 90^\circ$, ó lo que es lo mismo, cuando los ejes de la elipse de sección coinciden con las secciones principales de aquellos, sale $R_e = 0$, ó sea el mínimo valor que puede alcanzar R_e .

94. Caso de una placa tallada perpendicularmente á un eje óptico.—Falta, por último, considerar el caso en que la laminita mineral interpuesta entre los nícoles cruzados ha sido tallada en sentido perpendicular á un eje óptico.

Si su espesor es, á lo más, el que de ordinario tiene, el rayo se trasmite como en un medio isotropo, y por consiguiente, cualquiera que sea la orientación de la lámina durante una rotación completa de la platina, no se modifica la oscuridad del campo. Este caso es el que interesa, principalmente, conocer, puesto que se trata siempre de laminitas delgadas.

A medida que el espesor aumenta, la oscuridad del campo disminuye, y cuando aquel llega á ser considerable, como, por ejemplo, si se tratase de someter á este género de observación una placa de cristal de un eje, tallada perpendicularmente á esta dirección, y de un espesor de algunos milímetros, parecida á las que se emplean para estudiar los fe-

fenómenos de la luz polarizada convergente (73), resulta el campo del microscopio completamente iluminado.

95. **Polarización de agregado.**— Así se denomina el efecto que produce, entre los nícoles cruzados, una aglomeración de cristales microscópicos, orientados en todos sentidos, en cuyo caso la masa se muestra igualmente iluminada durante la rotación completa de la platina.

Para comprender este efecto obsérvese que en cada elipse de sección existen dos direcciones rectangulares en las cuales se manifiesta la extinción, y que fuera de ellas hay cuatro sectores, que ocupan la mayor parte de la superficie de la elipse, dentro de los cuales se manifiesta la luz. Predominando, en suma, estos sectores en la masa, considerada en conjunto, es consiguiente que el efecto que ellos producen predomine asimismo.

Los grandes aumentos permiten, con frecuencia, diferenciar los cristales componentes, y estudiar sobre cada uno de ellos los fenómenos ópticos que les son peculiares.

96. **Cruzamiento de los nícoles y orientación de sus secciones principales.**— Casi todas las experiencias descritas suponen el cruzamiento perfecto de los nícoles, y, sin embargo, esta condición, aunque fácil de realizar, reclama una operación previa. Diversos son los procedimientos que al efecto se han propuesto; el que yo he ideado es sencillo y muy práctico, circunstancias que me autorizan para recomendarlo al lector.

Se elige una preparación de roca que contenga algún cristal, grande ó pequeño, de turmalina, con las rendijas de crucero bien distintas, como suelen ofrecerlos diversas granulitas, se coloca sobre la platina y se la hace girar hasta que uno de los trazos del retículo sea paralelo á las líneas de crucero ó coincida exactamente con una de ellas. Se sitúa luego el polarizador en el aparato y se le hace girar hasta obtener, por tanteos, el mayor oscurecimiento del cristal, en cuyo caso el otro trazo del retículo marca la dirección de la sección principal del nicol (102). Una vez esto conseguido se coloca el analizador sobre el ocular, ó entre este y el objetivo, según sea la disposición preferida ó que permita el modelo de microscopio empleado, y se le hace dar vueltas hasta obtener por tanteos la máxima oscuridad.

Se quita ahora la preparación y se coloca en su lugar otra, que ha de tenerse dispuesta de antemano para estos casos, y que consiste en dejar evaporar sobre un porta-objeto dos ó tres gotas de una solución de ácido oxálico, sustancia que cristaliza en largas agujas pertenecientes al sistema monoclinico, las cuales observadas al microscopio se muestran en forma de trapecios *HN* (fig. 49), de lados paralelos sumamente largos, prolongados según la arista de zona *ph*¹. La preparación se completa protejiéndola con una laminita cubre-objeto, y de esta suerte puede conservarse indefinidamente.

Fundado en la propiedad de esta zona, de extinguirse según los lados paralelos del trapecio, como se verá más adelante (108), el método no puede ser más práctico ni sencillo. Si el cruzamiento de los nícoles y la orientación de los trazos AC y DB del retículo, previamente obtenidos por tanteos, están bien hechos, el cristal ha de extinguirse á lo largo de los trazos; en caso contrario, nada más fácil que rectificar exactamente. Es de advertir que cuando se domina la teoría y la práctica de estas operaciones, no es necesario tomarse el trabajo previo de orientar por medio

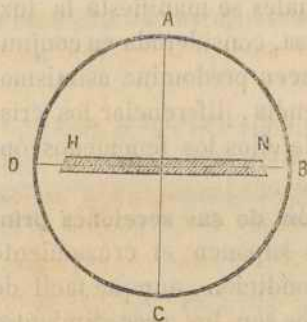


Fig. 49.

de un cristal de turmalina la sección principal del polarizador, pues basta recurrir desde luego á la preparación de ácido oxálico, con lo cual la operación resulta muy simplificada. Se principia por hacer coincidir uno de los trazos DB del retículo con la arista ph representada en HN , se cruzan á ojo los nícoles, y sin cambiar su posición recíproca se les va haciendo girar hasta obtener la extinción en dicha zona, rectificando, como en el caso anterior, el pequeño error que en ello haya podido cometerse. La dirección de cada una de las secciones principales se deter-

termina ahora sin más que dejar al descubierto la cara rómbica del analizador, si está colocado sobre el ocular, ó sacándole del tubo, si está dentro del microscopio. En la operación del cruzamiento y orientación, así practicada, no deben invertirse más allá de tres ó cuatro minutos.

97. Medida de los ángulos de extinción.— Puede decirse que para esto sirve, principalmente, el microscopio polarizante. El ángulo de extinción, en una sección de cristal microscópico, es el formado por una determinada arista de zona ó por la traza de un plano de crucero, con la dirección en que dicha extinción tiene lugar. Su medida se obtiene haciendo coincidir la imagen de la arista ó de la recta que se considere, con un trazo del retículo, é imprimiendo luego á la platina un movimiento de rotación hacia la derecha ó hacia la izquierda, según convenga, hasta que la máxima oscuridad de la sección tenga lugar. El arco recorrido por el nonio de la platina, entre estas dos posiciones, será la medida de que se trata.

Si se quiere evitar el tener que hacer dos lecturas y la resta consiguiente, puede colocarse, primero, el cero del nonio sobre el de la graduación, y mantener fija la platina en tanto que se hace girar la preparación hasta que la arista coincida con el trazo del retículo. El arco que luego tenga que recorrer el nonio, para llegar á la oscuridad, expresará directamente el valor del ángulo. Este procedimiento, que parece más

expedito que el anterior, es, no obstante, más largo, á menos que la preparación pueda disponerse sobre una plataforma especial que facilite la expresada coincidencia, como la que va anexa al grande modelo de Naquet.

98. **Instrucciones relativas al uso del microscopio.**—Estas instrucciones atañen, unas, á la conservación, otras al manejo del instrumento.

Ante todo ha de tenerse mucho cuidado en no tocar con los dedos las lentes ni los nicoles, para que no se rayen, y de limpiarlos de vez en cuando con una piel de gamuza muy suave, que ha de estar destinada exclusivamente á este uso. Aun en esta operación, hay que tener presente que el espato de Islandia es una sustancia que se deja rayar con mucha facilidad.

Es muy cómodo observar con el microscopio algo inclinado, pero esta posición no debe adoptarse sino cuando se trata simplemente de estudiar ó examinar el objeto, prescindiendo de sus propiedades ópticas, si las tiene, en la luz polarizada, que reclaman la rotación de la platina y el empleo del ocular con retículo; pues, en este caso, es más conveniente, y hasta indispensable, la posición vertical, que facilita aquel movimiento é impide que la diferencia de peso que pueda existir entre los dos montantes se haga sensible y separe del centro de rotación el punto de cruzamiento del retículo.

Cuando la platina se mueve á mano hay que apoyarse en la parte inferior del montante que le es solidario, é imprimir el movimiento sin violencia ni sacudidas. Durante el invierno, á causa del frío, y aun en todo tiempo, por efecto del polvo que adhiere á la superficie de apoyo de la platina, la materia grasa que la lubrica se embota, y el movimiento se dificulta; en el segundo caso deben limpiarse las dos superficies en contacto, renovando la aplicación de un trapo blando sobre las ranuras que las dejan visibles, y volviendo á impregnarlas ligeramente con glicerina ó con sebo, pero nunca con aceite ordinario.

La operación de enfocar no exige precaución especial cuando se trata de objetivos de poco aumento, porque media entonces gran distancia entre su cara frontal y el cubre-objeto, y, á no ser que se proceda con todo descuido, lo cual siempre es expuesto en la práctica microscópica, no hay peligro de tropezar con dicho vidrio y romperlo, ó rayar aquella cara. Con los objetivos de mediana y de gran fuerza es preciso seguir, por fuera, con la vista, la aproximación al vidrio, empleando, primero, el movimiento rápido que da la cremallera, y luego concluir de enfocar valiéndose del tornillo del movimiento lento.

Ocorre muchas veces tener que depositar gotas de un ácido sobre una preparación descubierta, en cuyo caso suelen desprenderse vapores que corroen más ó menos las lentes objetivas y su montura. Mi práctica con-

siste en reservar para estos casos el objetivo menos estimado ó que presente algún defecto. De todos modos conviene ser parco en apelar al procedimiento, y cuando deba emplearse acortar en lo posible el tiempo de la observación.

Sin todas estas precauciones, el microscopio concluiría bien pronto por no ofrecer las garantías de precisión y exactitud que de él deben exigirse.

Por lo que concierne á obtener los efectos de iluminación del objeto, lo mejor es servirse de la luz blanca de las nubes, ó de un vidrio deslustrado ajustado á un ancho orificio sobre el cual se reciben directamente los rayos del sol. El segundo medio es muy cómodo, porque permite observar en un recinto oscuro ó á media luz, sin otra abertura que la obtenida por el vidrio, y más aún porque proporciona una luz incolora y muy intensa, como se necesita cuando se opera con grandes aumentos. También puede hacerse uso de la luz de un mechero de gas ó de una lámpara, concentrada sobre el espejo, si es preciso, por medio de una gran lente convergente. Cuando la observación exige la luz monocroma basta interponer un vidrio de color, ó simplemente servirse de la que procede del azul del cielo. La directa del sol no debe emplearse nunca.

En estos efectos hay que tener en cuenta si conviene ó no que la luz que cae sobre el espejo se halle ya polarizada, que posea esta propiedad después de reflejarse en él, ó que no lo esté en manera alguna. Lo primero ocurre cuando se emplea la luz azul del cielo, procedente de un punto que diste del sol 90° . Lo segundo, siempre que la incidencia sobre el espejo sea de 35° , ángulo de polarización del vidrio (50). La luz natural se obtiene, sencillamente, separándose de ambas condiciones. Cuando se opera con luz polarizada, la posición del plano en que lo está se conoce desde luego, puesto que es perpendicular á la superficie reflejante. En todo caso conviene asimismo estudiar si hay que ajustar este plano á una dirección determinada; por ejemplo, cuando se emplea el polarizador solamente, para el estudio del policroísmo, hay que considerar si dicho plano debe ser paralelo ó perpendicular á la sección principal del nicol, á fin de contrariar ó de favorecer, respectivamente, el efecto que este produce. Para operar con los nicoles cruzados conviene que la luz que parte del espejo sea natural.

99. **Precauciones higiénicas.**— Estas precauciones se contraen á las reglas de higiene de la vista que debe guardar el observador micrografo. Antes de dedicarse á estos estudios, ó de comenzar un largo trabajo de observación, interesa adquirir conocimiento sobre el estado de la vista, que desde luego se supone fisiológicamente normal, comprendiendo en esta denominación el presbitismo y la miopía. Solo así es dado, no sólo conocer si el trabajo micrográfico la perjudica, y en qué condiciones, si-

no también apreciar los defectos orgánicos especiales que pueda afectar aun en su estado habitual.

Entre estos defectos, el que se observa con más frecuencia es el de las *moscas volantes*, y consiste en lo siguiente. Apenas habrá quien haya dejado de notar que entreabriendo los ojos y mirando el fondo claro del cielo, se ve aparecer un enjambre de anillitos oscuros, cuya tendencia es correr en conjunto de arriba abajo, como si cayeran constantemente, y sólo cuando la vista se dirige hácia arriba se levantan bruscamente, para volver á caer de nuevo. El enjambre es más nutrido en determinadas direcciones, y puede serlo tanto que no sea preciso dejar entreabiertos los ojos para percibirlo, sino tan sólo fijarse un poco, para distinguirlo bien y hasta juzgar de su forma. Esta se hace muy visible observando con el microscopio, sobre todo, cuando se emplean grandes aumentos, sucediendo entonces que las moscas volantes se sobreponen á las imágenes de puntos que afectan aspectos parecidos, y dan lugar á ilusiones, por cuya razón importa mucho adquirir la práctica y el conocimiento necesarios, á fin de saber distinguir ambos efectos.

No debe hacerse uso de más luz que la necesaria, á fin de que la imagen resulte bien iluminada, pero nunca por exceso, como sucede cuando después de haber observado con un objetivo de gran aumento se coloca otro de poca fuerza, sin variar al propio tiempo la inclinación del espejo para atenuar la intensidad de la luz, en cuyo caso resultan la imagen y el campo excesivamente iluminados y causan una impresión dolorosa en el ojo. También debe cuidarse de colocar una pantalla, al otro lado del ocular, al nivel de la vista, para impedir que esta sea molestada por el resplandor directo del manantial iluminante.

Pero entre los trabajos que más fatigan al ojo, ninguno como el de querer diferenciar más detalles, ó en otros términos, ver más de lo que buenamente define el microscopio, tendencia, por otra parte, muy natural ó que se despierta sin sentir en todo el que observa. Pocas personas paran mientes en este particular, y, sin embargo, es uno de los que merecen atención. Otro tanto puede decirse del trabajo de apreciación de las extinciones, cuando se opera con los nícoles cruzados, sobre todo, cuando se trata de microlitos muy pequeños. No debe olvidarse que durante la observación microscópica hay que representar un papel, en cierto modo, pasivo, permaneciendo, por decirlo así, ajeno á las funciones propias del instrumento, limitándose á percibir sin esfuerzo los fenómenos y á anotarlos, si es preciso, pero sin concentrar sobre ellos el espíritu más allá de las apariencias buenamente apreciables.

Se aconseja no educar un solo ojo en la observación, sino servirse alternativamente del derecho y del izquierdo, á fin de que no se origine desequilibrio en sus funciones. Hay quien recomienda que se tenga abier-

to el que descansa, pero es evidente que la atención no puede fijarse con tanta facilidad como cuando se mantiene cerrado. Así, al menos, me lo enseña la experiencia; aunque comprendo, no obstante, que influye mucho en todo ello un hábito contraído de largo tiempo.

El trabajo con un solo ojo, cuando es prolongado, produce en mi vista un fenómeno que creo singular, porque no tengo noticia de que se halle consignado en ninguna parte, y por lo tanto, digno de serlo aquí, para que pueda evitarse cuando se note. Si separo del ocular el ojo, y abro el que ha permanecido cerrado, veo dobles los objetos que con él distingo, como si interpusiese un cristal birefringente. La duplicación tiene lugar en un solo sentido, ordinariamente en el horizontal, de modo que las líneas de un impreso me parecen dobles, y si miro un rectángulo los lados horizontales se duplican y los verticales no sufren alteración. Este estado del ojo persiste durante cierto tiempo, que á veces es de algunas horas, y aun de un día entero si la observación se ha continuado excesivamente, desapareciendo por completo al cabo de este intervalo, y sin que la perspicuidad normal de la vista se resienta en lo más mínimo, pero dejando, en cambio, como huella, moscas volantes que llegan á perpetuarse.

Lo más notable sobre el particular es que nada de esto me sucede á consecuencia de la observación telescópica, cualquiera que sea su duración y la intensidad luminosa del astro, ni aun cuando el ojo tenga que hacer un esfuerzo para percibir la redondez de puntos pequeños, como las sombras de los satélites de Júpiter al proyectarse sobre el disco del planeta. Una larga práctica en ambos géneros de observación me ha permitido apreciar con absoluta certidumbre esta diferencia de efectos, por más que la causa que los produce parezca en los dos casos la misma.

Cuando se observa de noche y es necesario emplear luz monocroma, conviene saber de antemano si existe algún color que la vista no puede soportar sin fatiga. Esta experiencia es facil, ensayando vidrios de diferentes colores y empleando el que no cause molestia alguna.

100. **Nuevo sistema de observación microscópica.**—Es indudable que, aun siguiendo escrupulosamente las prescripciones higiénicas que acaban de aconsejarse, hay muchas personas cuya vista llega á sentir fatiga cuando la observación se prolonga más allá de ciertos límites. Por lo que á la mía se refiere ya he consignado (99) que han aparecido, en el ojo que mantengo cerrado, moscas volantes permanentes, debidas, sin duda, á la coagulación de las materias albuminóides delante y á corta distancia de la retina, efecto producido por la tendencia del cristalino á tomar la forma cilíndrica en el sentido vertical, ó lo que es lo mismo, á adquirir sus caras mayor convexidad en el sentido horizontal, según se colige de las particularidades que presenta la diplopia pasajera que allí dejo reseñada.

Esta novedad, y el deseo de evitar los inconvenientes con que tropiezan las personas de vista delicada, me sugirieron la idea de discurrir un medio que permitiese observar sin fatiga, ocurriéndoseme desde luego obtener por proyección la imagen microscópica.

Dispongo al efecto el microscopio polarizante como de ordinario, en posición vertical, y sitúo horizontalmente encima, á distancia de 25 á 26 centímetros, una placa cuadrada de vidrio deslustrado, de cuyo borde exterior cuelga una especie de manga de paño negro, que se sujeta por el extremo inferior á la parte superior del instrumento, en el tubo que contiene al ocular, quedando así constituida una cámara oscura. Hago incidir sobre el espejo cóncavo un haz de luz solar de la misma amplitud, poco más ó menos, que la del espejo, y este haz, reflejado en el sentido de la preparación, atraviesa el sistema de lentes y va á pintar sobre la lámina de vidrio deslustrado una imagen clara y perfectamente definida que se enfoca sin ninguna dificultad por medio de los movimientos rápido ó lento anexos al aparato. Esta imagen puede inspeccionarse á la distancia de la vista distinta, como un objeto cualquiera, sin otra precaución que la de impedir la entrada á toda luz exterior que no sea la que cae sobre el espejo.

Tal es, reducido á su expresión más simple, el sistema de que me sirvo de algún tiempo á esta parte para el estudio micrográfico de las rocas, sistema que me atrevo á esperar merecerá la aprobación de cuantas personas cultivan este género de estudios, tanto de aquellas que por tener la vista delicada han de adoptarlo por necesidad, como de las que sólo quieran emplearlo para proporcionarse algún reposo. Aparte de esto encontrará, además, útil aplicación cuando se trate de poner á la vista de diversas personas á la vez la preparación microscópica y los fenómenos de polarización y de policroismo que presentan los minerales microscópicos. Falta ahora darlo á conocer en los detalles y precisar las circunstancias más favorables en que conviene emplearlo y las condiciones que han de llenarse para obtener el mejor efecto.

Ante todo importa añadir que el sistema resulta incomparablemente más práctico y cómodo si en vez de proyectar la imagen directamente sobre el vidrio deslustrado, se la recibe sobre un prisma de flint de 45°, colocado sobre el ocular, de suerte que después de verificarse en él la reflexión total, la imagen vaya á pintarse sobre una pantalla vertical situada á la distancia conveniente. Esta disposición es preferible cuando se trata de estudiar las extinciones, en cuyo caso la rotación de la platina puede hacerse estando el observador sentado y teniendo delante la imagen. En algunos casos conviene disponer sobre la cara de emergencia del prisma una pequeña lente divergente de flint, mediante la cual la imagen, sin disminuir de tamaño, puede ser recibida á menor distan-

cia y ser más fácilmente observable. La montura del prisma consiste simplemente en un anillo hendido, como el de la cámara clara, al que va adherido un tallito ó varilla de 5 á 6 centímetros de longitud; sobre esta varilla se fija con tornillo, á la altura necesaria, la pieza triangular en que va engastado el prisma y á uno de cuyos lados adhiere la montura móvil de la lente divergente; el anillo se adapta al tubo del ocular, como una cámara clara ordinaria ¹.

La combinación de objetivos y oculares que conviene emplear en cada caso, depende, naturalmente, del efecto que se trata de obtener y de la intensidad de la luz que se hace llegar sobre el espejo. Cuando se proyecta directamente la imagen sobre el vidrio deslustrado y se hace uso de la luz del sol, puede elegirse la combinación del objetivo N.º 8 de Nachet con el ocular N.º 3, la cual permite distinguir sin esfuerzo las inclusiones líquidas del cuarzo de los granitos, y hasta los movimientos de las burbujas. El mismo resultado se obtiene sensiblemente con el objetivo de inmersión N.º 9. La única modificación que ha de hacerse para estas observaciones consiste en sustituir el vidrio deslustrado, cuyo grano resulta en tal caso demasiado grueso, por un vidrio transparente que lleva pegado sobre una de sus caras un cuadrado de papel bien satinado y de grano fino, como el que se conoce en el comercio con la marca Blanchet, ó el de la casa Marion. También es ventajoso colocar sobre el ocular una pequeña lente divergente; la que acompaña al prisma puede servir para este objeto, bastando para ello separarla de la montura.

Cuando se opera con los nícoles cruzados las mejores combinaciones son las del ocular N.º 1 de retículo con los objetivos 5 ó 6. La primera basta en la mayor parte de los casos. La segunda permite apreciar con toda facilidad los elementos microlíticos de los pórfidos y basaltos. Los microlitos de labrador del meláfido de Morvan tienen por término medio un ancho de una centésima de milímetro y se pintan de un tamaño muy apreciable, pudiendo distinguirse perfectamente las extinciones de las laminillas hemitropas. También son muy útiles las combinaciones del ocular N.º 1 con cualquiera de los objetivos 2, 3 ó 4. Todas ellas permiten proyectar la imagen sobre la pantalla vertical. Con los objetivos 5 y 6 no es necesario añadir la lente divergente.

Como en estas condiciones de observación la imagen del retículo no resulta bien definida, hay que trazarla con lápiz sobre la lámina misma ó sobre la pantalla vertical, para lo cual se quita la preparación, se enfoca bien aquella imagen y se marcan, de una vez para siempre, los brazos de la cruz. Cualquiera que sea la posición preferida para la imagen proyectada, es indispensable que el microscopio y el plano sobre que está

¹ El prisma, construido con arreglo á mis instrucciones, por M. Nachet, es un aparatito muy cómodo y de poco coste (20 francos). He suprimido la lente divergente porque no se emplea casi nunca.

se define sean solidarios, á fin de que durante la rotación de la platina no se altere la coincidencia de la imagen con el punto de cruzamiento del retículo así trazado. La disposición que yo adopto consiste en fijar al banquillo sobre que reposa el instrumento un montante vertical, al que se sujeta por medio de un tornillo un brazo horizontal á cuyo extremo va el marco. El tornillo permite situar este brazo á la altura que se quiere. Para la proyección vertical, la pantalla es un papel blanco mantenido tenso sobre un bastidor de madera, que se fija también al banquillo. En uno y en otro caso es preciso, sopena de tener que repetir cada vez la operación del trazado del retículo, ajustar el bastidor ó el marco á una distancia y posición constantes.

Hay que tener en cuenta que en el nuevo sistema se modifica el aumento de una combinación dada de ocular y objetivo, ampliándolo ó disminuyéndolo, como es consiguiente, en función de la distancia á que se pinta la imagen. Así es que, en la proyección horizontal á la distancia de 25 centímetros, y con la combinación del ocular N.º 1 y objetivo N.º 6, el aumento, que en la disposición ordinaria es de 340, se reduce á 250. En la proyección vertical la pantalla puede colocarse á medio metro, y entonces el aumento resulta mucho mayor. La adición de la lente divergente sobre la cara de emergencia del prisma permite obtener grandes aumentos sin que la pantalla se separe mucho del observador.

A fin de que sea lo menor posible la pérdida de luz al atravesar el prisma, conviene que las dimensiones de este sean muy reducidas, bastando, como es facil comprender, que el ancho de las caras catetos sea tan sólo un poco mayor que el diámetro de la lente de aumento del ocular, de suerte que pueda aprovecharse todo el haz eficiente (80) que emerge del instrumento. Cuando se opera con los nícoles cruzados y el analizador se sitúa sobre el ocular, el prisma se coloca sobre el analizador.

El haz de luz solar que deja pasar el orificio entraña el inconveniente de tener que ir corriendo el banquillo, para poderle seguir en su movimiento. No se crea, sin embargo, que este inconveniente lo es en realidad, ó no hay, cuando menos, que exagerarlo, pues con tal de que medie poca distancia entre el orificio y el espejo cóncavo, pueden trascurrir algunos minutos, ó sea el tiempo suficiente para efectuar y repetir observaciones y lecturas sobre el nonio, sin que haya necesidad de trasladar el instrumento. Si el banquillo descansa sobre ruedas y el piso es una superficie lisa, la traslación del aparato completo se lleva á cabo con suma facilidad, sin producir ninguna perturbación, sobre todo cuando se opera á las horas del mediodía, que es cuando la altura del sol sobre el horizonte experimenta las menores variaciones, bastando entonces mover el banquillo en sentido perpendicular al meridiano.

Por lo demás, nada tan facil como obtener un haz fijo, por medio de

un heliostato. El de Prazmowski es un instrumento de pequeñas dimensiones y de coste relativamente poco elevado ¹ que puede servir muy bien para este objeto, añadiendo un segundo espejo que permita dar al haz que produce el aparato, cuya dirección es paralela al eje del mundo y no se adaptaría así á incidir sobre el reflector del microscopio, la inclinación conveniente. La luz eléctrica ó la de Drummond recibidas directamente, ó mejor aun previamente condensadas por medio de una gran lente convergente, pueden sustituir á la solar, y tienen sobre ella la ventaja de la fijeza y de poder ser utilizadas á cualquiera hora, si bien la intensidad es menor. En todo caso, cuando se opera con los nicoles hay que cuidar de que el ángulo de incidencia del haz sobre el espejo del microscopio no sea el de polarización del vidrio, á menos que no se quiera aumentar el efecto del polarizador, para lo cual deben tenerse presentes las prescripciones expuestas (98).

Cuando se opera sin los nicoles hay que evitar que el calor del sol, concentrado por el reflector sobre la preparación, llegue á alterarla ó á reblandecer el bálsamo y aun tal vez á desprender las primeras lentes acopladas del objetivo. Para esto puede emplearse un medio muy sencillo que se reduce á hacer pasar el haz á través de una lámina de vidrio grueso, incolora y de caras paralelas, que absorbe en grado suficiente el calor. También se puede usar, en vez de lámina de vidrio, una plaquita de espato de Islandia tallada perpendicularmente al eje, ó lo que es todavía mucho más expedito, colocar el polarizador en su montura, entre el espejo y la preparación, pues es sabido que el espato es una de las sustancias que dejan pasar menos rayos del calor incidente. No hay temor de que el calor llegue á reblandecer el bálsamo que une las dos mitades del nicol, pues queda suficientemente absorbido en la primera antes de llegar á las caras de unión. Yo no empleo otra precaución, y no he tenido que lamentar accidente alguno.

Inútil parece hacer notar que el nuevo sistema sustituye con ventaja á la cámara clara cuando se trata de obtener el dibujo de la imagen, puesto que permite no sólo seguir los contornos de la misma sin ningún trabajo, si que, además, cuando se opera con los nicoles cruzados, facilita el acierto en la imitación de los colores de polarización, lo cual no deja de entrañar bastante dificultad con la cámara clara. La disposición vertical puede utilizarse también para obtener fotografías de la preparación, sobre todo si se emplean placas preparadas al colodión seco; no hay más que quitar el vidrio deslustrado del marco que lo contiene, y colocar en su lugar la placa fotográfica, teniendo el cuidado de haber cerrado antes el paso á la luz y abriéndoselo luego el tiempo necesario. Son preferibles las placas al colodión á las de gelatina, porque en virtud de su menor rapidéz permiten operar con mayor desembarazo.

¹ 200 francos.

III

Policroísmo

101. **Definición y explicación del fenómeno.** — Circunscribiendo la definición al objeto que aquí interesa, puede decirse que el *policroísmo* ó *pleocroísmo* es la propiedad que poseen las sustancias anisotropas de absorber más en unas direcciones que en otras la luz polarizada que las atraviesa. Si la incidente es blanca, los diversos colores que la componen son desigualmente absorbidos y la sustancia resulta coloreada de tintas diferentes, según su posición con respecto al plano de polarización de la luz.

La modificación de la luz de que aquí se trata, como todo lo que se refiere á la propagación de esta dentro de un mineral, debe estar relacionada con la forma del elipsóide de elasticidad y con la posición de sus ejes con referencia á los cristalográficos. Así es que, en un mineral del sistema cúbico, en donde los tres ejes de elasticidad son iguales, no puede manifestarse coloración ni intensidad especial en un determinado sentido. Por el contrario, en los minerales de los otros cinco sistemas el policroísmo puede manifestarse, y en tal caso, de un modo tanto más acentuado cuanto más difiera de la esfera el elipsóide de elasticidad. De todo ello se desprende que son *dicróicos* los minerales pertenecientes á los sistemas cuadrático y exagonal, y *tricróicos* los de los tres últimos sistemas.

Entendida la causa del fenómeno, es fácil concebir que el mineral dotado de policroísmo se presentará tanto más coloreado cuanto mayor sea su espesor. Si este disminuye, podrá llegar á un límite en que el fenómeno no sea ya perceptible, y esto es lo que ocurre á menudo con los cristales microscópicos, exceptuándose tan sólo aquellos que poseen color propio muy pronunciado, como la turmalina, la mica, la hornblenda, en cuyo caso basta una pequeña partícula para que el fenómeno sea francamente apreciable.

Para estudiarlo con el microscopio pueden emplearse diversos medios. El mejor consiste en servirse del polarizador solo, hacer que la imagen del cristal sometido á la observación se halle dentro del campo, é imprimir luego á la platina el movimiento de rotación. El haz que emerge de aquel nícol está polarizado y vibra según la diagonal menor, cuya dirección se conoce, por ser paralela á un trazo del retículo, siendo fácil estudiar los cambios de color ó de intensidad que ofrece el mineral, según

que una de sus líneas cristalográficas determinada sea paralela ó perpendicular al indicado trazo. En esta experiencia hay que disponer la inclinación del espejo de tal suerte que el haz reflejado no se halle polarizado, ó que si lo está parcialmente, como suele suceder, el plano de polarización sea perpendicular á la diagonal menor, con el objeto de que las vibraciones sean paralelas á la sección principal y puedan pasar libremente. Si le son perpendiculares el haz queda, en parte, extinguido, y por lo tanto, actúa menor cantidad de luz sobre el mineral.

El policroísmo proporciona útiles indicaciones para la distinción de los minerales, por las diversas particularidades que en cada uno de ellos presenta. A poner de manifiesto la importancia de estas indicaciones contribuirán los siguientes

102. **Ejemplos prácticos.**—Déjase ver dentro del campo la sección longitudinal de un cristal de turmalina, prolongada en el sentido de la arista e^2e^2 , sentido que coincide con el eje α del elipsóide de elasticidad, el cual es de revolución y prolongado en este mineral. La propiedad que posee de absorber el rayo ordinario y dejar pasar el extraordinario, explica porqué toma una tinta clara la sección cuando la dirección e^2e^2 es paralela al trazo del retículo que marca la de la diagonal menor del polarizador, y se oscurece notablemente cuando la es perpendicular. En el primer caso los rayos vibran según α ; en el segundo, según γ , y de ahí que puedan ó no puedan, respectivamente, transmitirse á través del cristal, según que funcionen en él como extraordinarios ó como ordinarios.

En la mica se observa, precisamente, un resultado inverso. Sus secciones microscópicas suelen presentarse prolongadas según las caras p de fácil crucero, y toman coloración muy pronunciada, verde, parda y hasta negra cuando dicho sentido longitudinal, acusado por las rendijas de crucero, es paralelo á la diagonal menor del nicol, y coloración clara cuando estas rendijas la son perpendiculares. Resulta de lo expuesto que aun cuando la mica y la turmalina puedan afectar apariencias iguales á la simple inspección microscópica, y den lugar á incertidumbre sobre la naturaleza del mineral, es dado diferenciarles perfectamente, en virtud de los fenómenos policróicos.

Con el anfíbol sucede lo mismo que con la mica. Es frecuente que sus cristales microscópicos se presenten prolongados según la arista h^1g^1 , que coincide, salvo una pequeña discrepancia de pocos grados, con el eje γ de elasticidad. Cuando esta dirección es paralela á la diagonal menor del nicol, la sección del cristal toma un tinte pardo-rojizo oscuro, y cuando la es perpendicular, tinte muy claro que tira á verde. El cambio de coloración es muy apreciable, aun en cristales cuyo espesor no excede de $0^{mm},0015$, como lo tengo observado en los microlitos de hornblenda contenidos en el basalto de Olot.

PARTE TERCERA

DETERMINACIÓN DE UN MINERAL

POR MEDIO DEL MICROSCÓPIO POLARIZANTE
DE LUZ PARALELA.

I

Determinación del sistema cristalino

103. Si se posee bien toda la doctrina precedente, la determinación que es objeto de este estudio no ofrece ninguna dificultad. Bueno es, no obstante, ampliar algo lo expuesto, empezando por considerar que la sección de todo cristal microscópico se halla limitada por rectas, y por consiguiente, que su forma es la de un polígono más ó menos regular, salvo en aquellos casos en que, por causas de diverso origen, los contornos aparecen sinuosos ó alterados, pero aun entonces pueden existir, y de hecho existen muchas veces, rendijas de crucero visibles, que suplen hasta cierto punto la falta de contornos geométricos y sirven, como estos, para orientar cristalográficamente la sección.

Es sabido que entre los ejes cristalográficos y los lados de la figura poligonal de la sección, ó, si se quiere, de toda recta que revista, en la sección misma, el caracter aparente de eje de figura, debe existir una relación más ó menos simple ó necesaria (19). Como, por otra parte, entre los ejes cristalográficos y los de elasticidad hay también una relación de posición, subordinada á la simetría del cristal (75), síguese que los lados del polígono ó su eje de simetría plana, deben hallarse, igualmente, relacionados con los ejes de la elipse de sección. Conviene, á este propósito, recordar el principio formulado en otro lugar (72), y su aplicación, también consignada (93), pues uno y otra y las consideraciones que acaban de exponerse son el fundamento del presente estudio.

No todas las caras del cristal afectan, bajo este punto de vista, la misma importancia, pues es evidente que han de tenerla mayor aquellas cuyas intersecciones mútuas determinan la posición de los ejes cristalográficos, como sucede, en los tres últimos sistemas, con las caras p , g^1 , h^1 , y las zonas pg^1 , ph^1 , h^1g^1 paralelas á sus aristas, y aun en los sistemas cuadrático y exagonal propiamente dicho, si se considera que en toda zona paralela á ph^1 , única que aquí es dado hacer intervenir atendida la simplicidad relativa de estos dos sistemas, la expresada dirección se halla también en una cierta relación con el eje cristalográfico.

Las consideraciones siguientes suponen el cruzamiento previo de los nícoles.

104. **Sistema cúbico.**—Todas las secciones, cualquiera que sea su orientación, permanecen constantemente oscuras, y sólo por sus contornos poligonales podrá conocerse si se trata de un cristal ó de una sustancia colóide.

105. **Sistema cuadrático.**—Las secciones constantemente oscuras pertenecen á la cara p , y por lo tanto, su forma, en general, es la de un cuadrado ó de un octógono.

Las caras m , como asimismo las zonas paralelas á las aristas h^1h^1 y ph^1 , dan rectángulos que se extinguen según sus lados. Cortando simétrica y oblicuamente la arista ph^1 resultan secciones que tienen un eje de figura según el cual se verifica la extinción. En general, una sección se extingue según la proyección del eje óptico sobre el plano de la misma, de donde resulta que en toda sección de zona paralela á una recta contenida en la cara p hay á lo menos un lado perpendicular á la expresada proyección, y por lo tanto, la extinción tiene lugar según este lado.

106. **Sistema exagonal.**—Las secciones constantemente oscuras son triángulos equiláteros, exágonos ó dodecágonos regulares.

Por lo demás, todo lo que se ha dicho del segundo sistema es aplicable al exagonal. En el prisma primitivo la zona h^1h^1 dá rectángulos que se extinguen según sus lados, y la zona ph^1 exágonos prolongados que se extinguen según el eje de figura.

Como se ve, no siempre es dado ó fácil distinguir el segundo sistema del tercero.

107. **Sistema ortorómbico.**—Las secciones constantemente oscuras son, en general, rectángulos, puesto que, debiendo hallarse comprendidas, en cada caso, en una zona perpendicular al plano de los ejes ópticos, deben pertenecer á las zonas ph^1 ó pg^1 cuando α ó γ coinciden con h^1g^1 , y á la zona h^1g^1 cuando β coincide con esta arista.

Las zonas pg^1 y ph^1 dan lugar á trapecios que se extinguen según su eje de figura. La zona h^1g^1 da lugar á rectángulos que se extinguen según sus lados.

Para determinar de antemano la dirección de la extinción en otra sección diferente de las consideradas, es necesario conocer la posición de los ejes ópticos en el cristal.

108. **Sistema monoclinico.**—Por lo que concierne á las secciones completamente oscuras hay que considerar dos casos, á saber: que el plano de los ejes ópticos coincida con g^1 , ó con la ortodiagonal. En el primero, las secciones pertenecen á la zona ph^1 , y por consiguiente, su forma tiene un eje de figura. En el segundo, las secciones carecen, en general, de simetría, y sólo podrán tenerla cuando ocurra, por ejemplo, que uno de los ejes ópticos coincide con h^1g^1 .

Las secciones pertenecientes á la zona ph^1 tienen siempre un eje de figura, según el cual se efectúa la extinción, puesto que dicha recta es perpendicular á la ortodiagonal, dirección que, como es sabido, coincide necesariamente con uno de los ejes del elipsóide.

Cualquiera otra sección simétrica que pueda presentarse, fuera de la zona ph^1 , no se extingue según su eje de figura. Sin embargo, en las zonas pg^1 y h^1g^1 suele existir cierta relación entre estas aristas y la dirección de la extinción.

109. **Sistema triclínico.**—En las secciones simétricas que pueden presentarse, no existe, en general, relación necesaria entre su eje de figura y la dirección de la extinción. En algunas caras principales suele conocerse el ángulo de extinción, á partir de las aristas de zona pg^1 y ph^1 , como se verá muy pronto.

110. Fouqué y Michel Lévy resumen en un cuadro apenas distinto del siguiente, toda la doctrina que se acaba de exponer. Debe advertirse que en él se considera la forma general de la sección, prescindiendo de las modificaciones á que pueden dar lugar las truncaduras más ó menos complicadas sobre los ángulos del prisma primitivo. Sin embargo, como las secciones triangulares y en forma de trapecio, que resultan de modificaciones muy habituales, son tan frecuentes, me ha parecido útil hacer mención de ellas en el Cuadro.

Relaciones de posición entre los ejes de elasticidad y los cristalográficos.	Secciones constantemente oscuras.	Secciones en zonas, cuya arista es			Secciones cualesquiera.	Sistema cristalino.
		ph'	pg'	$h'g'$		
Todas las direcciones pueden considerarse como ejes de elasticidad.	La forma de la sección es poligonal regular, ó simétrica con respecto á un eje de figura, y permanece constantemente oscura.					Cúbico.
El eje de revolución del elipsoide coincide con el cristalográfico.	Cuadrados ú octógonos regulares.	Rectángulos que se extinguen según sus lados.			Las simétricas se extinguen según su eje de figura. Las que pertenecen á zonas cuya arista es perpendicular al eje de revolución del elipsoide se extinguen según dicha arista, en general, paralela á uno de los lados. La extinción tiene lugar según la proyección del eje de revolución.	CUADRÁTICO.
	Exágonos ó dodecágonos regulares.	Rectángulos ó exágonos prolongados simétricos, que se extinguen según un lado ó, en general, según su eje de figura. Las secciones triangulares son simétricas y según su eje de figura.	Rectángulos que se extinguen según sus lados.			EXAGONAL.
den con los cristalográficos.	rectángulos.	según su eje de figura.			extinguen según sus lados.	
Un eje de elasticidad coincide siempre con la ortodiagonal. Los otros dos están contenidos en g' .	g' , secciones simétricas con respecto á un eje de figura.	Un eje de figura según el cual se efectúa la extinción.	Ángulos de extinción determinados á partir de estas aristas.		La extinción tiene lugar según la intersección del plano de la sección con el que biseca al diedro formado por los planos que pasan por los ejes ópticos y cuya arista es una perpendicular á la sección.	MONOCLÍNICO.
Cuando α y γ están contenidos en	un plano perpendicular á g' , secciones, en general, no simétricas.		Secciones, en general, no simétricas, excepto en la cara			
			p	h'		
No existe relación necesaria.	En general, no simétricas.	En general, no simétricas. Algunos ángulos de extinción determinados, á partir de estas aristas.				TRICLÍNICO.

II

Determinación de la especie mineralógica

III. Esta segunda parte del problema completa la especificación del mineral. En la primera se ha visto de qué modo se llega á determinar, en general, el sistema cristalino á que pertenece, cuando la sección se presenta simétrica con relación á un eje de figura. Falta ahora exponer los procedimientos en virtud de los cuales es dado distinguir cada una de las especies mineralógicas comprendidas en un mismo sistema. En los cuatro primeros hay que recurrir á las consideraciones que se refieren á la relación de posición entre los ejes cristalográficos y los de elasticidad, á los planos de crucero, á los fenómenos de coloración propia del mineral y á los que ofrece con la luz polarizada entre los nícoles cruzados; en una palabra, hay que poner en juego todos los resortes que pueden arrojar luz en la solución del problema, dado que entre la dirección de la extinción y la forma de la sección existen puntos comunes á los cuatro sistemas. En los dos últimos puede emplearse, además, un procedimiento que les es exclusivo, fundado en el conocimiento del ángulo de extinción que, contado á partir de las aristas pg^1 , ph^1 , h^1g^1 , cada especie afecta, respectivamente, en las caras p , h^1 , g^1 , que son las más importantes para el análisis óptico.

La dificultad consiste, á primera vista, en que los microlitos aparecen, en la preparación, orientados en todos sentidos, y, sin embargo, precisamente esta diversidad de orientación, y el hecho de que un gran número de especies minerales importantes se presentan en cristales prolongados según las aristas pg^1 , ph^1 , h^1g^1 , permiten, por una parte, repetir la observación sobre numerosos individuos, y, por otra, cerciorarse de que se opera sobre una zona determinada. Por ejemplo, los microlitos de piroxeno se presentan generalmente prolongados según la arista h^1g^1 , de suerte que la forma prolongada de la sección es ya un indicio de que se trata de la zona de esta arista; si, además, se sabe que el ángulo de extinción sobre la cara g^1 es de $38^\circ 44'$, y de 0° en la h^1 , y al medir el ángulo de extinción en diversos cristales se encuentra que nunca excede del expresado valor máximo, no cabe duda de que el mineral es, en efecto, el piroxeno.

Cuanto mayor sea el número de estas observaciones, tanto mayor será la probabilidad que milite en favor de la determinación específica del mineral; y claro es que la concordancia de resultados, es decir, el hecho de que en ningún caso se obtenga un valor superior al máximo, da

toda la certidumbre necesaria. La seguridad de la determinación reposa, en último término, en una probabilidad de orden matemático, que, por el hecho de acentuarse á medida que se multiplican las observaciones, entraña, para el caso, todo el valor de la certidumbre.

Algunos ejemplos prácticos, tomados entre los diferentes minerales, tanto simples como maclados, completarán la inteligencia del asunto. En este estudio es muy útil servirse de modelos de cristales en madera, sobre los cuales se marcan las direcciones de los ejes de elasticidad, bien sea con lápiz, ó bien taladrándolos en el sentido conveniente y fijando en el agujero un alambre recto. Este proceder es de gran recurso, por lo que auxilia en el estudio óptico de los cristales maclados.

112. **Ejemplos prácticos. 1.º Piroxeno.**—Este mineral es monoclinico, y la forma de la sección g^1 del prisma primitivo es la representada en la figura 50. Es positivo, de modo que la bisectriz coincide con γ . El ángulo AOB de los ejes ópticos es de $58^\circ 59'$, y su plano se halla contenido en aquella cara. El ángulo que $h^1 g^1$ forma con la bisectriz γ vale $38^\circ 44'$, y el de pg^1 con α , $22^\circ 55'$.

Consideremos ahora los tres casos límites que pueden ocurrir, á saber: cuando la sección pertenece á una de las tres zonas $h^1 g^1$, pg^1 , y ph^1 .

En el primer caso, que es el más frecuente, porque los cristales de piroxeno se presentan de ordinario prolongados según esta arista, si la sección es el mismo plano g^1 , la extinción tiene lugar á $38^\circ 44'$ de la arista de zona. Si es la cara h^1 , la extinción se verifica á lo largo de la arista misma. Fácilmente se concibe que si la sección se halla comprendida entre una y otra cara, el ángulo de extinción, contado de dicha arista, será $> 0^\circ$ y $< 38^\circ 44'$. Las rendijas de crucero según los planos mm , que se dejan ver en el sentido de la zona, pueden servir, en muchas ocasiones, para orientar la sección.

En el segundo caso, el ángulo de extinción es de $22^\circ 55'$ en la cara g^1 , y de 0° en la p ; pero así como en el caso precedente toda sección comprendida entre una y otra cara presenta un ángulo de extinción comprendido entre los valores extremos que á las mismas corresponden, aquí sucede que en una sección comprendida entre g^1 y p puede haber un valor máximo, que es de $28^\circ 25'$, superior al extremo de $22^\circ 55'$; este caso ocurre cuando dicha sección forme con g^1 un ángulo diedro de $67^\circ 14'$, lo cual proviene de la manera de proyectarse los otros ejes del elipsóide sobre el plano de sección.

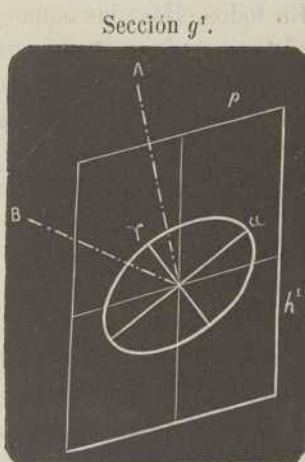


Fig. 50.

En la zona ph^1 las secciones son simétricas, y las extinciones tienen lugar según el eje de figura, paralelo siempre á h^1g^1 y, por consiguiente, el ángulo de extinción, referido á la arista de zona, es cero.

2.º **Hornblenda.**—Es un mineral monoclinico, negativo, y, por lo tanto, la bisectriz coincide con α . El ángulo de los ejes ópticos es de $79^\circ 24'$, y su plano coincide con g^1 . El ángulo que γ forma con la arista h^1g^1 es cero, y el de α con pg^1 , de $14^\circ 58'$.

En la zona h^1g^1 , que es la habitual, las secciones se distinguen por las rendijas de crucero según h^1 , sobre todo, cuando el mineral ha experimentado un principio de alteración. El ángulo de extinción es cero.

En la zona pg^1 , el ángulo varía desde cero, cuando la sección se confunde con p , á $14^\circ 58'$ cuando la sección es h^1 .

3.º **Oligoclasa.**—Pertenece al grupo de los feldespatos triclinicos. En todos ellos, las zonas pg^1 y ph^1 , ó más bien, la perpendicular á g^1 , revisten una importancia excepcional; la primera, por ser la de prolongación habitual de los microlitos; la segunda, porque las secciones en ella comprendidas son rectángulos y no se extinguen según sus lados, como acontece con la ortosa, el único feldespato que no es triclinico, lo cual sirve para establecer entre ellos una distinción característica. En la oligoclasa, la arista pg^1 coincide sensiblemente con γ , y α se halla contenido en un plano perpendicular á esta arista, formando con la perpendicular á g^1 un ángulo de $18^\circ 30'$.

La macla más frecuente, cuando existe, es la *de la albita*, así llamada por ser habitual en esta feldespato. En ella la cara de composición es g^1 , y la rotación, de 180° . Los dos cristales acoplados de la figura 16, representan esta macla una vez efectuada la semirotación al rededor del eje EJ .

Zona pg^1 .—La extinción se produce según esta misma arista, puesto que uno de los ejes de elasticidad coincide con ella.

En los cristales maclados la extinción de dos laminitas hemitropas se efectúa á lo largo de la traza del plano de macla, y, por consecuencia, es simultánea en los dos cristales acoplados. Para comprender bien los fenómenos de extinción en las maclas, es indispensable recordar lo expuesto más atras (21).

Zona perpendicular á g^1 .—La arista de zona está contenida en el plano que determinan α y β , de que resulta que el ángulo de extinción, contado de la arista de zona, varía entre $18^\circ 30'$, valor que alcanza cuando dicho plano coincide con el de la sección, y cero, cuando esta contiene á la arista pg^1 .

Tratándose de esta zona es evidente que, en los cristales maclados, dos laminitas hemitropas se extinguen simétricamente á un lado y á otro de la traza del plano de macla, y pueden presentar de una extinción á

otra un ángulo que varía entre el doble de $18^{\circ} 30'$, ó sea 37° , valor que corresponde al caso en que la arista pg^1 es perpendicular al plano de sección, y cero, cuando la sección contiene á dicha arista. Este ángulo no es, en resumen, sino el que forman los ejes γ de los dos cristales hemitropos. En cualquiera otra sección, dentro de esta zona, el ángulo entre dos extinciones sucesivas será $> 0^{\circ}$ y $< 37^{\circ}$, quedando siempre bisecado por la línea de macla.

Si la sección no corresponde exactamente á ninguna de estas dos zonas, el ángulo entre dos extinciones sucesivas podrá continuar estando comprendido entre 0° y 37° , pero no quedará ya bisecado por la línea de macla.

4.º **Anortita.**— Es un feldespato triclinico, negativo.

Zona pg^1 . En la cara p el ángulo de extinción varía entre 20° y 42° , y en la cara g^1 entre 25° y 45° . En general, puede decirse que en esta zona el ángulo varía desde 0° hasta más allá de 30° .

En los cristales maclados como la albita, el ángulo comprendido entre las extinciones sucesivas de dos laminitas hemitropas, acostadas á lo largo de la arista pg^1 , y dado que el plano de composición g^1 sea perpendicular á la sección, es sensiblemente el doble de cada uno de los máximos correspondientes á la cara p , pudiendo variar, en consecuencia, entre 40° y 84° .

Zona ph^1 . El ángulo máximo de extinción, á partir de la traza del plano g^1 , excede de $37^{\circ} 21'$, y el de las extinciones sucesivas de dos laminitas hemitropas, de $74^{\circ} 42'$.

La anortita es el feldespato que ofrece ángulos de extinción más considerables, distinguiéndose, por esta particularidad, de los otros feldespatos triclinicos.

III

De algunos otros fenómenos ópticos que suelen presentarse en la observación microscópica

113. **Esferolitos.**— Ocurre con frecuencia que las rocas cristalinas contienen pequeños glóbulos, llamados *esferolitos*, que presentan, entre los nícoles cruzados, fenómenos ópticos complejos, siendo, por lo tanto, de mucho interés estudiarlos con alguna detención, á fin de saber interpretar las apariencias que originan, cuando se observan con el microscopio polarizante. Ajustando estrictamente la distincion que entre ellos puede establecerse, á las diferencias de los expresados fenómenos, es

dado clasificarlos en tres grupos, á saber: *colóides*, *coloideo-cristalinos* y *cristalinos*.

Colóides.—Ofrecen los fenómenos propios de la materia amorfa ó isotropa, permaneciendo constantemente oscuros entre los nícoles cruzados, durante una rotación completa de la platina.

A este tipo se refieren exclusivamente los globulitos y algunos longulitos, que pueden considerarse como los primeros esbozos de la individualización cristalogénica, cuando todavía no se ha iniciado la orientación cristalográfica, y también los gránulos de forma redondeada que suele formar el ópalo hialítico.

Coloideo-cristalinos.—Comprendo en esta categoría los esferulitos que presentan los fenómenos peculiares al vidrio comprimido ó templado, y que en la clasificación generalmente admitida se colocan en el grupo anterior.

El vidrio así modificado actúa sobre la luz polarizada y produce una cruz negra de brazos disfumados, como la produciría una série de cristales similares colocados de modo que uno de sus ejes de elasticidad se hallase en todos ellos situado en el sentido del radio del glóbulo. De esta disposición radial resulta que cuando dicho eje coincide con una de las secciones principales de los nícoles, se produce oscuridad en el sentido del diámetro que comprende y en el perpendicular. Los bordes de la cruz aparecen disfumados porque los cristales próximos al que coincide exactamente con la sección principal del nícol producen también un efecto que se hace sensible, con intensidad decreciente, hasta cierta distancia angular de dicha posición. Al hacer girar la platina, la cruz debe, pues, permanecer constantemente orientada según las secciones principales de los nícoles.

Este fenómeno se observa en algunos glóbulos de ópalo contenidos en las rocas volcánicas, y en muchos de los que la materia feldespática forma en las perlitas terciarias, en algunos pórfidos cuarcíferos, y en otras rocas cristalinas.

Una razón de simetría hace ver que cuando los cristales que intervienen en el esferulito así constituido pertenecen al sistema cuadrático ó al exagonal, el eje de revolución del elipsóide de elasticidad debe estar dispuesto á lo largo del radio, ó en sentido perpendicular al mismo. En el sistema ortorómbico, cualquiera de los tres ejes cristalográficos puede ajustarse á estas condiciones. En el sistema monoclinico, sólo quedan satisfechas en un caso, á saber, cuando el cristal sea prolongado en el sentido de la diagonal; fuera de este caso, y, en general, en todos en el sistema triclinico, la disposición radial puede tener lugar sin que la cruz se produzca, resultando, en consecuencia, una polarización de agregado (96), si la individualización cristalogénica y el espesor de la sección son suficientemente acentuados.

Cristalinos. — A esta categoría corresponden los esferolitos que presentan en toda su extensión una orientación única, ú orientaciones regionales bien manifestadas.

Para entender el génesis de estos glóbulos, considérese que cuando en el seno del magma que les da origen nada un cristal ya formado, cuya naturaleza es similar á la del magma, imprime á la individualización de este su propia orientación; hecho que, en efecto, se observa en el interior de algunos glóbulos petro-silíceos, en los cuales un fragmento de cristal de cuarzo preexistente ha impreso su orientación cristalográfica á la materia circundante, lo cual motiva que cuando se hace girar la platina, se extinga simultáneamente todo el esferolito ó todas las regiones orientadas del mismo modo.

114. **Epigénia.**—Este fenómeno se presenta con alguna frecuencia en la observación y merece, por lo tanto, ser estudiado detenidamente, para que no pueda dar lugar á errores en la determinación mineralógica al juzgar tan sólo por la forma de la sección, pues es sabido (23) que el mineral epigenizante se acomoda á la forma cristalina del epigenizado. Para que se tenga idea de las apariencias que en tal caso resultan, y de los medios que hay que emplear para distinguirlas, hé aquí un caso práctico que puede servir de ejemplo.

Los cristales de piroxeno de primera consolidación contenidos en un meláfido del Morvan, se presentan en secciones de forma rómbica ú octogonal, en que el color amarillento del mineral, entre los nícoles cruzados, ha desaparecido, sustituyéndole un color gris azulado análogo al de la nefelina y al de la variedad de cuarzo conocida con el nombre de calcedonia; de suerte que en virtud de esta primera inspección es dado ya colegir que se trata de un fenómeno de epigénia. La dificultad queda reducida únicamente á saber á cuál de estos dos minerales hay que referir dichas secciones. Cuando no se quisiera recurrir á otro orden de consideraciones, sería facil hacer desaparecer bien pronto toda ambigüedad, sin más que separar el cubre-objeto para dejar á descubierto la preparación, lavarla con bencina, á fin de eliminar la capa de bálsamo del Canadá que pudiera estarle adherida, y someterla á la acción del ácido clorhídrico; si el mineral no se disuelve, como acontece en el caso presente, es prueba de que se trata de la calcedonia; en el caso contrario, hay que referirle á la nefelina. El ensayo químico es un elemento de prueba indispensable siempre que el análisis óptico resulta insuficiente para hacer desaparecer la incertidumbre.

La calcedonia afecta las propiedades ópticas del cuarzo, y sus secciones se extinguen, por consiguiente, en dos direcciones rectangulares. El elipsóide de elasticidad es de revolución y achatado (67). Esto entendido, y á propósito del fenómeno de epigénia de que acabo de hacer men-

ción, creo muy oportuno ampliar estas ideas, describiendo un hecho que el análisis óptico de la expresada roca me ha puesto de manifiesto, y cuyo conocimiento ha de ser, sin duda, útil á las personas que se dediquen de lleno á estos estudios.

En las secciones de piroxeno epigenizado que se confunden sensiblemente con la cara g' la extinción se produce á 39° de la arista $h'g'$, lo cual indica desde luego, supuesta horizontal la preparación, que uno de los dos planos verticales que contienen respectivamente á los ejes de la elasticidad α y γ del elipsóide de la sustancia epigenizada, contiene también al de revolución de la sustancia epigenizante ($112-1^\circ$). En las secciones paralelas á p la extinción tiene lugar según los lados más desarrollados del octógono, lo cual prueba que el eje óptico que en el piroxeno es casi perpendicular á esta cara, no ocupa ya su posición normal, puesto que si la ocupase, la sección permanecería constantemente oscura durante toda la rotación de la platina. Este resultado, aunado con el que precede, demuestra, además, que el eje de revolución del nuevo elipsóide coincide, necesariamente, con α ó con γ .

Facilmente se averigua con cuál de ellos se verifica la coincidencia, sin más que interpretar los resultados de la observación misma. En efecto, en las secciones completamente epigenizadas de la cara p , el tránsito de luz á oscuridad, durante la rotación, es apreciable pero no acentuado, indicando con ello que se opera cerca de una sección perpendicular al eje óptico, y como es evidente que en esta posición el eje de elasticidad que se halla más próximo es γ , se sigue que este es el de revolución en el elipsoide de la calcedonia. De aquí se deduce que en el trabajo de epigenización el eje menor de elasticidad de la sustancia epigenizada permanece invariable, á lo menos en cuanto á su posición, y pasa á ser el de revolución de la sustancia epigenizante. La modificación del elipsoide recae, pues, exclusivamente, sobre los ejes α y β , que vienen á ser iguales, originándose un elipsóide achatado, cual corresponde al mineral birefringente positivo de que se trata.

FIN.