



Esta obra es una reproducción digital de un ejemplar propiedad del CSIC y conservado en la biblioteca del Museo de Ciencias Naturales.

Podrá ser utilizada con fines de consulta, estudio o investigación, siempre que se respete la autoría y la integridad de la obra, en los términos previstos por la legislación vigente. No se permite en ningún caso el uso comercial de la obra, ni en todo ni en parte. Cualquier otra utilización deberá ser autorizada expresamente por el CSIC.



174679

805334

JUNTA PARA AMPLIACIÓN DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

TRABAJOS DEL MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES

SERIE GEOLÓGICA, NÚM. 37.

LOS MODERNOS MÉTODOS ROENTGENOGRÁFICOS APLICADOS
EN LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRUCTURA CRISTALINA
DE LA EPSOMITA

POR

GABRIEL MARTÍN CARDOSO

(CON 7 LÁMINAS Y 29 FIGURAS INTERCALADAS)

(25 diciembre 1930)

M A D R I D

1930

El Museo Nacional de Ciencias Naturales forma parte del Instituto Nacional de Ciencias y depende directamente de la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas.

Publica un conjunto de Trabajos constituidos por libros y folletos, que forman tres series:

- SERIE Geológica.
- Zoológica.
- Botánica.

En los laboratorios de Geología del Museo, la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas ha organizado cursos de Investigaciones Geológicas en España, que tienen dos misiones fundamentales: 1.^a Realizar labor de seminario para crear investigadores de la ciencia geológica en España.— 2.^a Publicación de Memorias respecto a Geología española, cuyo conjunto constituye la Serie Geológica de los Trabajos del Museo Nacional de Ciencias Naturales.

Estos estudios están dirigidos por el profesor D. Eduardo Hernández-Pacheco.

TRABAJOS DEL MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES

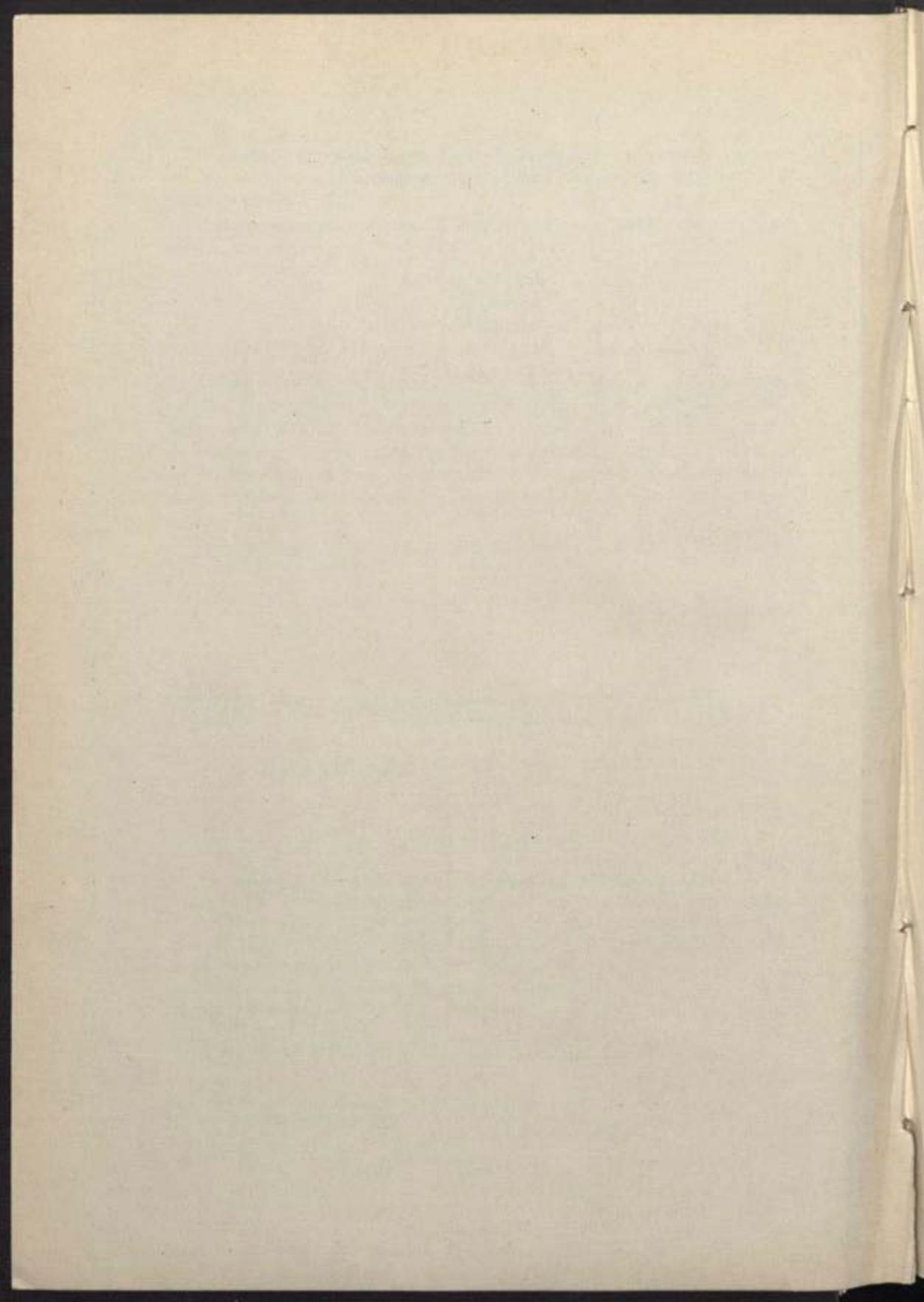
Serie Geológica (*).

	<u>Pesetas</u>
1. (1) <i>Itinerario geológico de Toledo a Urda</i> , por Eduardo Hernández-Pacheco.....	1,50
2. (2) <i>Geología y Prehistoria de los alrededores de Fuente-Alamo (Albacete)</i> , por Daniel Jiménez de Cisneros.....	0,50
3. (7) <i>Ensayo de Síntesis Geológica del Norte de la Península Ibérica</i> , por E. Hernández-Pacheco.....	2,00
4. (8) <i>Resumen fisiográfico de la Península Ibérica</i> , por Juan Dantín....	3,00
5. <i>Lagos de la Región Leonesa</i> , por Federico Aragón.....	0,50
6. <i>Los fenómenos de corrimiento en Felanitx (Mallorca)</i> , por Bartolomé Darder.....	0,50
7. <i>El Triásico de Mallorca</i> , por Bartolomé Darder.....	3,00

(*) Los números que van entre paréntesis corresponden a la primitiva numeración anterior a la división en SERIES de estos «Trabajos».

UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS



JUNTA PARA AMPLIACIÓN DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

TRABAJOS DEL MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES

SERIE GEOLÓGICA, NÚM. 37.

LOS MODERNOS MÉTODOS ROENTGENOGRÁFICOS APLICADOS
EN LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRUCTURA CRISTALINA
DE LA EPSOMITA

POR

GABRIEL MARTÍN CARDOSO

(CON 7 LÁMINAS Y 29 FIGURAS INTERCALADAS)

(25 diciembre 1930)



MADRID

1930

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS Y QUÍMICAS

LOS ANÁLISIS QUÍMICOS DE LOS
EN LA DETERMINACIÓN DE LA
DE LA ALIMENTACIÓN

CONSTITUCIÓN QUÍMICA

DE LOS ALIMENTOS



INTRODUCCIÓN

Se repite muchas veces en el desenvolvimiento de las ciencias, el hecho de que un simple ensayo u observación llevados a cabo por los investigadores descubre un mundo nuevo, cuando no conduce a una concepción completamente distinta de la que hasta aquel momento se tuviese de los fenómenos. Con frecuencia no sospecha el afortunado científico que tropieza con uno de estos hechos, la trascendencia que su descubrimiento va a tener, la revolución que va a provocar en las ideas, en las hipótesis, en la marcha lenta y progresiva de la ciencia.

Recordemos a este respecto la simple observación de Papin sobre la fuerza del vapor, la sencilla experiencia de Galvani con la rana, la observación de Jenner en las personas que ordeñaban las vacas llenas en sus ubres de pústulas variolosas, y tantos otros ejemplos que podríamos citar.

En Cristalografía, casi en nuestros días, se ha realizado uno de estos felices descubrimientos (que no fué casual desde el punto de vista de la Física) por el insigne físico alemán Max von Laue, descubrimiento que ha traído una revolución completa en la ciencia de los cristales, alcanzando sus efectos a todo lo que concierne a la esencia íntima de la materia, a la constitución de los átomos y moléculas. De ahora en adelante todos estos conocimientos irán siempre juntos, inseparables, ligados en estrecho lazo, cuya expresión está en la *Estereoquímica cristalina*.

El feliz descubrimiento a que aludimos ha sido el efecto, revelado en placas fotográficas, que producen los rayos Roentgen al actuar sobre un cristal. Data del año 1912 y marca el principio de una era gloriosa para la Cristalografía, si juzgamos por los resultados conseguidos en los pocos años que han transcurrido.

La belleza del hermoso campo^o abierto a la investigación y ofrecido a los amantes de la ciencia de los cristales por esta conquista científica, cuya trascendencia se previó en seguida, y más tarde, pasados ya los primeros momentos de apasionamiento e ilusiones excesivas que trae todo lo novísimo, se confirmó sobre los frutos conseguidos, nos decidieron a emprender el estudio de la Epsomita ($\text{SO}_4 \text{ Mg. } 7\text{H}_2\text{O}$), cuya estructura no se había determinado aún por los nuevos procedimientos.

Es la Epsomita mineral genuinamente español, abundante en nuestros terrenos esteparios y en muchos de nuestros manantiales salinos, y lo he considerado muy a propósito para iniciar mi modesta labor investigadora.

En este trabajo expongo detalladamente los métodos empleados y los resultados obtenidos en la determinación de la estructura de dicha substancia, comenzando por unas generalidades sobre los primeros a modo de indispensable introducción.

Mas como esta investigación la he llevado a cabo durante el año 1925 en el Laboratorio Roentgenográfico del Instituto de Mineralogía de la Universidad de Leipzig, merced a la concesión de una pensión por la Junta para Ampliación de Estudios, quiero hacer presente, antes de principiar, mi gratitud más profunda para la referida Junta, por haberse dignado otorgarme la pensión. Asimismo al Prof. Rinne, Director del Instituto Mineralógico de Leipzig, y a su ayudante, Dr. Hentschel, que con la mayor amabilidad me han dirigido en los estudios, poniendo el Sr. Rinne a mi disposición todos los medios necesarios, y a mis queridos profesores D. Ignacio Bolívar y Urrutia, D. Lucas Fernández Navarro y D. Eduardo Hernández-Pacheco, que me facilitaron la labor, permitiéndome la iniciación preliminar cristalográfica, mineralógica y petrográfica en los laboratorios del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, me orientaron y aconsejaron en su desarrollo y han dispensado siempre benévola acogida a mis modestos trabajos.

GENERALIDADES

**Historia, desenvolvimiento y estado actual
de las investigaciones roentgenográficas.**

ROENTGEN Y LOS RAYOS X.—En el año 1895, el sabio alemán W. C. Roentgen descubrió una nueva clase de radiación, que por ser desconocida en su esencia durante bastante tiempo, recibió el nombre de *rayos X*. Su incompleto conocimiento no fué obstáculo para que se determinasen las principales propiedades que el mismo Roentgen dió a conocer (1)¹: el alto poder de penetración al través de los cuerpos, aun de los metales, opacos a la luz ordinaria, y el distinto grado de absorción para con ellos (punto de partida de las aplicaciones radiológicas en Medicina); la acción sobre las placas fotográficas; la facultad de ionizar los gases, haciéndolos conductores, y de producir fluorescencia en determinados cuerpos, como el platinocianuro de bario entre otros.

Pero no se pudo comprobar su naturaleza. Creyó Roentgen que serían debidos los rayos X a vibraciones longitudinales del éter; hoy sabemos que se trata de vibraciones transversales como las de la luz, y de carácter electromagnético.

Los rayos X son producidos en tubos cerrados provistos de dos polos o electrodos en su interior. Al hacer pasar una descarga eléctrica al través del aire enrarecido que llena el tubo, se

¹ Los números indicados entre paréntesis corresponden a las citas bibliográficas que van al final de este trabajo.

producen los *rayos catódicos*, que parten del cátodo o polo negativo, consistiendo en corrientes de electrones negativos dotados de vertiginosa carrera, y que al encontrar al polo positivo, ánodo, o un obstáculo cualquiera que se interponga a su paso, que puede muy bien ser las mismas paredes del tubo, se produce un choque violento, parada repentina de los electrones y transformación de la energía que transportan, en parte en calor, y en parte también en la emisión de los rayos de Roentgen.

El punto de donde éstos surgen se suele denominar *anticátodo*; salen los rayos al través de las paredes del tubo y se difunden por el espacio circundante.

A partir de la fecha del descubrimiento de Roentgen, todos los físicos se dedicaron con afán a buscar un medio de averiguar la verdadera naturaleza de tan maravillosa radiación, pero tropezaron con grandes dificultades. Se observó que los rayos X se propagaban en línea recta, que no eran desviados por los campos magnéticos (diferencia con los rayos catódicos); pero los intentos de producir en ellos fenómenos de reflexión, refracción, polarización e interferencia, fueron infructuosos, y no se pudo lograr, por tanto, la seguridad de que poseyeran carácter ondulatorio. Las suposiciones más diversas concurrían al concepto rudimentario de los rayos descubiertos por Roentgen.

En esto, allá por el año 1903, Barkla logró demostrar que los rayos X se polarizan, lo que llevó consigo la prueba de que se trata de vibraciones transversales. Preciso más el concepto de dureza y blandura, es decir, de mayor o menor poder de penetración al través de los cuerpos, observado ya anteriormente, y preparó el camino para los experimentos posteriores de Haga y Wind (1906) y de Walther y Pohl (1908), que consiguieron difractar los rayos Roentgen.

Tuvieron que valerse para ello de rendijas muy estrechas cuyos bordes convergentes se juntaban en ángulo por un extremo; próximo a éste es donde llegaba el diámetro de la hendidura al reducido tamaño que se precisa para producir la di-

fracción. La experiencia, tan tosca, no logró sino resultados dudosos.

Con estos datos, Sommerfeld calculó, mediante su teoría de las difracciones, que la longitud de onda debía de estar alrededor de la magnitud 4×10^{-9} , hipótesis que después se ha confirmado.

EL EXPERIMENTO DE LAUE, FRIEDRICH Y KNIPPING.—Así las cosas, llegamos al año 1912. El Prof. Groth, de la Universidad de Munich, con sus ideas y trabajos sobre la hipótesis de las redes cristalinas de puntos, de que Sohncke y él eran autores, y que había venido a aclarar la anterior de Bravais de las redes moleculares, lograba cada día más adeptos para su teoría.

Entre éstos se hallaba el joven físico Max von Laue, que trabajaba en la citada Universidad de Munich sobre el interesante problema de los rayos X. Llamóle poderosamente la atención la hipótesis de Groth, y le sugirió la idea de que las mallas de esas redes cristalinas, por su pequeñez y regular distribución, pudieran servir de excelente medio para difractar los rayos Roentgen, si es que éstos poseían una longitud de onda de la magnitud supuesta por Sommerfeld. Entonces propuso a sus colegas P. Knipping y W. Friedrich hacer un ensayo y la manera de llevarlo a cabo.

Según las indicaciones de Laue, Friedrich y Knipping hicieron caer un haz de rayos X sobre un cristal de sulfato de cobre, colocando detrás una placa fotográfica para recoger los rayos secundarios originados siempre que un rayo primario encuentra un objeto. El éxito coronó por completo el ensayo: aparecieron varios puntos en la fotografía, correspondientes a las difracciones de los rayos en el interior del cristal. Pero tan tosco fué este primer ensayo, que pronto se repitió orientando el cristal y utilizando ejemplares de blenda en fragmentos de exfoliación perfectamente transparentes. Los puntos mostraban ahora una gran ordenación en relación con la simetría del cristal.

Los resultados de la experiencia se publicaron en la *Acade-*

mía de Ciencias (2); el portentoso descubrimiento atrajo la atención de todos los físicos y cristalógrafos, porque con él quedó demostrado, de una parte, la realidad de la hipótesis de la distribución de la materia cristalina, según los nudos de una red paralelepípedica, y de otra, la naturaleza ondulatoria de los rayos X. Se multiplicaron los ensayos, se extendieron las discusiones, resultando de todo ello un avance extraordinario de la ciencia. Las famosas placas obtenidas por Friedrich y Knipping se guardan como documento histórico en el Deutsches Museum de Munich.

No tardó mucho en perfeccionarse el método de Laue y en aparecer nuevas aplicaciones de su descubrimiento, tanto de orden físico como cristalográfico. La estructura cristalina comenzó a estudiarse por medio de los *Lauediagramas*, fotogramas según el indicado método.

LOS EXPERIMENTOS DE BRAGG.—En 1913, W. H. Bragg y W. L. Bragg (padre e hijo) idearon un nuevo procedimiento para estudiar los fenómenos de interferencia en los cristales, utilizando los espectros de rayos Roentgen, porque observaron que las caras cristalinas pueden reflejar los rayos X en determinadas condiciones, siguiendo las leyes de la reflexión de la luz. Sustituyeron en el experimento de Laue la placa fotográfica por una *cámara de ionización*, que recogía los rayos reflejados y determinaba la intensidad mediante un galvanómetro. Además, el cristal no permanecía fijo, sino que giraba alrededor de un eje normal al rayo incidente (3).

Como resultado de estos estudios, formularon la ley que lleva su nombre y que ha sido de aplicación general en todos los órdenes de investigaciones roentgenográficas. La fórmula de la *ley de Bragg* es:

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen} \alpha,$$

en la que λ representa la longitud de onda; d , la distancia entre dos planos reticulares paralelos inmediatos del cristal; α , el án-

gulo de reflexión, y n , un número entero que representa el orden del espectro.

Poco después, De Broglie sustituyó la cámara de ionización por placas fotográficas para obtener los espectros en diagrama (4).

Por el procedimiento de Bragg-Broglie o del *cristal giratorio*, se ha logrado determinar la estructura de numerosas sustancias, averiguando los valores d de la fórmula anterior en distintas direcciones cristalográficas, para una longitud de onda λ conocida y un ángulo α que se puede medir en el espectrofotograma.

Seemann, Schiebold y Polanyi han perfeccionado más tarde los métodos fotográficos, corrigiendo los defectos que las primeras experiencias llevaban consigo y dotando a la ciencia de los cristales de un excelente medio de investigar las delicadas redes que los constituyen (5) (23).

LOS MÉTODOS DE DEBYE-SCHERRER-HULL.—En 1916, P. Debye y P. Scherrer dieron a conocer un nuevo orden de investigaciones llevadas a cabo en Goettingen, a la vez que, independientemente de ellos, el americano A. W. Hull establecía análogos métodos (6 y 7). Consiste el procedimiento en emplear los cristales reducidos a polvo fino; cada partícula de este polvo se comporta como un cristal independiente con sus correspondientes planos reticulares, ya que por muy fino que sea el polvo, la extraordinaria pequeñez de las redes hace que consten de numerosas mallas. En su orientación irregular, habrá muchos granos del polvo cristalino que por su posición formarán el ángulo α de la ley de Bragg para un determinado plano, y los rayos reflejados en ellos formarán una superficie cónica (lugar geométrico de las rectas que forman con otra un ángulo dado); esa superficie cónica dará, por su intersección con la placa fotográfica, un círculo cuyo centro es el punto de la impresión del rayo primario. Tantas reflexiones bajo ángulos distintos α como se formen, aparecerán otros tantos círculos concéntricos, que, medidos y aplicando la ley de Bragg, nos darán los valores de d .

Debye y Scherrer utilizaron, y siguen empleándose actualmente, películas arrolladas a un cilindro en cuyo centro se coloca el polvo del cristal, en vez de placas fotográficas.

APLICACIONES MODERNAS DE LOS ROENTGENOGRAMAS.—Los métodos de Debye-Scherrer-Hull se han extendido en nuestros días a la determinación de estructuras intermedias entre los estados amorfo y cristalino, es decir, a todos aquellos estados de agregación molecular que indican alguna orientación regular, como cuerpos fibrosos, hojosos, concrecionados, masas cristalinas sometidas a presión, tracción o torsión en una o varias direcciones, a los materiales industriales, a las porciones esqueléticas de los animales, etc. Es portentoso el número de publicaciones, comunicaciones y notas sobre los resultados obtenidos en estos estudios que los investigadores alemanes Polanyi, Becker, Herzog, Mark, Weissenberg, etc., han llevado a cabo en el «Institut für Fasserstoffchemie», de Berlín-Dahlem, y los norteamericanos Wyckoff, Clark, Duane y otros, en el «Carnegie Geophysical Institut», de Wáshington.

Los círculos de los diagramas Debye-Scherrer, que son perfectos y completos en las materias bien cristalizadas, se deforman e interrumpen en trayectos en las substancias de estructura semicristalina, y dan valiosas indicaciones sobre la ordenación arquitectónica de los elementos. Igualmente, en metalografía, operando con hilos y láminas sometidas a la hilera y laminador, respectivamente, dan roentgenogramas que delatan las condiciones de los metales y aleaciones y la aptitud para las aplicaciones industriales.

En el campo de la Física y de la Química no son menos las conquistas científicas conseguidas por las derivaciones del experimento de Laue. Especialmente, se ha logrado establecer con carácter definitivo la serie natural de los elementos químicos, según su número atómico; explicar algunas anomalías que se encontraban en la primitiva clasificación de Mendelejeff; confirmar los hechos que resultan de la hipótesis sobre la constitución de

los átomos como unidades complejas formadas por protones y electrones, y establecer las verdaderas fórmulas estereoquímicas en relación con las propiedades físicas y la arquitectura cristalina.

Tantas aplicaciones actuales de los rayos Roentgen al estudio de la estructura de la materia cuando al principio sólo se limitaron a investigaciones puramente físicas y cristalográficas, demuestran bien claro la importancia extraordinaria del descubrimiento de Laue. En tan poco tiempo transcurrido desde la famosa experiencia de Munich, es asombroso el progreso y las conquistas científicas logradas.

La estructura cristalina.

LA ESTRUCTURA CRISTALINA, SEGÚN LAS TEORÍAS ACTUALES.— Está probado que los cristales son el estado más perfecto de la arquitectura de la materia: constituyen el grado más estable de equilibrio, hacia el cual tienden hasta las masas amorfas, en las que casi siempre se acusa un principio, por lo menos, de distribución ordenada.

Cuando Haüy ideó su *teoría de los decrecimientos* y consideró formados los cristales por moléculas integrantes, se creyó que el número de sustancias amorfas era muy considerable. Después los fenómenos de anisotropía hicieron ver más reducido el número de éstas, y hoy puede decirse que no queda ninguna sustancia conceptuada de amorfa, pues aun los mismos líquidos y hasta algunos gases muestran un principio de ordenación interna regular, siquiera esté limitada a la arquitectura atómico-molecular.

Hasta el descubrimiento de Laue, todos los experimentos y estudios cristalográficos se encaminaban a precisar más y más las propiedades de la anisotropía de la materia, las variaciones debidas a los agentes externos, las modificaciones de orden quí-

mico, la morfología y su relación con la cristalogenia, los fenómenos que la luz, calor, electricidad producen en los cristales. En el tratado de *Physikalische Kristallographie*, y más especialmente en la obra magistral *Chemische Kristallographie*, el gran cristalógrafo Paul von Groth (8 y 9) estudia de modo admirable todas estas cuestiones, desarrollando como nadie el estudio de la *Isotipia*, es decir, de las modificaciones que se producen en las constantes cristalográficas de los cuerpos, en series análogas, por las variaciones de composición química y la sustitución de radicales equivalentes.

La perfección de los aparatos goniométricos permitiendo la mayor precisión en las medidas, como en los goniómetros de dos limbos, la aplicación del microscopio de platina teodolítica y tantos otros medios que podríamos citar, hicieron avanzar extraordinariamente a la ciencia de los cristales, lo mismo que el estudio de la acción de la luz por medio del microscopio polarizante.

Pero el agente empleado, la luz, con su longitud de onda no menor de 1.000 Å (angstromes) en las más cortas, no podía descender hasta las dimensiones propias del átomo y la molécula. Cuando se ha dispuesto de un agente que por su pequeña magnitud puede introducirse en la delicada trama de la arquitectura cristalina, ha aparecido ante nuestros ojos un mundo nuevo; hoy podemos recorrer y escudriñar las más finas redes de los cristales, guiados por ese agente: los rayos X.

Todos los fenómenos que la luz nos delata trataron de explicarse considerando a la materia distribuida según los nudos de una red paralelepédica (de que Bravais dió la primera idea) cuyas mallas estarían determinadas por las tres aristas de un paralelepípedo elemental: a , b , c , y los otros tres ángulos: α , β y γ , que formarían entre sí (fig. 1). Se analizaron por vía matemática todas las propiedades vectoriales y las condiciones de estructura, llegando a determinar Fedorow y Schoenflies (10 y 11) todos los grados posibles de simetría, 230, en un edificio cristalino. Hoy

se han confirmado plenamente estas hipótesis al aplicar a los cristales los rayos Roentgen.

CONCEPTO DE LA ESTRUCTURA CRISTALINA.—En la primitiva teoría expuesta por Bravais, que vino a reemplazar a la de Haüy cuando ésta se hizo incompatible con el principio de discontinuidad de la materia, se suponía que los nudos de la red estaban ocupados por moléculas químicas que poseían simetría determinada por las exigencias cristalográficas. Después, Groth y Sohncke sustituyeron el concepto de moléculas por el de sistemas de puntos que venían a formar redes entrelazadas. Niggli (12) y Wyckoff (13) hacen un análisis minucioso de todos los modos de redes posibles.

La idea de la distribución reticular de la materia era necesaria para poder explicar por qué las propiedades vectoriales son idénticas en direcciones paralelas y diferentes en las angulares; sólo mediante una ordenación rigurosa a lo largo de líneas, podía concebirse dicha homogeneidad. Un punto estará rodeado de otros diferentes a las distancias pequeñísimas que se encuentran las porciones mínimas de materia (bien sean átomos, moléculas, iones o electrones, que en conjunto designa Rinne (34) con el nombre de *leptones*); pero según la dirección, la separación será distinta. Ahora bien; si seguimos una de ellas, x , encontraremos, más o menos tarde, a una distancia T_1 (fig. 1), otro punto idéntico al primero, porque alrededor de él la materia está distribuída del mismo modo; en consecuencia, continuando el camino, cuando recorramos otro trayecto T_1 , volveremos a encontrar un tercer punto idéntico al primero y segundo, y así sucesivamente, *a lo largo de la línea y a distancias rigurosamente iguales, habrá una serie de puntos idénticos*; estos puntos pueden coincidir con el centro de gravedad de partículas materiales, con átomos, con centro de moléculas o simplemente con un punto interior o exterior de éstas, alrededor del cual se distribuyen los leptones de la misma manera; la distancia que separa dos puntos idénticos en la misma línea, es decir, el trayecto mínimo que hemos de

recorrer para encontrar un punto análogo al primero, se llama *traslación primitiva* o *período de traslación* T_1 de esa dirección.

En cualquiera otra dirección se repetirá el mismo hecho, si bien las distancias a que encontraremos los puntos idénticos al primero serán distintas de x ; la traslación primitiva varía, pero se mantiene igual T_2 para todos los puntos de una línea. Por cada punto de la dirección x podemos emprender la marcha en direc-

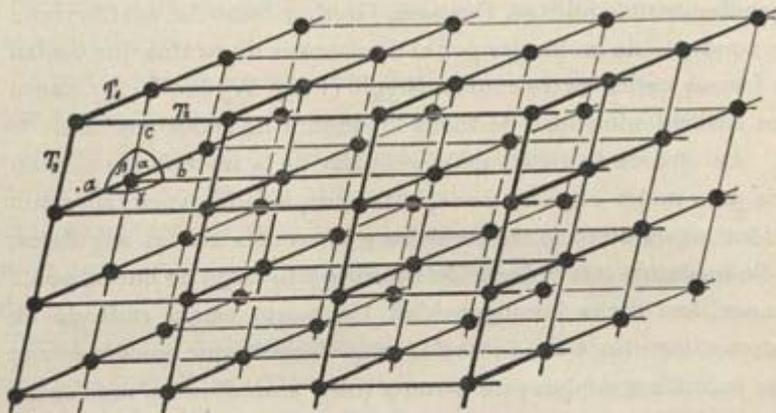


Fig. 1.—Retículo paralelepípedo cristalino.

ción paralela a y , y en todos los caminos paralelos encontraremos traslaciones idénticas $= T_2$. Dos direcciones diferentes partiendo de un punto determinan un plano, que quedará dividido en paralelogramos cuyos lados son los períodos de traslación de ambas direcciones. Fuera del plano, en otra nueva dirección, se repetirá el fenómeno con distinta magnitud para la traslación primitiva T_3 a lo largo de la línea z . Las tres traslaciones T_1, T_2, T_3 , determinan una red paralelepípeda, en la que cada malla tiene por lados los tres períodos de traslación y por vértices los puntos de distribución material idéntica. Si en vez de esas direcciones tomamos otras cualesquiera, formaremos una red distinta con diferentes períodos y ángulos entre sí. Ahora bien; de las infinitas

direcciones que parten de un punto, habrá tan sólo tres en que las traslaciones primitivas sean más cortas que todas las demás. El paralelepípedo que definen esos períodos como lados será el *paralelepípedo fundamental* o *célula cristalina* de la substancia, que se repite indefinidamente en la red.

En todas las direcciones de mínima separación de los átomos habrá un máximo de densidad de puntos; asimismo los planos determinados por dos direcciones densas estarán también más cargados de partículas materiales, y normalmente a ellos la separación entre dos inmediatos paralelos será mayor. De aquí que la cohesión sea mínima perpendicularmente a estos planos, y, como consecuencia, más fácil la separación; esos planos serán el asiento de las caras frecuentes del cristal y de las superficies de exfoliación, del mismo modo que las líneas de máxima carga, asiento de las aristas.

SISTEMAS, CLASES Y GRUPOS DE SIMETRÍA.—Considerando ahora la célula cristalina o paralelepípedo elemental, vemos que está determinado por las constantes reticulares, que son: los tres períodos primitivos, mínimos, a , b , c y los ángulos α , β y γ que forman entre sí (fig. 1). Siendo la célula cristalina malla de la red, imprime carácter a ésta.

Bravais dedujo, por la distribución de los puntos idénticos y los ángulos, 14 tipos de redes, que se reparten en los sistemas cristalinos de esta manera:

En el triclinico, un solo tipo, con paralelepípedo trioblícuángulo.

En el monoclinico, dos tipos, con prisma oblicuo de base romboidal y de base rectangular.

En el rómbico, cuatro: con prisma recto de base romboidal y con prisma recto de base rectangular, sencillos, y los mismos con un nudo reticular además en el centro (cuerpo elemental centrado).

En el tetragonal, dos: con prisma recto de base cuadrada, sencillo y centrado.

En el sistema romboédrico, un sólo tipo: el romboedro sencillo.

En el exagonal, con prisma exagonal de bases centradas, y que, por lo tanto, se puede considerar formado por seis prismas triangulares o por tres rómbicos.

En el regular, tres tipos: cubo sencillo, de caras centradas y de espacio centrado.

La repetición indefinida de estas mallas microscópicas en el conjunto da lugar al cristal; consecuencia de la dependencia entre la forma interna y los planos limitantes exteriores es la aparición de clases de simetría que se caracterizan por el número y naturaleza de sus elementos, los cuales pueden ser ejes, planos o centro de simetría, y a su vez, los ejes, binarios, ternarios, cuaternarios y senarios. Dicha simetría puede llamarse *externa o cristalográfica* porque se aprecia macroscópicamente.

Pero los grados de simetría se complican al pasar al interior del cuerpo elemental; la disposición de los leptones y su ordenación interna multiplica el número de tipos diferentes.

En efecto, si deslizamos un punto de un conjunto reticular en una dirección un trayecto igual a su traslación primitiva o a un múltiplo de ella, todos los puntos habrán cambiado de posición si ha de conservarse el principio de homogeneidad e igualdad de distancia entre sí, pero estarán superpuestos sobre otros idénticos; la red no se altera, parece como si no se hubiese movido. Mas limitémonos al interior del paralelepípedo y a traslaciones menores del valor de las constantes reticulares: puede haber un cierto número de puntos equivalentes y dispuestos de modo tal, que uno de ellos pase a ocupar las restantes posiciones mediante desplazamientos determinados, sin salirse del recinto de la célula.

Los referidos desplazamientos pueden ser lo mismo que en la simetría externa: por giro alrededor de un eje binario, ternario, cuaternario o senario; por cambio de posición con su simétrico respecto a un punto (centro de simetría) o plano (plano de simetría); pero además, la coincidencia puede establecerse por combi-

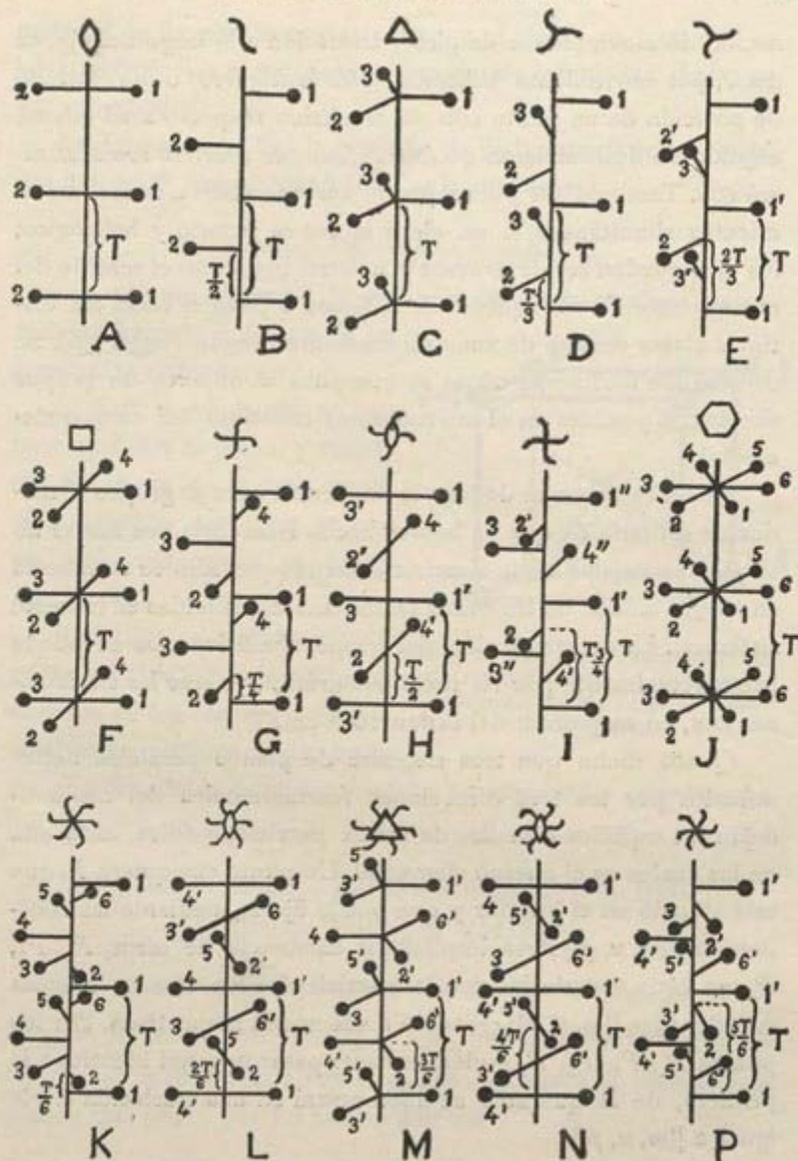


Fig. 2.—Diferentes clases de ejes de simetría (según Niggli): *A*, eje digiro; *B*, helicodigiro; *C*, trigiro; *D*, helicotrigiro dextrorso; *E*, helicotrigiro sinistrorso; *F*, tetragiro; *G*, helicotetragiro dextrorso; *H*, digiro helicotetragiro; *I*, helicotetragiro sinistrorso; *J*, exagiro; *K*, helicoexagiro dextrorso; *L*, digiro-helicoexagiro dextrorso; *M*, trigiro-helicoexagiro; *N*, digiro-helicoexagiro sinistrorso; *P*, helicoexagiro sinistrorso.

nación de movimientos de giro y traslación a lo largo del eje, es decir, por movimiento helicoidal (*ejes helicogiros*) o por cambio de posición de un punto con su simétrico respecto a un plano, seguido de deslizamiento de éste (*planos de simetría con deslizamiento*). También un punto puede ser sometido a varios movimientos simultáneos si un eje a la vez es binario y helicogiro; los ejes pueden ser dextrorsos y sinistrorsos según el sentido del movimiento. En el esquema de la figura 2 pueden verse las distintas clases de ejes de simetría elemental, según Niggli (36). Se comprende fácilmente cómo se complica el número de grupos simétricos posibles en el microcosmos cristalino del cuerpo elemental.

Análiticamente se deduce la existencia de 230 grupos o modos de simetría de que ya hemos hecho referencia, los cuales no se pueden delatar en la simetría externa (que sólo se manifiesta en los 32 modos de las *clases cristalinas* distribuidas en los siete sistemas). La determinación del grupo simétrico sólo se puede hacer actualmente por vía roentgenográfica, ya que las traslaciones son, en magnitud, del orden 10^{-8} cm.

Queda dicho que tres sistemas de planos paralelos determinados por las tres direcciones fundamentales del conjunto dejan los espacios o mallas de forma paralelepípedica, cada una de las cuales es el cuerpo elemental. Un punto cualquiera P , que esté situado en el interior y que pueda fijarse mediante las coordenadas $[[m, n, p]]$ lleva implícita la existencia de otros, P_2, P_3, P_4 , en cada uno de los demás paralelepípedos con las mismas coordenadas $[[m, n, p]]$ respecto a sus nudos respectivos. Por los puntos P_1, P_2, P_3, P_4 podemos hacer pasar una red idéntica a la primera, de la que sólo se diferenciará en una traslación triple igual a $[[m, n, p]]$.

Así, pues, por el espacio de un paralelepípedo pueden cruzar planos de distintas redes que irán recogiendo los diferentes puntos o leptones del interior. Un impulso vibratorio, como es la luz Roentgen, será modificado según la posición, número y carga

material de los planos que atravesase, y el efecto se traducirá en las interferencias luminosas por cambio de intensidad de las rayas espectrales.

La fórmula que liga la posición de un punto P de coordenadas $[[m, n, p]]$ con un plano (hkl) es la siguiente:

$$hm + kn + lp - r = \Delta;$$

r es un número entero; Δ , la distancia del punto al plano expresada en fracción ordinaria de las constantes reticulares.

Si $\Delta = 0$, el punto se encuentra sobre el plano, y entonces $hm + kn + lp = r$, condición necesaria para que un plano (hkl) contenga a un punto $P[[m, n, p]]$.

Ejemplo: supongamos un cristal rómbico con los átomos situados en los vértices del paralelepípedo elemental de base rectangular. Estos 8 puntos tendrán las siguientes coordenadas $[[m, n, p]]$:

$[[000]]$ en el origen, $[[010]]$, $[[100]]$, $[[001]]$, $[[110]]$,
 $[[101]]$, $[[011]]$ y $[[111]]$.

Si el paralelepípedo fuese de tipo centrado (fig. 3), habrá además un punto interior $[[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}]]$; por él y los análogos de las demás mallas puede pasar un nuevo sistema de planos. Los planos que pasen por los cuatro puntos

$[[000]]$, $[[001]]$, $[[110]]$ y $[[111]]$,

serán los de notación $(hkl) = (110)$, y contendrán también al punto central porque, $\frac{1}{2} \times 1 + \frac{1}{2} \times 1 = r = 1$; también pa-

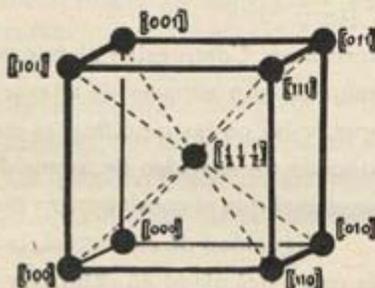


Fig. 3.—Célula cristalina rómbica de cuerpo centrado, con las coordenadas de sus vértices y punto medio.

sarán por él los planos (310), pues $\frac{3}{2} + \frac{1}{2} =$ un número entero. En cambio no le contendrá el (210), porque $\frac{2}{2} + \frac{1}{2}$ no es número entero. Por lo tanto, los espacios que separan entre sí los planos de notación (110) o los (310) no serán afectados por la existencia o ausencia de un átomo en el centro de la célula cristalina. No así los planos pinacoidales que pasan por los nudos de la red, ni los (210); entre cada dos de éstos estarán situados los puntos $P_{\left[\left[\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}\right]\right]}$ por los cuales puede pasar otro sistema de planos intercalares. Como estos planos poseerán una carga material determinada, son capaces de alterar un impulso vibrátil que les llegue, y las ondas modificadas en los dos sistemas de planos producirán un espectro de intensidad diferente (que podría llegar a anularse) que el suministrado por una red de mallas no centradas.

A igualdad de estructura, la intensidad es diferente según sea la carga del plano en calidad y cantidad. La carga se determina por la fórmula

$$L = \frac{q_1 E_1 + q_2 E_2 + q_3 E_3 \dots \text{etc.}}{\mathcal{F}_{(hkl)}}$$

en que q_n es el número de átomos de un elemento; E_n , el número atómico de la serie natural; $\mathcal{F}_{(hkl)}$, el área del paralelogramo elemental del plano (hkl).

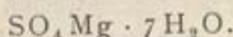
De aquí que, determinando las constantes reticulares por los procedimientos roentgenográficos que vamos a exponer, se pueda deducir el área $\mathcal{F}_{(hkl)}$ y la carga en distintas direcciones, y uniendo los resultados y las indicaciones que nos dan las variaciones de intensidad de los espectros Roentgen sobre las coordenadas de los átomos, sea posible fijar la arquitectura interna de los cristales, la *estereoquímica cristalina*, que es la conquista científica más preciada sobre la estructura.

II

MATERIAL

Epsomita.

MINERAL ELEGIDO PARA LA INVESTIGACIÓN: EPSOMITA.—La *Epsomita*, llamada también *Reichardtita*, *Sal de Epsom*, *Sal de la Higuera*, *Sal de Vaciamadrid*, *Sal amarga*, y por los alemanes *Bittersalz*, es el sulfato magnésico eptahidratado de la fórmula



Se presenta rara vez bien cristalizada en la naturaleza. Es muy soluble en el agua, variando rápidamente el coeficiente de solubilidad al cambiar la temperatura. Los cristales se forman y crecen con bastante velocidad, desigualmente según las direcciones, contribuyendo todo ello a que se presenten casi siempre deformados, fibrosos o aciculares¹. El alargamiento se realiza según el eje *c* (dirección de máximo crecimiento, que hemos determinado en este trabajo). El brillo de los cristales es frecuentemente sedoso, como en la epsomita de Calatayud, debido en parte a fenómenos de reflexión total en las innumerables burbujas que aprisionan los cristales al formarse, y en parte también, a que son eflorescentes. Sin embargo, si se recoge la epsomita en una cápsula y se calienta suavemente, parece que posee el carácter contrario, la delicuescencia, lo que se debe a que hay separación de algunas

¹ Antes de imprimirse este trabajo ha aparecido la interesante monografía de K. Mahl, «Zur Morphologie des Bittersalzes», *Neues Jahrbuch der Miner. Beil.* Bd. 59, Abt. A, págs. 273-296, 1929.

de las siete moléculas de agua, que entonces actúan de disolventes, uniéndose su acción a la del agua madre incluida con el rápido crecimiento de los cristales.

A causa del elevado grado de solubilidad, la epsomita se encuentra de preferencia en los terrenos secos o en yacimientos situados en terrenos impermeables. Es por esto típica de los terrenos salinos esteparios, donde se halla asociada o mezclada con la *Thenardita* ($\text{SO}_4 \text{Na}_2$), y con tal frecuencia, que es raro encontrar el sulfato magnésico puro. En nuestro mioceno continental son numerosos los yacimientos que se citan: Calatayud (cuevas La Arcilla y La Soledad), Hellín, Tembleque, laguna de Gallo-canta, etc.

La dificultad de obtener buenos roentgenogramas con cristales tan deformados, llenos de inclusiones, y muchas veces de impurezas, nos obligó a utilizar para el curso de esta investigación cristales obtenidos por concentración de disoluciones acuosas saturadas de sulfato magnésico químicamente puro, y después de obtener los resultados del análisis empleamos, para la comprobación, cristales naturales.

Cristaliza la epsomita en el sistema rómbico, clase rómbica biesfenoídica. Ordinariamente, los dos esfenoedros se desarrollan en la misma proporción y dan formas, al parecer, holosimétricas.

La relación áxica es:

$$a : b : c = 0,9901 : 1 : 0,5709,$$

que determinó Brooke (14). Como se ve, los ejes a y b son casi iguales, acusándose esta analogía en el aspecto tetragonal de los cristales; el ángulo $(110) \wedge (100)$ vale $45^\circ 17'$, y el $(110) \wedge (010)$, $44^\circ 43'$.

Aparecen bien desarrolladas las caras del prisma $m \{110\}$, del esfenoedro positivo $o \{111\}$ y del esfenoedro negativo $\omega \{1\bar{1}1\}$; menos desenvueltas, pero existiendo casi siempre, las del segundo pinacoide (braquipinacoide) $\delta \{010\}$ y con bastante frecuencia

el prisma de primer orden (macrodomo) $r \{101\}$; más rara vez aparece el prisma $\{120\}$ y caras vecinales $\{hko\}$ en la proximidad de $\{010\}$. La combinación de estas formas más frecuente, según lo que acabamos de indicar, está representada en la figura 4. Las dos figuras de la lámina I son fotografías de estos cristales, y la figura 1 de la lámina II dos grupos de ellos. A pesar del cuidado puesto en la cristalización, hemos obtenido los cristales mayores con algunas irregularidades de crecimiento; suelen presentar estrías en la dirección del eje c (véanse las citadas figuras).

Siguiendo las indicaciones de Hauer (15), añadimos después a la disolución de sulfato magnésico algunos centímetros cúbicos

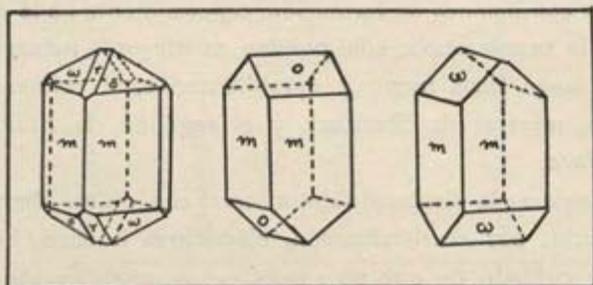


Fig. 4.—Formas comunes en los cristales de epsomita (de Groth).

de otra de bórax, y entonces aparecieron los cristales de epsomita con otro aspecto: predominio de las caras esenoédricas, sin coexistir, o con un desarrollo muy diferente, las de los dos hemiedros, y escaso desenvolvimiento de las caras prismáticas (fig. 2 de la lámina II). La figura 3 de dicha lámina es una fotografía de los cristales de este tipo. Como aparecen en los lauediagramas cual si fuesen centrosimétricos, no hemos tenido necesidad de utilizarlos en los ensayos, ya que habrían dado los mismos diagramas que los primeros.

El peso específico de la epsomita es 1,68. Su dureza, 2—2,5. Tiene fácil exfoliación según la cara $\{010\}$, obteniéndose por percusión superficies perfectas. El signo óptico es negativo; el plano de los ejes ópticos $\{001\}$; bisectriz aguda, el eje b , y el

índice de refracción es igual a 1,43. $2V = 49^\circ 45'$. $2E = 78^\circ 18'$ (16).

DIVERSAS CLASES DE SULFATO MAGNÉSICO.—Existen varios sulfatos de magnesio que difieren en sus caracteres por el número variable de moléculas de agua que encierra su composición química.

Las especies que se han determinado claramente (17) son las que se designan en el cuadro de la página siguiente.

OBTENCIÓN DE LOS CRISTALES DE SULFATO MAGNÉSICO UTILIZADOS EN ESTE TRABAJO.—Por el cuadro indicado puede verse que, dadas las condiciones de formación, especialmente en lo que respecta a la temperatura, sólo pueden existir en la naturaleza los sulfatos magnésicos mono y eptahidratados; el primero es la *Kieserita*, mineral de Stassfurt, y el segundo, la *Epsomita* o *Reichardtita*.

Al preparar la disolución del mineral con objeto de obtener nuevamente, por recristalización, ejemplares buenos, hubimos de tener cuidado de que no apareciese la modificación exahidratada ($\text{SO}_4 \text{Mg} \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$), consiguiendo cristales bastante perfectos después de muchos ensayos. Procuramos que la disolución del sulfato magnésico se hiciese lentamente en agua destilada tibia (a unos 20 grados centígrados), calentando poco a poco a medida que aquélla se concentraba, pero sin pasar de unos 40 grados. La cantidad de epsomita disuelta era la necesaria para saturar el agua a la temperatura ordinaria, con lo cual, al descender la de la disolución hasta esta última, habrían de precipitarse los cristales; pero observamos que si el enfriamiento no era excesivamente lento, todos los cristales que se formaban resultaban pequeños, aciculares y llenos de inclusiones. Tuvimos que repetir la disolución en condiciones de que, a la temperatura corriente, permaneciese un poco por bajo del punto de saturación, y dejar que se alcanzase ésta por la evaporación lenta, espontánea, del agua.

Sulfato magnésico anhidro.....	$SO_4 Mg$		Se obtiene a $200^{\circ}C$.; es estable a altas temperaturas. Al rojo blanco pasa a óxido.
— monohidratado..	$SO_4 Mg. H_2O$	Monoclínico.....	Constituye el mineral llamado <i>Kieserita</i> , de Stassfurt.
— bihidratado.....	$SO_4 Mg. 2 H_2O$	Rómbico.....	Muy inestable.
— tetrahidratado..	$SO_4 Mg. 4 H_2O$	Monoclínico.....	Se obtiene del siguiente a 77° ; es inestable a todas las temperaturas.
— penta hidratado..	$SO_4 Mg. 5 H_2O$	Triclínico.....	Se obtiene del exahidratado alrededor de $77,5^{\circ}$; también es inestable.
— exahidratado....	$SO_4 Mg. 6 H_2O$	Monoclínico.....	A 48° se encuentra el punto de transformación del epta en exahidratado. Este sólo cristaliza cuando la disolución se ha elevado a $60-70^{\circ}$. Solubilidad a $20^{\circ} = 43,87$ por 100.
— eptahidratado...	$SO_4 Mg. 7 H_2O$	Rómbico hemiédrico.	Estable entre 0° y $48,3^{\circ}$. Solubilidad a $20^{\circ} = 36,2$ por 100; a $40^{\circ} = 45,6$ por 100.
— dodecahidratado.	$SO_4 Mg. 12 H_2O$		Aparece en grandes cristales cuando la solución concentrada se enfría a $0^{\circ}C$.

Después de filtrar la solución, fué puesta dentro de un cristizador en un local algo húmedo, con objeto de evitar que la rápida evaporación superficial produjera centros de cristalización y aparición de costras en la superficie, las cuales entorpecen el buen desarrollo de los cristales cuando, creciendo, caen al fondo. La cámara en que colocamos la solución (sótanos del Instituto Mineralógico de Leipzig) reunía condiciones a propósito: su temperatura es casi constante, 16 grados centígrados, y comprendida dentro de los límites de estabilidad de la epsomita (0° a 48° C.); así no había peligro de que apareciesen las modificaciones exa- y dodecahidratada, ni tampoco que la oscilación térmica diaria perturbase el crecimiento de los cristales, tan sensibles a los cambios de temperatura porque el coeficiente de solubilidad crece rápidamente con ésta.

Al cabo de algunos días, comenzaron a depositarse en el fondo del cristizador magníficos cristales, libres de inclusiones, transparentes, que continuaron creciendo sin interrupción. Pero, más tarde, resultaron perfectos sólo aquéllos cuyo tamaño no pasaba de unos cinco milímetros de arista; los mayores, algunos de los cuales llegaban a tener hasta 12 centímetros de longitud y dos o tres de grueso, mostraban un desarrollo imperfecto, a pesar de todas las precauciones. Estos grandes cristales (lámina I) se volvían tabulares por el mayor desarrollo de la cara (110) o de la ($1\bar{1}0$), indistintamente, pero siempre siendo la cara más desarrollada la que descansaba sobre el fondo del recipiente. Este fenómeno parece ser debido a las corrientes de convección en el líquido. Los cristales eran hialinos sólo en el centro; a partir de un núcleo transparente interior, muy bien visible, la materia cristalina formaba zonas de crecimiento, y hacia los extremos del eje c , un enturbiamiento en forma de tronco de pirámide con la base menor hacia el centro invadía el cristal (véase la misma lámina, cristales mayores). Este fenómeno se debe a que la velocidad de crecimiento en la dirección del eje c es mucho mayor que en las demás, quedando encerradas inclusiones orienta-

das en ese sentido. En muchos casos, un prisma único se termina por varios esfenodros orientados paralelamente, fenómeno relacionado con la existencia de dichas inclusiones, y que nos explicamos perfectamente por este hecho: cuando se eleva la temperatura o se agregan unos centímetros cúbicos de agua destilada a la disolución, cesando de estar saturada, los cristales se corroen y aparecen los extremos del eje *c* como desflecados y terminados en agudos vértices; si entonces vuelve la saturación y el crecimiento de los mismos, no regresan primero a su lugar las moléculas separadas, sino que se yuxtaponen de preferencia sobre los vértices citados (dirección del eje *c*) y se originan otros tantos biesfenodros.

CONSERVACIÓN DE LOS CRISTALES.—Siendo tan grande la cantidad de agua que la epsomita encierra, la conservación de los cristales ofrece dificultades, pues no convienen ni las atmósferas secas ni las excesivamente húmedas. En una cámara cerrada, desecada con cloruro cálcico, por ejemplo, los cristales se eflorescen, como eflorescen cuando les da directamente el sol, que se vuelven opalinos. En atmósfera húmeda saturada de vapor de agua, los cristales se redisuelven en la superficie y reprecipitan en costras que alteran su limpidez.

La conservación se hace mejor dentro del agua madre, añadiendo destilada en la proporción que se produzca la evaporación, dejando el recipiente en completo reposo en un cuarto húmedo, a cubierto del polvo, y sacando los cristales que vayamos a utilizar a medida que los necesitemos. Respecto de los cristales muy buenos, ya estudiados o preparados, o aquéllos que se tema dejar en el agua madre por si se unen a otros o se deforman al crecer (cosa muy fácil), lo mejor es recubrirlos de una ligera capa de aceite puro de oliva, bastando para ello frotar con suavidad el cristal recién sacado del agua madre y rápidamente secado con papel de filtro, entre las yemas de los dedos impregnados de aceite. Este ha de ser puro, exento de ácido libre, porque en caso contrario se forma una emulsión que empaña superficial-

mente el cristal, siendo muy difícil recuperar la brillantez perdida (sólo tallándole o pulimentándole nuevamente). Tampoco se puede emplear resina alguna ni bálsamo del Canadá disuelto en xilol, por el enturbiamiento que se produce al contacto del agua.

Nos hemos extendido algo en esta descripción, por creer que puede ser de aplicación general a los minerales salinos solubles en el agua.

Aparatos.

TUBOS ROENTGEN.—Sabido es cómo se producen los rayos X: por la súbita parada de los electrones cuando, en su carrera desde el cátodo, encuentran un obstáculo que se opone a su paso. Si el tubo Roentgen encierra gases en notable proporción, es decir, si el aire interior no está muy enrarecido, los electrones tropiezan con dificultades para moverse, su velocidad será pequeña y escaso el poder de penetración: tendremos *radiación blanda*. Si el grado de enrarecimiento es grande, los electrones disponen de vía más expedita, caminan velozmente y el choque con el anticátodo será más intenso, las ondas resultantes más cortas, la *radiación, dura*, o sea más penetrante. Pero si el grado de enrarecimiento fuese excesivo, la pobreza de iones disminuye el grado de dureza nuevamente, y por eso en los modernos tubos, de vacío casi absoluto, hay que recurrir a otros medios que permitan obtener los electrones que faltan.

Regulando, pues, la cantidad de gas y el grado de enrarecimiento, podemos hacer variar el poder de penetración de los rayos. Aumentando el potencial eléctrico, también se logra el aumento de penetrabilidad.

En todos los tubos se produce en el anticátodo una gran elevación de temperatura debida a que la mayor parte de la energía de los rayos catódicos se convierte en calor, y otra pe-

queña parte en emisión de rayos X. Por esta razón, el anticátodo se suele disponer al extremo de un conducto por donde pueda circular una corriente de agua que lo enfríe.

Los primitivos tubos Roentgen, que se emplean con ventaja para ciertas aplicaciones, se denominan *tubos iónicos*; producen

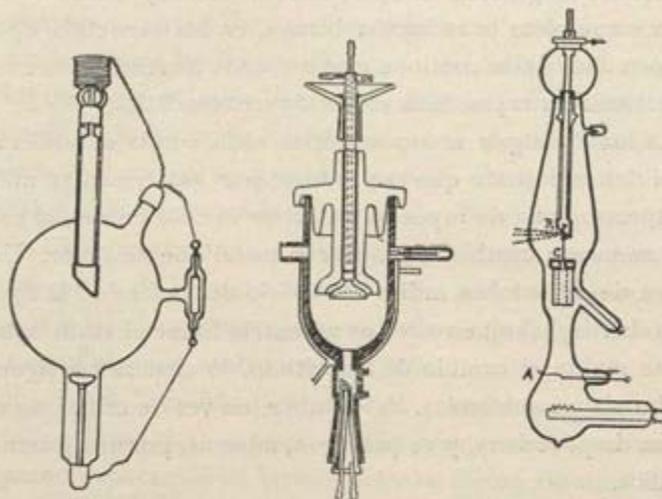


Fig. 5.—Modelos de tubos de rayos X. A la izquierda, tubo iónico antiguo; en el centro, tubo Hadding; a la derecha, tubo electrónico de tipo Lilienfeld. (De Siegbahn.)

ondas de longitud media, en estrecha relación con la proporción de gas encerrado en ellos: tubo Hadding o de Siegbahn, de porcelana y anticátodo cambiabile, o el tipo de Müller antiguo, de vidrio y anticátodo fijo, tan usado en radioterapia. Los tubos modernos, de vacío casi absoluto, apropiados para obtener longitudes de onda extremas, muy largas y muy cortas ($\lambda = 0,10 \text{ \AA}$ angstroms la más corta, que da el urano, y $\lambda = 12$ angstroms la más larga, del sodio), se denominan *tubos electrónicos*.

Un tipo corriente de tubo iónico el que aparece representado en la figura 5.

Queda mencionado que la clase de radiación varía por muchas

circunstancias: grado de enrarecimiento del tubo, potencial eléctrico, naturaleza del anticátodo, etc. Se llama *luz Roentgen blanca* (por analogía con la luz ordinaria), la que se produce por vibraciones compuestas de muchas clases de ondas, y *luz Roentgen monocromática o característica*, cuando consta de un corto número de longitudes de onda diferentes. Muy difícil de eliminar por completo la radiación blanca, en los espectros aparece siempre una banda continua más o menos marcada, sobre la que se destacan las rayas de la radiación característica.

La luz Roentgen monocromática varía con la naturaleza del metal del anticátodo que la produce; por eso tienen su utilidad en espectrografía de rayos X los tubos iónicos en que el anticátodo se puede cambiar y colocar el metal que se desee. Un esquema de estos tubos indica el modelo del centro de la figura 5 (tubo de Siegbahn); en ellos es necesario hacer el vacío cada vez que se realiza el cambio de anticátodo, lo cual se consigue con tres bombas combinadas. Estos tubos, en vez de cristal, se construyen de porcelana, y se protegen, además, por una guarnición metálica.

Pero en los estudios de precisión, se usan de preferencia los modernos *tubos electrónicos*, de los cuales los más empleados son los de Coolidge y de Lilienfeld. En el Instituto Mineralógico de Leipzig se trabaja mucho con estos últimos, que son los que hemos utilizado en este trabajo. Tanto en una como en otra clase de tubos electrónicos, el extraordinario grado de enrarecimiento del aire obliga a buscar un manantial de electrones. En efecto, en los tubos iónicos los electrones que parten del cátodo son debidos a la ionización del gas del tubo; iones positivos que al ser atraídos por el cátodo (polo negativo), chocan contra él y dejan electrones negativos en libertad, los cuales se lanzan en veloz carrera hacia el anticátodo, como ya dijimos. La pobreza de gas lleva consigo la de iones, y, por lo tanto, la disminución de electrones; el aumento de éstos en los tubos de vacío extraordinario se consigue por una lámpara incandescente situada en

el interior. En los tubos Coolidge la lámpara, muy pequeña, actúa de cátodo; en los Liliensfeld la lámpara es un cátodo auxiliar, *A* (fig. 5, modelo de la derecha), situado en la parte inferior del tubo; el verdadero cátodo, *C*, situado encima, hacia el medio del mismo, está perforado por un ancho agujero: tiene, por lo tanto, forma anular. Los electrones emitidos por el cátodo auxiliar *A*, convergen, en virtud de una corriente establecida entre los dos electrodos, hacia los bordes metálicos del anillo del cátodo *C*, donde chocan y dejan en libertad nuevos electrones: éstos son los que originarán los rayos X al detenerse en el anticátodo *R*; el encuentro se hace en un punto o foco, *F*. Se necesitan dos potenciales diferentes para la alimentación de estos tubos: un alto potencial entre el cátodo y el anticátodo, y otro para establecer la aceleración de la corriente electrónica que va del cátodo auxiliar o lámpara incandescente al verdadero cátodo; para este último bastan algunos centenares de voltios.

Los tubos Liliensfeld tienen varias ventajas para los estudios cristalográficos, que los hacen preferibles a los tubos Coolidge, de general aplicación en investigaciones físicas (Rinne). En primer lugar, en los tubos Liliensfeld se puede cambiar a voluntad la dureza de la radiación, que, como es sabido, los tubos Roentgen no conservan en general con el mismo grado constantemente. Estos se hacen más duros con el uso, porque disminuye, absorbida por el electrodo, la cantidad de gas; por el contrario, cuando se eleva mucho la temperatura, los rayos se hacen menos penetrantes, porque ceden gas los materiales del tubo a la atmósfera interna. Para conseguir la regulación del poder de penetración de los rayos X a voluntad, tienen que valerse los roentgenólogos de un hilo de paladio que atraviesa la pared del tubo y que, al calentar un extremo con un mechero Bunsen, absorbe hidrógeno de la llama y lo conduce al interior, o por medio de polvo de platino, que absorbe el gas sobrante si hay exceso. Nada de esto es necesario en los tubos Liliensfeld; basta variar la diferencia entre las tensiones de los dos circuitos antes

indicados: a mayor diferencia, mayor dureza. Si mantenemos los potenciales constantes, permanecerán invariables la dureza y la intensidad, y podremos prescindir de una vigilancia estrecha de los aparatos durante su funcionamiento, que alcanza varias horas en algunos trabajos.

Otra ventaja de los tubos Liliensfeld es su duración mayor que la de los Coolidge, porque en éstos quedan muy cerca los dos cátodos, y la fuerza atractiva ocasiona muchas veces la rotura del filamento incandescente auxiliar.

El anticátodo está construido de cobre. Solamente en el foco donde converge el movimiento electrónico (al que puede darse forma de punto o de línea ¹), lugar de partida de los rayos X, se halla recubierto por una laminita de molibdeno, tungsteno u otro metal difícilmente fusible, del que se desea obtener la radiación característica. Hasta el interior del anticátodo, que es hueco, llega la conducción de agua para enfriarlo durante su funcionamiento; dos tubos en el extremo sirven para dar entrada y salida a la corriente del líquido, que conviene establecer por una bomba centrífuga. El empleo directo del agua de la cañería es expuesto, por la posibilidad de cortarse la corriente y hasta por las variaciones de presión y velocidad.

CÁMARA DEL TUBO ROENTGEN Y ACCESORIOS.—Los tubos de Roentgen van encerrados en una cámara, que a la vez que protege al operador de los efectos dañinos que producen los rayos X si actúan largo rato, retiene y absorbe todos aquéllos que no van a ser utilizados en la experiencia. De no ser así, se difundirían por la sala de trabajo, velarían cuantas placas hubiese en su trayecto e inutilizarían las investigaciones.

En la instalación del Instituto Mineralógico de Leipzig, dicha caja aisladora es de madera parafinada, de forma prismática o paralelepípedica. Por dentro está recubierta en toda su extensión de una capa de goma de plomo de algunos milímetros de espe-

¹ El foco lineal produce fotogramas de mucho detalle empleando escaso tiempo de exposición y elevada carga en el tubo.

sor, y por fuera, reforzada hasta cierta altura por planchas de plomo de unos 3 milímetros.

La cámara aisladora va colocada sobre una mesa de trabajo, donde se instalan también los demás aparatos. Una de las paredes de la cámara es separable, para poder manipular en su interior. Dentro está el tubo Liliensfeld colocado verticalmente a la altura conveniente y el anticátodo en la posición precisa, mediante unas palanquitas que se manejan desde un lado de la mesa; en otra de las paredes de la cámara hay una ventana circular pequeña, cubierta con un grueso vidrio de plomo, que permite ver la posición del foco.

Con el fin de aprovechar lo mejor posible el cono de rayos Roentgen que emite la superficie del anticátodo, el Prof. Rinne coloca ésta completamente horizontal, y así, el cono, de mucha base y poca altura, tiene su eje vertical. De este modo se pueden utilizar los rayos en todas direcciones alrededor de la cámara, y disponiendo varios aparatos, obtener diversos fotografías y realizar diferentes experiencias al mismo tiempo, recogiendo fascículos de rayos X que salen de la cámara por colimadores colocados alrededor.

La cámara con el tubo Roentgen que se destina a experiencias de Bragg, lleva cuatro colimadores para otros tantos experimentos simultáneos; la destinada a obtener lauediagramas, tres.

Cerrada la cámara, no presenta más aberturas que las siguientes: las que dan paso a los colimadores mencionados, en las paredes laterales; las de entrada y salida de los tubos que llevan el agua al anticátodo y la de los conductores de la corriente. Para ver si los rayos caminan con regularidad por los colimadores, o se desvían (en cuyo caso es necesario desplazar un poco el tubo dentro de la cámara), o si hay rayos difusos por la sala, se emplean placas de materias fluorescentes a los rayos X.

En los tubos modernos se ha suprimido la forma de ampolla; se construyen cilíndricos y llevan un estuche protector

con orificios frente a las ventanas de Lindemann para la salida de los rayos. Esta disposición evita el uso de cámaras de protección.

Además de la cámara, forman parte integrante de la instalación los colimadores, de plomo, sujetos a un soporte metálico fijo, que a su vez se apoya en la mesa. El diámetro de dichos tubos viene a ser de 3 centímetros; un extremo se aplica a la cámara del tubo Roentgen; el otro se obtura por un opérculo-diafragma que ajusta mediante un anillo y que está construido con toda precisión para que su plano sea normal al eje del colimador. El orificio del diafragma es muy fino (medio milímetro), y está precisamente en el centro; su espesor es de 1,5 milímetros. Esto permite colocar el cristal, sin más determinación, sobre el diafragma, bien apoyando sobre él directamente la cara, bien por intermedio de un cubre-objetos, sujetando ambos con un mástic. Tan sólo hay que tener presente la orientación del cristal o placa cristalina, que puede hacerse en relación a una señal del diafragma, utilizando la configuración del contorno, las estrías de macla, de exfoliación, o cualquier detalle visible del cristal.

El aparato instalado para la obtención de fotogramas de cristal movable lleva colimadores más anchos, y en el diafragma una rendija graduable.

Por último, los chasis portadores de las placas fotográficas se adaptan a unos marcos en forma de U, desplazables a lo largo del riel sobre que van montados, para poder graduar a voluntad la distancia del cristal a la placa fotográfica.

Cuando la cara existente o tallada en el cristal no ha de ser expuesta normalmente al rayo incidente, sino formando un pequeño ángulo determinado, se usa con ventaja el aparato de Fedorof, que es sencillamente un disco fino de vidrio engastado en dos anillos que se mueven alrededor de tres ejes normales entre sí, y que colocado en el trayecto del rayo, se puede poner con cualquiera inclinación respecto a éste. Sobre el disco se

pega el cristal¹. Los dispositivos para las restantes experiencias serán descritos a continuación; que en todos los casos, puesto que el manantial de rayos X está fijo, hay que colocar convenientemente el cristal para que reciba los rayos en dirección determinada.

INSTRUMENTOS DESTINADOS A PREPARAR Y DISPONER LOS CRISTALES.—Para la obtención de roentgenogramas perfectos, necesitamos cristales de dimensiones y desarrollo apropiado, de caras ideales, limpias, sin inclusiones que perturben la regularidad del diagrama, a no ser que busquemos precisamente las variaciones que ocasionan en una estructura conocida la presencia de substancias extrañas. Los cristales no deben pasar del grueso de un milímetro en dirección normal a la cara de que deseamos obtener el diagrama, y es conveniente adoptar un espesor uniforme para todos los cristales en el análisis de un mismo material, porque se hacen comparables entre sí los resultados. La forma más conveniente es la tabular o de placas con el espesor antes mencionado, y como rara vez encontraremos un cristal cuyo desarrollo espontáneo sea el que deseamos, nos vemos precisados a hacer tallas.

Tendremos también que tallar el cristal cuando las caras no sean perfectas, cuando empleemos estructuras cristalino-granudas y cuando tratemos de operar sobre una cara no existente en el cristal, pero que forma con otras ángulos determinados.

En el estudio de la epsomita hemos tenido que tallar placas paralelas a la base y al primer pinacoide, que no se presentan en los cristales.

Es conveniente que la cara se talle en la dirección exacta que corresponda, lo cual sólo se consigue por aparatos especiales, entre los cuales están los de *Wülfing* (20), *Tutton* (21) y *Par-dillo* (22), y goniómetros combinados con instrumentos para cortar y pulir las secciones, como el de *Goldschmidt* (23).

¹ La inclinación u orientación de la cara se mide por la graduación del borde de los anillos.

Obtenidas las placas con el fin de someterlas a la acción de los rayos X, es necesario que su colocación y orientación respecto al haz incidente y a la placa fotográfica, así como las del eje de giro para los fotogramas de cristal movable, sean lo más exactas posible.

APARATO WÜLFING PARA TALLAR PLACAS CRISTALINAS EN DIRECCIONES DETERMINADAS.—Este aparato manual que hemos utilizado en nuestro estudio, y que cuando se tiene alguna práctica en su manejo da muy buenos resultados, es el que muestra la figura 2 de la lámina V.

Ideado por Wulding en 1901 y construido por la casa Stoe y Rheinheimer, de Heidelberg, consta de las siguientes partes:

1.º Un triángulo de acero (fig. 2 de la lám. V, al fondo izquierda), de 7.9 centímetros de lado, que se apoya por los extremos de dos tornillos grandes, T y T' , movibles y por la cabeza de un tercero, S , fijo, que aparece en la figura hacia delante. Corresponde la situación de los tres tornillos a los vértices de aquel triángulo, el cual queda así sostenido por una especie de trípode, en posición horizontal. En los puntos medios m , n , p , de los lados del triángulo, existe una disposición especial para recibir a su vez los extremos de otro trípode portador de un nivel, V . Este nivel va colocado sobre una pieza horizontal en ángulo, y sirve para establecer la horizontalidad de todo el aparato.

2.º La pieza angular de acero que acabamos de indicar, y que en la figura aparece al fondo y a la derecha. La sostienen un tornillo fijo, R , y dos iguales movibles, M y N , de paso de rosca construido con precisión, y con la cabeza y unas reglillas laterales, L y L' , graduadas (exámínesse la citada figura): es decir, dos tornillos micrométricos, que permiten llegar a una aproximación de $15''$ de error angular perceptible.

3.º Una pinza, P , para sujetar el aparato y llevarlo a un goniómetro de reflexión, a fin de comprobar el ángulo de la cara que se talla con las contiguas.

4.º Una serie de tornillos, S' , S'' , S''' , iguales al S , que

pueden sustituir a éste, y que difieren de él en la forma de la cabeza.

5.º Un sostén para todo el aparato, con objeto de fijarlo a un muro y poder establecer la nivelación.

El cristal que se va a tallar se coloca adherido por un mástic o laca a la cabeza de uno de los tornillos S , S' , S'' o S''' ; cabezas que son de forma poliédrica con distintas inclinaciones en las caras, formando ángulos de 5 en 5º con el plano normal al eje del tornillo, desde 0 a 90º (de aquí que sean necesarios varios tornillos para formar todas esas combinaciones angulares, porque cada uno lleva sólo un par de caras; por ejemplo: las combinaciones 10º y 80º, 20 y 70, 30 y 60, etc.).

En el capítulo siguiente indicaremos el modo de operar.

SOPORTES DEL CRISTAL.—Para colocar y orientar los cristales en posición conveniente al ser sometidos a los rayos X, empleamos distintos medios, según que se trate de obtener lauediagramas o fotogramas de giro. Para los primeros es conveniente que la cara natural, o tallada por medio del aparato Wülfig, quede completamente normal al rayo incidente y paralela a la placa fotográfica; para esto es necesario orientar el cristal, existiendo dispositivos destinados a este fin. El más sencillo es el que hemos descrito antes y empleamos en este trabajo: la colocación normal al rayo incidente pegando la superficie tallada del cristal a un diafragma de plomo cuyo plano es perpendicular al eje del colimador y lleva un fino orificio. Este diafragma se ajusta por medio de un anillo al extremo libre del citado colimador, por donde camina el haz de rayos al salir del tubo y cámara Roentgen. El ajuste de este diafragma-soporte del cristal se realiza de una vez para siempre, procurando, al construirlo, su perfección.

Pero, a veces, el material de que se dispone es muy pequeño, valioso, o un ejemplar único, que no conviene destruir ni modificar, y no pudiendo ser sometido a talla con ningún aparato, hay que disponerlo tal como esté, a la acción de los rayos X. En este caso la orientación se consigue con el soporte de Fedorof

(véase pág. 36), cuyo manejo es sencillo, aunque pesado, y como obliga a aumentar la distancia del cristal a la placa y al foco, la intensidad disminuye, por lo cual es preciso prolongar el tiempo de exposición.

Ocurre con alguna frecuencia, que la superficie tallada del cristal tiene un pequeño error de inclinación angular, lo que dificulta algo la interpretación de los diagramas; para compensar el error se utiliza el mencionado soporte de Fedorof, o bien el

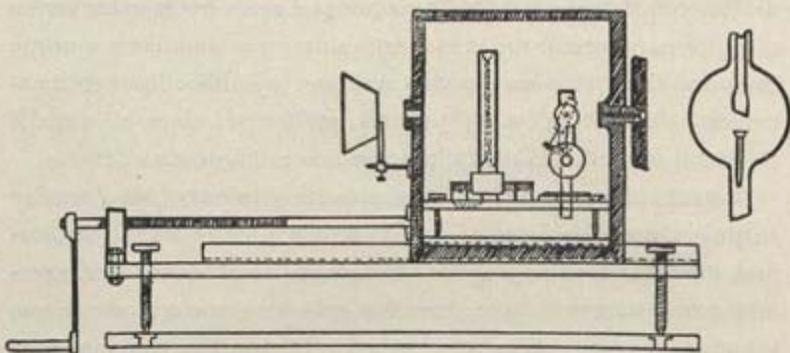


Fig. 6.—Dispositivo Lehmann para la obtención de lauediagramas.

(De Lehmann.)

aparato que ha ideado Lehmann (18), el cual permite utilizar secciones algo oblicuas. En el aparato de Lehmann (fig. 6), el soporte del cristal y el del chasis van montados sobre una barra de sección triangular, a lo largo de la cual pueden deslizarse y ser sujetos a la distancia que se desee. El soporte del cristal consiste en un disco que puede girar alrededor de un eje horizontal, cuyos extremos montan sobre un bastidor circular concéntrico, y a la vez, bastidor y disco, alrededor de un eje vertical. Así puede adoptar el disco-soporte del cristal todas las posiciones que se deseen.

Lateralmente, un péndulo que sigue los movimientos del disco portador del cristal, y que engrana por su parte inferior con una rueda dentada, permite conocer el ángulo de giro alrededor del eje horizontal; el movimiento alrededor del vertical se deter-

mina por un limbo graduado de la base del aparato. El soporte del cristal y el chasis fotográfico van encerrados en una caja que lleva dos orificios: uno anterior, para la entrada del haz de rayos Roentgen, y otro en la parte opuesta para su salida, con una pequeña pantalla fluorescente. Los dos orificios y uno central que lleva el disco portador del cristal están en línea recta.

Con este aparato no sólo podemos corregir los defectos cometidos al tallar la placa, inclinándola un ángulo igual al del error, en sentido contrario, sino que además, podemos obtener diagramas de alguna cara sin necesidad de tallarla, siempre que contigua a ella y formando un ángulo próximo a 180° haya otra bien desarrollada que nos sirva de base en la orientación del cristal.

Para los casos en que se tenga que operar a temperatura elevada, se rodea al cristal de un aparato termoeléctrico. Existen también dispositivos para operar a bajas temperaturas con el auxilio del anhídrido carbónico líquido; en la investigación realizada sobre la epsomita no hemos tenido necesidad de utilizar ninguno de ellos.

El chasis que encierra la placa fotográfica se coloca de modo que el plano de ésta quede normal al rayo incidente.

Para los fotogramas de cristal movable dos clases de soportes se emplean en la generalidad de los casos, según el procedimiento seguido. Cuando el giro es completo, se usan cámaras cilíndricas, en cuyo eje se dispone el cristal, tallado en forma de prisma de poca base y mucha altura, o de varilla cilíndrica, adicionando a la cámara un dispositivo para el movimiento continuo, muy lento y uniforme de aquél, necesario para que todos los planos reticulares del cristal vayan pasando por posiciones en que se cumpla la ley de Bragg. El fotograma se recoge en un film adaptado a la superficie interna de la cámara cilíndrica, la cual lleva, en dos generatrices opuestas del cilindro, orificios destinados a la entrada y salida del rayo primario, que ha de atravesar el cristal giratorio. Cuando el movimiento de éste se limita

a un corto número de grados (procedimiento de Schiebold-See-mann), lo que constituye el procedimiento llamado del cristal oscilante, el soporte está construido de modo que pueda darse al cristal un movimiento de vaivén. Puede emplearse la misma cámara del caso anterior, sin más que disponer un mecanismo limitador e inversor del sentido del giro. Pero con objeto de poder utilizar para estas experiencias las mismas placas talladas que se usan en los lauediagramas, Schiebold ha ideado el aparato

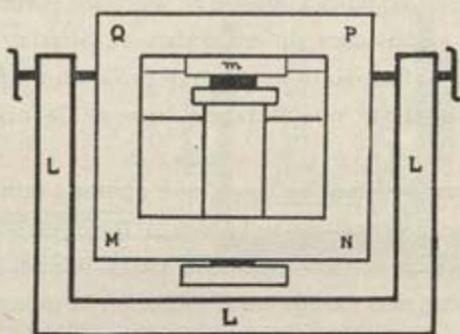


Fig. 7.—Soporte de los cristales en el método de Schiebold llamado «de la arista cortante» («Schneide»), para la obtención de fotogramas completos por movimiento de vaivén del cristal.

llamado «Schneide», que hemos utilizado, y que permite emplear aquéllas en lugar del film para la obtención de estos fotogramas, que se llaman completos porque, a diferencia con el método de Bragg, en ellos se recogen espectros o interferencias de más de una zona (espectros principales y adyacentes). El movimiento del cristal se efectúa alrededor de un eje horizontal, normal al rayo incidente. El soporte (fig. 7), consta de un marco metálico, *L*, en forma de U, que cerca de los extremos libres aloja los pivotes del eje de rotación. Otro segundo marco, *MNPQ*, cuadrangular, está unido al eje de rotación. El lado *MN* lleva en su parte media un tornillo cuyo extremo plano va cubierto de una lámina de plomo que constituye el porta-cristales. El lado opuesto *PQ* es portador de una lámina metálica, *m*, que avanza hacia

el tornillo, y en su borde libre lleva una arista de platino, la cual, con toda exactitud, coincide con el eje de giro y es paralela a la pequeña chapa del tornillo antes indicada, sobre la cual se coloca el cristal (señalado de negro en la figura); la distancia que los separa se puede aumentar o disminuir haciendo avanzar o retroceder al tornillo; la lámina *m* es fija.

El giro del bastidor móvil se hace por medio de una serie de ruedas dentadas (que engranan con otra fija al eje de rotación), movidas por un aparato de relojería en unos casos o un pequeño motor en otros. La combinación de ruedas dentadas permite graduar la velocidad del movimiento, ordinariamente muy lento. No es necesario que pase de 25° la amplitud del giro (como veremos más adelante); conviene que se realice varias veces en sentidos contrarios desde 0 a 25°, con el auxilio de un dispositivo inversor, que dispuesto convenientemente, hace el cambio cuando se alcanza el ángulo que fijemos.

Se consigue que el eje de giro sea perpendicular al haz incidente, de una vez para todas las manipulaciones sucesivas, con el auxilio de catetómetros; lo mismo decimos del chasis fotográfico. Este puede correr a lo largo de un carril con escala graduada para poder instalarlo a la distancia precisa del cristal.

El cristal objeto de estudio se pega con bálsamo de Canadá o con una laca, bien sobre la chapita de plomo del tornillo mencionado, o bien sobre un cubre-objetos de los usados para preparaciones microscópicas, que se adhiere con laca a aquélla.

MATERIAL FOTOGRAFICO.—Empleamos chasis contruídos con precisión, que permanecen herméticamente cerrados durante toda la exposición, de modo que no hay peligro de que se mueva la placa, y así podremos colocarla dentro con todo cuidado al cargar el chasis. Por fuera lleva pegado en la cara anterior una piececita de plomo de uno a dos milímetros de espesor, de forma circular en los chasis para lauediagramas y rectangular en los que utilizamos para los fotogramas de cristal oscilante. La piececita de plomo se encuentra en el punto en que penetra el

rayo primario; este rayo es de una intensidad extraordinaria en relación a los secundarios, es el rayo que atraviesa el cristal sin difractarse; si no fuera absorbido en parte, produciría una mancha muy intensa en la placa y una ancha aureola a su alrededor, que enmascara las impresiones de los rayos secundarios; la pequeña pieza de plomo se destina a absorber su exceso de energía.

Hemos utilizado placas Agfa especiales para rayos X (Roentgenplatte), de 9×12 cm., para los lauediagramas, y de 6×9 centímetros para los fotogramas de giro. Para el revelado utilizamos Rodinal Agfa, y baño ácido para el fijado.

Siendo necesario el hacer anotaciones sobre el envés de las placas, humedecemos la superficie del vidrio con una disolución de laca en xilol, después de revelada y fijada la fotografía; así, la tinta china no se corre.

En la obtención de lauediagramas, hemos empleado *hojas reforzadoras* de Gehler, que se colocan detrás de la placa y en contacto con ella. Estas hojas son de una composición análoga a la del mineral Scheelita (wolframato de calcio), y tienen la propiedad de fluorescer por los rayos X, dando color azul; por eso se emplean de preferencia a las de silicato de cinc, que fluorescen en verde, y por lo tanto, con menos intensidad luminosa. La presencia de una hoja reforzadora al lado de la placa fotográfica, aumenta, pues, la intensidad de las impresiones luminosas. Hay que colocar la cara sensible de la placa hacia atrás, para que esté en contacto con la hoja de Gehler. No debe emplearse la posición invertida, porque hay que evitar que los rayos X atraviesen la hoja antes de tocar la superficie sensible de la placa.

Para los fotogramas de cristal oscilante no empleamos hojas reforzadoras; colocamos la placa con la cara de gelatina hacia delante; evitamos así la absorción parcial de los rayos al atravesar la placa de vidrio.

Manantial eléctrico.

INSTALACIÓN DEL LABORATORIO DE ROENTGENOGRAFÍA DEL INSTITUTO MINERALÓGICO DE LEIPZIG.—El Instituto Mineralógico de Leipzig, donde hemos realizado la mayor parte del estudio que aquí describimos, posee uno de los mejores laboratorios roentgenográficos de Europa. Su director, el eminente profesor Rinne ¹, entusiasta por este género de investigaciones, ha montado en tres departamentos contiguos del edificio una instalación muy completa, que ha permitido una labor fructífera e intensa en los estudios cristalográficos según los nuevos métodos. Lo prueba el gran número de trabajos publicados en diferentes revistas, principalmente en la *Zeitschrift für Kristallographie* y en las *Berichte y Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften*, hechos bajo la dirección del mencionado profesor, patente muestra de la actividad desplegada. Muchos de ellos van citados en la bibliografía que se acompaña al final.

Una descripción del laboratorio hecha por su Director apareció en 1915 (19). Después se han introducido importantes mejoras y modificaciones hasta llegar a la disposición actual, que le coloca entre los de primer rango, acaso el primero de todos en los tiempos en que se fundó. La disposición de los aparatos fué hecha según las orientaciones del Dr. Liliensfeld, cuyos tubos de rayos X se han utilizado allí mucho. En la parte electrotécnica, las Casas Koch & Sterzel, de Dresde; Siemens-Reiniger-Weifa, de Berlín, y Seifert, de Hamburgo, han realizado las instalaciones.

Se han utilizado durante mucho tiempo casi exclusivamente, y también hoy para los fotogramas del método de Schiebold y lauediagramas, transformadores del tipo llamado *Transverter*

¹ Jubilado hace poco tiempo, por lo cual en la actualidad dirige el Instituto su sucesor, el petrógrafo Prof. K. H. Scheumann, siendo Jefe de la Sección de Cristalografía y Roentgenografía el Prof. Schiebold.

por el constructor Koch & Sterzel: son enderezadores de alta tensión con conmutadores giratorios. Un transformador rotatorio toma la corriente continua y la cambia en otra alterna de pequeño voltaje (unos 150 voltios), y a ésta después, otro transformador, en una de alto potencial nuevamente. El enderezador de alta tensión consiste en un torniquete o disco de *perlinax* (aislador formado por pasta de papel prensada) asentado en el mismo eje del transformador de alta tensión, y que gira con igual ritmo que la corriente alterna, pasando entre cuatro piezas metálicas fijas de forma de arco, a las que llega la corriente. El mencionado disco o el torniquete aislador lleva dos piezas metálicas en la periferia: se ponen en contacto periódico. Esta disposición permite que la corriente que alternativamente debería ir en sentidos opuestos, vaya a parar al tubo Roentgen marchando siempre en el mismo sentido, con intermitencias. El potencial se regula mediante resistencias en serie del cuadro o mesa correspondiente. Más tarde se han instalado en el laboratorio de Leipzig aparatos que enderezan la corriente mediante el empleo de válvulas o kenotrones, como el Spektral-Isovolt, de Seifert. Pero no los hemos aplicado en los procedimientos de estudio de la epsomita, sino únicamente el Transverter antes indicado. La corriente alternativa de éste se reparte en tres circuitos: uno, de muy baja tensión (unos 20 voltios), para alimentar el transformador que pone en actividad el electrodo incandescente del tubo Lilienfeld (véase la figura 5 y la descripción del tubo Lilienfeld en la página 33); otro para el transformador de la corriente de alta tensión entre el cátodo y el anticátodo, potencial que suele llegar a 140.000 voltios, y un tercer circuito, de 5.000 voltios como máximo, para conducir los electrones desde la lámpara del cátodo auxiliar al cátodo principal. Los tres circuitos se regulan por reóstatos.

Haciendo variar la diferencia entre la corriente de los dos últimos circuitos, se logra modificar la dureza de la radiación, a voluntad, que es una de las ventajas de los tubos Lilienfeld; aumen-

tando la corriente segunda o condensadora se hace blanda la radiación, y disminuyéndola, dura.

En uno de los departamentos del laboratorio roentgenográfico se hallan instalados los transformadores; departamento completamente aislado para la conveniente protección contra el peligro que tienen las altas tensiones y contra el ruido tan molesto que producen las numerosas chispas que saltan en el pequeño espacio de un milímetro existente entre los contactos fijos y móviles del disco de pertinax y el ozono, que originan además estas chispas. De allí parte la línea general de distribución que entra, al través de unos ventanales, en el departamento contiguo, donde están los aparatos y tubos de Roentgen.

TÉCNICA OPERATORIA

PREPARACIÓN DEL CRISTAL.—Si los cristales que vamos a estudiar tuviesen forma tabular paralelamente a la cara elegida y no pasase el espesor de un milímetro, podrían utilizarse directamente. Asimismo, si disponemos de abundante material, pueden ser elegidos, entre muchos, los cristales más apropiados. Pero ocurre con frecuencia que los cristales no reúnen esas condiciones, o disponemos de un corto número de ellos, y entonces es necesario tallarlos para obtener tantas placas como diagramas distintos necesitemos.

TALLADO DE LAS PLACAS.—Las caras más convenientes para obtener los roentgenogramas en que está la clave de la estructura son: los pinacoides, prisma y pirámides de símbolo sencillo, por pertenecer a zonas principales.

Cuando estas caras existen en el cristal, la talla es sumamente fácil, pudiéndose hacer a mano. Basta sujetar el cristal con unas pinzas o con un corcho, y desgastarle por el lado opuesto a la cara que vamos a utilizar, hasta dejarle reducido a un espesor próximo a un milímetro. El desgaste puede hacerse sobre una placa de vidrio deslustrado, por medio de esmeril de grano fino y unas gotas de agua, y si la substancia fuese muy blanda, frotando simplemente sobre la placa de vidrio; pero cuando el cristal es soluble, como en nuestro caso de la epsomita, en vez de agua empleamos aceite puro de oliva. Hay que limpiar después el cristal, procurando que no quede adherido ningún grano de

esmeril ni polvo del mineral, que obrarían sobre los rayos X produciendo alteraciones en el fotograma. Con esto ya lo tenemos en condiciones de ser expuesto a los rayos X. Como la talla la hemos hecho sin precaución de ningún género en su orientación, sino groseramente paralela a la cara existente, necesitaremos utilizar esta última para la orientación respecto al rayo incidente; el desgaste no ha tenido otro objeto, en este caso, que disminuir el espesor del cristal para reducirlo a placa.

Pero cuando la cara tiene escaso desarrollo o no existe natural en el cristal, y cuando va destinada a obtener fotogramas de cristal movable, es preciso recurrir al aparato Wulffing, cuya descripción hemos hecho en el capítulo precedente (pág. 38) o a otro análogo. El manejo está descrito en un trabajo de su autor (20). Su funcionamiento es manual y sencillo, aunque requiere algo de costumbre y habilidad, conseguida la cual, es ventajoso sobre el empleo de aparatos mecánicos de talla. A continuación hacemos una breve descripción del mismo.

Pueden ocurrir tres casos en la talla:

1.º La cara existe en el cristal muy poco desarrollada; es simplemente una faceta.

2.º La cara que deseamos tallar no existe en el cristal; pero sí otras dos que forman zona con ella y entre las que se halla comprendida.

3.º El caso anterior cuando la cara a tallar no está comprendida entre las otras dos ni forma zona con ellas.

Primer caso.—Se coloca el cristal pegado por la faceta sobre la superficie de la cabeza del tornillo *S* (descrito en la pág. 39, véase la figura 2 de la lám. V), que forma un ángulo de 90° con el eje del mismo. La sujeción se hace mediante algunas gotas de laca fundida, que al solidificarse por enfriamiento, mantiene adherido perfectamente el material al plano del tornillo. En el caso de la epsomita tuvimos dificultad al realizar esta operación porque el calor de la laca fundía la parte del cristal que se ponía en su contacto; por eso, después de varios tanteos, optamos por

emplear cristales grandes para que la perturbación se limitase a la periferia y dejase intacto el centro, que luego expondríamos al haz incidente de los rayos X.

Sujeto el cristal en su soporte al lugar correspondiente del triángulo de Wulffing, si apoyamos éste sobre un plano, descansará en él por tres puntos: los extremos de los tornillos T y T' y el cristal que acabamos de colocar. Es preciso que al descansar así el aparato quede horizontal, lo que conseguimos por medio del nivel adicional que se coloca encima; moviendo los tornillos T y T' , buscaremos la horizontalidad del triángulo, y una vez lograda empezaremos a tallar el cristal.

Esta operación se realiza como la talla de rocas para su examen al microscopio, sobre una placa de vidrio, con ayuda de esmeril y unas gotas de agua o aceite, según los casos, teniendo cuidado de no extenderlo, para que quede solamente en el sitio correspondiente al cristal; debajo de las puntas de los tornillos T y T' , se ponen dos gotas de aceite lubricante, para evitar que con el frotamiento se desgasten también en parte éstos. Al aparato se le imprimen suaves movimientos de vaivén para producir el desgaste del cristal; de este modo aparece una faceta que será paralela a la cara opuesta del cristal, que hemos pegado al tornillo S ; pero continuando el desgaste, y a medida que la faceta se agranda, el paralelismo desaparece: el aparato se inclinará del lado del cristal, como indica el esquema de la figura 8, y será preciso corregirlo moviendo los tornillos del triángulo, con el nivel encima, hasta volver a la horizontalidad; mejor dicho, pasando ligeramente de ella en sentido opuesto, para que, al desgastar nuevamente el cristal, permanezca al final de la operación con el paralelismo requerido. Cuando la cara es de suficientes dimensiones, se suspende la talla, volviendo a colocar el nivel para comprobar la horizontalidad.

Obtenida la cara, estamos en el caso mencionado al principio. La comprobación del paralelismo de la faceta natural y la cara tallada se aprecia transportando el aparato, sujeto por la

pinza *P* (lám. V, fig. 2), a un goniómetro y midiendo el ángulo que forma con las contiguas. Si la medida confirma la exactitud de la talla, se despega el cristal limpiándole de laca. Sujetámosle con unas pinzas o pequeño corcho y hacemos el desgaste a ojo por la parte opuesta hasta reducir el cristal a placa de un milímetro de espesor. No hay que olvidar la limpieza del cristal al

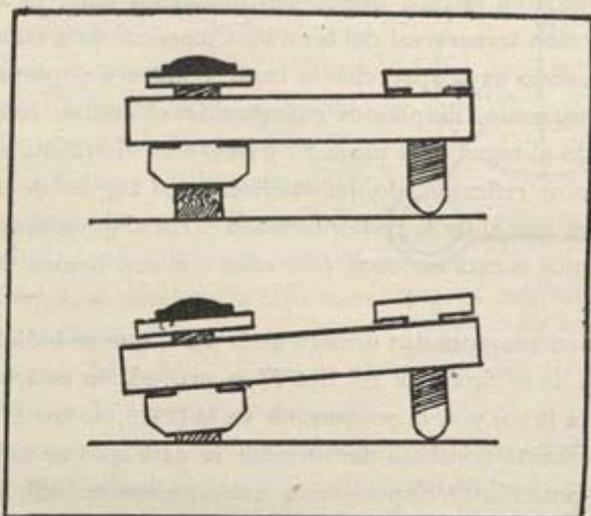


Fig. 8.—Inclinación que experimenta el aparato de Wülfing al tallar un cristal.

final de toda talla: los granitos de esmeril que pudiesen quedar adheridos perturbarían el diagrama que obtuviésemos.

Para los fotogramas de cristal oscilante, una vez tallada la cara en su posición verdadera, no se prosigue el desgaste a mano, sino despegando el cristal y volviéndole a pegar sobre la cabeza del tornillo por esta cara, para tallar su paralela.

Segundo caso.—La cara que vamos a tallar tiene que trincar la arista de otras dos existentes y está en zona con ellas. Es el caso que se nos presenta al tallar los pinacoides (100) y (001), puesto que sólo existe natural en la epsomita el pinacoide (010). Teniendo en cuenta la relación áxica (pág. 24), se deduce que

el pinacoide (100) forma con las caras (110) y ($\bar{1}\bar{1}0$) ángulos iguales entre sí, de $135^{\circ} 17'$; el suplemento de este ángulo es, por lo tanto, de $44^{\circ} 43'$. Pues bien, tomamos el tornillo *S*, que tiene el plano inclinado con la horizontal 45° (el más próximo a 44°), y pegamos sobre él una de las dos caras existentes en el cristal: la (110) ó la ($\bar{1}\bar{1}0$), procurando que la arista que va a ser truncada en la talla quede sensiblemente paralela al plano de la sección transversal del tornillo. Comenzamos a tallar como antes; cuando haya aparecido la cara, y antes de que adquiera algún desarrollo, limpiamos suavemente el cristal, colocamos, abrazando al tornillo, la pinza *P*, y llevamos el aparato a un goniómetro de reflexión, donde mediremos el ángulo de las caras existentes con el de la recién formada ¹. En el goniómetro comprobaremos si está en zona con ellas o si nos hemos desviado un poco.

Pueden aparecer dos errores en la talla, que se indican en el esquema de la figura 9: 1.º Sea *M* la proyección estereográfica de la cara (110) y *N* la proyección de la ($\bar{1}\bar{1}0$), sobre el círculo que representa la cabeza del tornillo: la cara que se talla ha de tener la posición *O*. Supongamos que aparece en *M'*: el error consistirá en que el ángulo con *M* es mayor de lo debido y menor el de *N*, pero está en zona con ambas caras. Moviendo por igual los tornillos cuya proyección en la figura aparece en *T* y *T'* (siempre con el nivel para comprobar la horizontalidad), lograremos llevar el punto *M'* a coincidir con *O*; Wulffing, en la descripción de su aparato (20), señala el desplazamiento necesario de los tornillos para los diferentes errores. Hecho esto, se prosigue la operación de la talla hasta obtener la cara que se desea.

Pero si la cara tallada apareciese en *N'*, el error es mayor, porque está fuera de la zona, y son precisas dos correcciones: una que lleve dicha cara a la zona *MON*, y otra al punto *O*.

¹ Este ángulo diferirá por lo menos en $17'$ con el que debe tener la cara (100) que buscamos, porque la cabeza del tornillo tiene una inclinación de 45° justos.

Esto se consigue moviendo desigualmente los tornillos T y T' , para que el aparato se incline del lado opuesto al error cometido. Al hacer la corrección, primero hay que disponer los tornillos micrométricos del nivel en la posición que indican, para cada caso, las tablas que acompañan a aquella descripción. El nivel pierde su horizontalidad en cuanto se mueven los tornillos que le sustentan, y para recuperarla cuando lo coloquemos sobre el triángulo de Wulffing, habrá que levantar éste en sentido contrario moviendo los tornillos T y T' , según indique el desplazamiento de la burbuja del nivel. Realizada la compensación de inclinación que corrige el error, se prosigue la talla nuevamente, y ahora la cara N' aparecerá en zona con M y N , y pasamos al caso primero de error, que sabemos

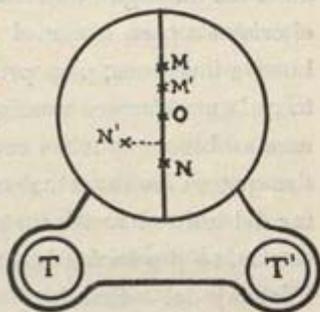


Fig. 9.—Indicación esquemática de los errores que pueden cometerse al tallar una placa.

(De Wulffing.)

cómo se corrige. En el trabajo que acompañó a las citadas tablas, Wulffing hace una descripción y análisis detenido de cada caso, y de los factores numéricos por quienes hay que multiplicar en las correcciones. De modo parecido se talla la cara cuando forma zona con otras dos, siendo exterior a ellas.

Tercer caso.—Cuando la cara que vamos a tallar sea exterior a las dos existentes sin formar con ellas zona, la operación es análoga, salvo que al fijar el cristal en el tornillo S , sobre el cual debemos pegar una de las caras naturales, se le hace girar para que las dos caras de referencia tomen una posición simétrica con el trípode, a ambos lados de la línea MN (fig. 9) siempre que la cara que se talla haya de formar ángulos iguales con las otras dos, o en caso contrario, que una de ellas venga a caer sobre la misma línea MN . Una proyección estereográfica esquemática y previa nos permitirá hacer esta orientación. Las tablas de Wulffing dan también las fórmulas para el caso.

La talla de los cristales de epsomita nos ofreció muchas dificultades que fueron obviadas después de varios tanteos, llegando al cabo a obtener buenas placas. El mineral es muy blando (2—2,5), circunstancia que dificulta obtener caras perfectas, brillantes y límpidas, tan necesarias para lograr buenas reflexiones de la luz en el goniómetro. El empleo de aceite para conservar el cristal o para hacer el pulimento, estorba la producción de buenas imágenes; para procurarlas hay que pulir en seco la faceta cada vez que sea preciso acudir al goniómetro. Sólo así llegamos a obtener muchas veces mejores reflejos en las facetas talladas que en las caras naturales, en las cuales, por no poder quitar del todo el aceite sin pulirlas, y por tener muchas de ellas estrías, se producían imágenes imperfectas de la hendidura de Websky del colimador.

Las medidas goniométricas hubimos de hacerlas en seguida de tallar el cristal, porque al cabo de poco tiempo la cara perdía su brillo a causa de la eflorescencia.

OBTENCIÓN DE LOS DIAGRAMAS.—En páginas anteriores hemos mencionado los métodos que se emplean para la investigación de la estructura de la materia: lauediagramas, diagramas de cristal movable, fotogramas de polvo cristalino. Todos ellos pueden distribuirse en dos grupos: uno que utiliza la radiación Roentgen policromática del espectro continuo, que guarda estrecha dependencia con el potencial empleado y que es producida por los electrones en su parada súbita al chocar con el anticátodo, por lo cual a esa radiación se la llama de *enfrenamiento*, y el otro grupo que utiliza la radiación monocromática constituida por un corto número de longitudes de onda diferentes, selectivas para cada clase de elemento, que depende del que forme el anticátodo. Según el nivel del átomo en que se originan estas vibraciones, así se denominan de la serie K, L, M. Para que se produzca efecto sensible en las interferencias cuando se aplican estas ondas a la investigación de las estructuras, de modo que queden registradas en el fotograma o en la cámara de ioniza-

ción que las recoge, es preciso que se cumpla la ley de Bragg, también enunciada anteriormente (pág. 10): $n\lambda = 2d \cdot \text{sen } \alpha$. En esta fórmula, el valor de d , o distancia entre dos planos reticulares paralelos, es constante para cada fascículo de ellos, de modo que el valor de λ resultará proporcional al ángulo α , y como λ en la radiación policromática varía de una manera continua, siempre habrá en el haz incidente una longitud de onda que satisfaga a la igualdad arriba indicada. De aquí que en fotogramas que utilizan esta radiación, los lauediagramas, se obtenga registrado un considerable número de planos reticulares. Si su interpretación ofrece alguna dificultad cuando se intenta llegar a los más pequeños detalles de estructura, se debe exclusivamente al hecho de que cada punto es producido por una longitud de onda diferente. Pero si empleamos luz Roentgen selectiva, al quedar reducida la vibración de mayor energía a dos ondas λ_α y λ_β para la serie K, que es la que comúnmente se emplea, el número de interferencias se restringe considerablemente: tanto, que para obtener un número suficiente en la interpretación de la estructura, es preciso mover el cristal, con lo cual los planos reticulares, de distancia siempre constante, van cambiando de posición con relación al rayo incidente. Así varía continuamente el ángulo α , produciéndose la interferencia al alcanzar el valor que se necesita para satisfacer aquella ley (procedimiento de Bragg o del cristal movable). Si el giro del cristal es completo, 360 grados, recogiendo la totalidad de las interferencias producidas en caras de varias zonas en un film cilíndrico que rodea al cristal, tendremos un *fotograma de Polanyi o de líneas estratificadas*, y si el giro es parcial, de vaivén u oscilatorio, obtendremos los *fotogramas Seemann-Schiebold*, o del *cristal oscilante*: la amplitud de este movimiento no suele pasar, de ordinario, de 25 ó 30 grados, que es suficiente en la mayoría de los casos. Para esta última clase de diagramas se utilizan placas talladas, como para los lauediagramas; para los fotogramas de líneas estratificadas lo ideal sería utilizar un filamento o fibra; si no se dispone de material

en esta forma, se talla un prismita o cilindro del menor diámetro posible. En nuestro caso pudimos utilizar finísimas agujas sedosas de epsomita de Calatayud.

Cuando se utilizan placas talladas, es conveniente fijarlas con algo de laca a un cubre-objetos de los que se emplean en histología, con lo cual se pueden marcar sobre éste señales que nos indiquen la orientación de la placa; y además, dado el escaso espesor de tales laminitas de vidrio, no hay inconveniente en transportarlas al soporte del cristal al obtener los lauediagramas, siempre que se coloque el vidrio mirando al rayo incidente, para que éste lo atraviese antes que al cristal. La disminución de energía por absorción es prácticamente inapreciable, sobre todo si se prolonga un poco más el tiempo de exposición. Dicho se está que el cristal sujeto al cubre-objetos permite la mejor adaptación de la cara tallada de aquél al soporte, en virtud de la superficie, también más amplia, de la lámina de vidrio.

Para detener la rápida eflorescencia de los cristales de epsomita, recubrimos las placas talladas, una vez obtenidas, mediante una ligerísima capa de aceite.

LAUEDIAGRAMAS.—Utilizamos tubos Liliensfeld con anticátodo de tungsteno; placas talladas en los cristales de epsomita según las caras (110), (010), (001), (100) y una placa inclinada 4° con relación a la (010), a fin de obtener un diagrama oblicuo, que es siempre conveniente. Añadiremos, además, los datos de: exposición, una hora; potencial, 80 kilovoltios, distancia de la placa fotográfica al cristal igual a 40 milímetros; placas Agfa-Röntgen y hojas reforzadoras. Las figuras 15, 16, 17, 18 y 19, de las páginas 78, 79, 80, 81 y 82, son esquemas en tamaño natural de los fotogramas. Los puntos van marcados con distintas dimensiones representativas del grado relativo de intensidad apreciada (los más gruesos corresponden a intensidad máxima y los más pequeños a intensidad apenas apreciable). Además, la figura 10 y en la lámina VI la I son negativas de los lauediagramas (010) y (110).

FOTOGRAMAS DE CRISTAL OSCILANTE.—Hemos obtenido espec-

trogramas de giro de los llamados de vaivén por el método de Schiebold, utilizando placas talladas en las direcciones que a continuación indicamos:

(110), eje de giro [001] y [120]; (010), eje [100]; (001), con eje [010] y [100]; (100), eje [010]; (210), eje [001].

Utilizamos tubos Liliensfeld con anticátodo de molibdeno, que producen las líneas $K_{\alpha_2} = 0,71196 \text{ \AA}$; $K_{\alpha_1} = 0,70759 \text{ \AA}$

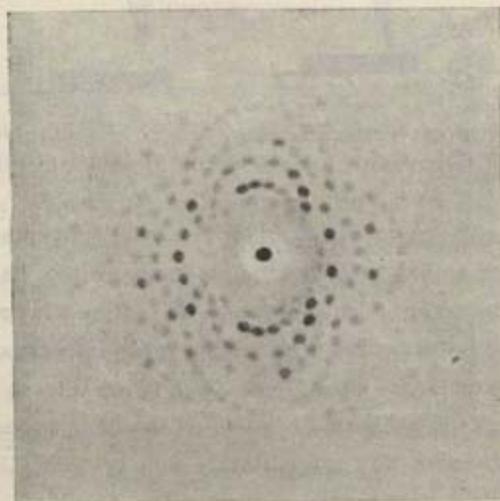


Fig. 10.—Lauediagrama de epsomita según la cara (110). Eje c vertical. El eje a se proyecta sobre el plano hacia la izquierda, y el b a la derecha. (Cliché negativo.)

(ambas confundidas en una sola aparentemente), y $K_{\beta} = 0,63065 \text{ \AA}$; potencial de 65 kilovoltios, exposición de dos a tres horas, y giro de la placa un ángulo de 23° . La distancia de la placa al cristal ha sido diferente en los distintos diagramas, por lo que mencionaremos para cada caso su valor (véanse los cuadros del final). En la posición inicial del giro, la cara tallada es paralela al rayo incidente, el cual llega tangente al cristal; al empezar el movimiento, incide aquél en la superficie cristalina y se refleja. Colocada la placa, con el cobre que la sostiene, en

la cabeza del tornillo descrito en la página 42, se mantiene paralela al eje del colimador, cuando el aparato de giro se encuentra en la posición 0° , pudiendo acercarse a la arista cortante de platino que hay enfrente, mediante el movimiento del men-

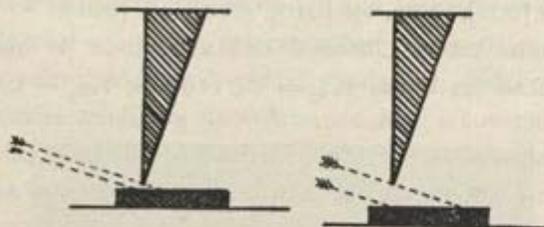


Fig. 11.—Diferente anchura del haz de rayos limitado por la arista de platino, según la aproximación de ésta al cristal.

cionado tornillo, hasta que la placa sea casi tangente a ella. El espacio entre ambas se dejará reducido al mínimo. Es muy conveniente la aproximación de la arista de platino a la cara del cristal, para que las rayas resulten mucho más destacadas y se eliminen defectos (véase el esquema de la figura 11, en el que se puede apreciar la anchura de la faja de incidencia que quedaría en el caso de estar muy separados).

IV

INTERPRETACIÓN DE LOS FOTOGRAMAS

Lauediagramas.

Los lauediagramas aparecen formados por un conjunto de puntos, cada uno de los cuales corresponde a la reflexión del haz incidente de rayos X en un plano reticular del cristal. Esa reflexión es, en realidad, un fenómeno de difracción; pero como el efecto producido es idéntico al de la reflexión de un movimiento vibratorio, en lo sucesivo hablaremos de reflexiones. La intensidad de los puntos no es la misma para todos: depende del poder reflector de los planos que los producen, y éste, a su vez, de la carga de cada uno de ellos. Por eso, la simetría del cristal se acusa en el diagrama siempre que hacemos que el haz incidente llegue en la dirección de uno de los elementos de simetría; por ejemplo: si el rayo cae según un eje cuaternario, los puntos del diagrama con idéntica disposición e intensidad, estarán repartidos cuatro veces alrededor del centro, y delatarán la simetría cuaternaria; si la dirección de incidencia es un eje binario, se acusará la simetría de este orden: he aquí por qué conviene siempre obtener los fotogramas de las direcciones pinacoidales, que son normales a elementos de simetría cuando éstos existen. En el caso de la epsomita observamos la simetría pseudotetragonal (fig. 15) sobre el fotograma según la cara (001), de acuerdo con la apariencia cuadrática que resulta de la escasa diferencia entre los ejes a y b .

Si examinamos detenidamente un lauediagrama, vemos que los puntos están alineados siguiendo rectas o curvas variadas;

esas alineaciones de puntos corresponden a las zonas cristalográficas de los planos reflectantes. Todos aquellos planos cuyo eje de zona es el rayo incidente, o sea la dirección normal a la placa cristalina, estarán coincidiendo en el centro del diagrama; los planos cuyos ejes de zona yacen en el plano normal al rayo incidente, aparecen en alineación rectilínea de puntos, y como alineaciones curvilíneas, los puntos pertenecientes a las demás zonas.

Si todos los planos posibles en el cristal produjesen un efecto de Laue perceptible, el número de puntos sería infinito; pero, según acabamos de indicar, sólo aquéllos que tengan una densidad reticular relativamente grande, darán señales apreciables. Es más, de éstos, únicamente quedan registrados en el fotograma, para las dimensiones ordinarias de las placas, los planos que forman con el rayo incidente un ángulo no mayor de 15° ni tampoco menor de 3° . La razón estriba en el mecanismo de la reflexión de la luz Roentgen por el cristal.

La reflexión se produce como indica el esquema de la figura 12, de la página 68. Siendo el ángulo de reflexión α igual por condición geométrica al de incidencia α' , el que forme la prolongación del rayo incidente (OT) con el rayo reflejado (OR), será 2α , y bisector de él el plano reflectante. La distancia a que se hallan los puntos del diagrama del centro de éste, será igual a $OT \operatorname{tg} 2\alpha$, y cuando α sea suficientemente grande, la reflexión saldrá fuera del campo de la placa fotográfica (unos 15° para las dimensiones corrientes de ésta y para la distancia de cuatro o cinco centímetros entre la placa fotográfica y el cristal); cuando α sea menor de tres grados, el punto cae muy cerca del centro, y queda obscurecido, si su intensidad no es muy fuerte, por la aureola que rodea a la impresión del rayo primario, a pesar de haber colocado en su trayecto la piecicita absorbente de plomo de que hablábamos en la página 43.

En un lauediagrama se aprecian al primer golpe de vista los planos más importantes del cristal, aquéllos que por su mayor

densidad material suelen ser el asiento de caras frecuentes, porque tendrán, generalmente, reflejos intensos. Dependiendo la intensidad del poder reflector del plano, ofrece grados numerosos, difíciles de determinar con exactitud, a no ser que se empleen los procedimientos fotométricos de precisión; pero de un modo empírico pueden distinguirse hasta cinco o seis grados bien marcados, que nosotros, tanto en los esquemas como en los cuadros que acompañan a esta descripción, designamos por los números I a 5, en orden decreciente de intensidad.

Todos los cristales se comportan en los lauediagramas cual si fuesen centro-simétricos, lo que se debe a que dos caras paralelas dan el mismo reflejo (como en la luz ordinaria). Así, pues, todos los cristales hemiédricos por falta de centro de simetría aparecen como holoédricos, y el número de clases de simetría que se delatan, en vez de 32, queda reducido a 11. Producen el mismo efecto las clases siguientes:

Clases de simetría cristalina.	Simetría de los lauediagramas.
Triclínicas pedial y pinacoidal	<i>Triclínica pinacoidal.</i>
Monoclínicas esfenoidal, domática y prismática	<i>Monoclínica prismática.</i>
Rómbica biesfenoidal, piramidal y bipiramidal	<i>Rómbica bipiramidal.</i>
Tetragonal piramidal, bipiramidal y biesfenoidal	<i>Tetragonal bipiramidal.</i>
Tetragonal trapezoédrica, ditetragonal piramidal, ditetragonal bipiramidal y tetragonal escalenoédrica	<i>Ditetragonal bipiramidal.</i>
Trigonal piramidal y trigonal romboédrica ..	<i>Trigonal romboédrica.</i>
Trigonal trapezoédrica, ditrigonal piramidal y ditrigonal escalenoédrica	<i>Ditrigonal escalenoédrica.</i>
Exagonal piramidal, bipiramidal y trigonal bipiramidal	<i>Exagonal bipiramidal.</i>
Exagonal trapezoédrica, diexagonal piramidal, diexagonal bipiramidal y ditrigonal bipiramidal	<i>Diexagonal bipiramidal.</i>
Regular pentagonododecaédrica tetraédrica y diaquisdodecaédrica	<i>Diaquisdodecaédrica.</i>
Regular pentagonoicositetraédrica, exaquistetraédrica y exaquisoctaédrica	<i>Exaquisoctaédrica.</i>

Los puntos del lauediagrama no son, en realidad, imágenes perfectas del orificio circular del colimador; lo serían si la placa fotográfica fuese normal en cada uno de sus puntos a los rayos reflejados, pero siendo la fotografía plana, las imágenes se deforman y resultan oblongas, con deformación tanto mayor cuanto más alejadas de la impresión del rayo primario. De aquí la utilidad de reducir cuanto se pueda el diámetro del haz de rayos para que los puntos sean lo más fino posible, sin traspasar los límites de la claridad. Para el cálculo nos referiremos siempre al centro de dichos puntos.

La utilidad de los lauediagramas para las investigaciones cristalográficas es extraordinaria; se pueden resolver muchos problemas que interesan al mineralogista, como investigaciones goniométricas cuando las caras faltan o están mal desarrolladas; determinación de la estructura por la ordenación de los numerosos planos reticulares que producen reflexiones; estudio de minerales de desarrollo imperfecto, bien laminar, como la mica, bien fibroso o acicular, como la millerita; operando en condiciones distintas de las normales (con elevación de temperatura, actuando en el vacío o en presencia de sustancias extrañas o de mezclas), se pueden apreciar las alteraciones debidas a los diversos agentes; también podemos sorprender las variaciones del estado físico o de agregación.

Ofrécense, sin embargo, dificultades en la interpretación de los diagramas de Laue, tales como el gran número de puntos que hay que calcular: en la cordierita y en el berilo, por ejemplo, llegan a mil; en la epsomita, que hemos estudiado, son alrededor de doscientos; el cálculo se hace largo y penoso. La intensidad es además muy variable, porque la placa fotográfica absorbe desigualmente las distintas radiaciones según la longitud de onda; la emulsión halógeno-argéntica también tiene distinto poder de absorción; las hojas reforzadoras de Gehler, según ha señalado Wagner, tampoco refuerzan proporcionalmente (24). Resulta difícil comparar entre sí la intensidad de las interferencias que originan

los puntos, porque dependen de varios factores, entre otros, aparte los señalados, el número total de átomos iluminados y el número de orden de la reflexión (valor n en la fórmula de Bragg).

Por estas razones, las investigaciones se hacen actualmente aplicando asociados el método de Laue y los de Bragg o Debye. Merece mencionarse el trabajo de Schiebold sobre la determinación de la estructura de la calcita (25), porque supone un gran esfuerzo y constancia al salvar todas las dificultades que se presentan en el análisis de las estructuras cuando se aplica solamente el método de Laue.

Ya queda dicho que el empleo exclusivo de este método en los cristales hemidrícos no prejuzga la clase de hemiedría, por causa del efecto centrosimétrico, a no ser en casos muy especiales y teniendo en cuenta algunos detalles de interferencia que complican extraordinariamente el análisis. Casi siempre hay que auxiliarse de los medios ópticos, mediante el microscopio polarizante, y de los químicos (figuras de corrosión) para establecer con seguridad la clase cristalina. Los métodos roentgenográficos parten del conocimiento de ésta para llegar a la estructura íntima de los cristales. El cálculo es más sencillo y seguro por los procedimientos del cristal giratorio o del polvo cristalino. Sin embargo, los lauediagramas son valiosos auxiliares de la investigación, porque sirven para orientarse al principio en la determinación de la estructura, que luego la aplicación de los otros métodos completa, y para comprobación de los resultados.

De aquí que hayamos empleado los lauediagramas bajo este aspecto de medio auxiliar, deduciendo consecuencias en su interpretación que vino a confirmar después el resultado del método de Schiebold, seguido en gran parte de este trabajo.

DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS DE UN LAUEDIAGRAMA.—El primer problema en la interpretación de un lauediagrama es hallar los índices de los planos reflectantes que han producido los puntos. Del examen de los planos hallados se deducen después las condiciones de la estructura.

La determinación de los índices puede hacerse gráficamente empleando los métodos de proyección cristalográfica; por vía calculatoria, aplicando las fórmulas generales de geometría analítica, o combinando ambos métodos.

Cuando el cristal pertenece a uno de los sistemas de mayor simetría, y la dirección de iluminación coincide con un eje, el primer procedimiento es muy ventajoso, porque simplifica mucho las operaciones. Tanto en uno como en otro procedimiento, la determinación de los índices se hace partiendo de las coordenadas de los puntos y de la relación áxica del cristal, de modo que lo primero que se necesita es hacer la lectura del fotograma, numerando los puntos y anotando en una lista, al lado de cada uno, las coordenadas correspondientes y la intensidad de la mancha; aquéllas referidas, claro está, a la traza sobre la placa fotográfica de los planos cristalográficos y de simetría, y dirección de los ejes. Es preciso, además, el conocimiento exacto de la distancia del cristal a la placa fotográfica. Esta distancia, R , es difícil de fijar con precisión; si la placa tallada fuese tan fina que sólo comprendiese un estrato cristalino, R sería constante; pero en un milímetro de espesor, donde caben tantos miles de mallas, la reflexión de la luz Roentgen se hace en varios estratos sucesivos, y habrá que tomar como valor medio de R el correspondiente a la mitad del espesor de la placa cristalina. Así, pues, mediremos la distancia entre la placa fotográfica y la superficie de contacto del cristal con el cubre-objetos que le sirve de soporte, y si llamamos D a esa distancia, la efectiva que hemos de tomar será: $D' = D - \frac{1}{2}d$, siendo d el espesor de la placa cristalina.

Como coordenadas se utilizan de preferencia las polares de cada uno de los puntos: coordenada $\Delta\rho$ (en la fig. 12, TR), que es la tangente del ángulo 2α ¹, y coordenada φ , que es el del azi-

¹ α = ángulo de reflexión.

mut en que aparece el punto. El centro del lauediagrama, T , se considera como origen de los valores $\Delta\rho$, y φ se toma a partir de una línea que represente la proyección en el fotograma de un elemento de simetría (un plano, por ejemplo), siguiendo el sentido contrario a las agujas de un reloj. Cuando los ejes cristalográficos son normales entre sí (sistemas rómbico, tetragonal, regular), y el rayo incidente sigue la dirección de uno de ellos, los otros se hallan proyectados sobre el diagrama y se cortan en ángulo recto. Por ejemplo: si la luz camina en la dirección del eje z , aparecerán x e y perpendiculares entre sí sobre el lauediagrama. En este caso pueden sustituirse las coordenadas polares por las rectangulares x' e y' del punto de referencia con aquellas dos líneas normales. Relación que guardan estas coordenadas x' e y' con las otras:

$$x' = \Delta\rho \cdot \text{sen}\varphi = R \cdot \text{tg } 2a \cdot \text{sen}\varphi \quad y' = \Delta\rho \cdot \text{cos}\varphi = R \cdot \text{tg } 2a \cdot \text{cos}\varphi$$

en donde se aprecia la comodidad de aplicar el sistema de coordenadas polares, más sencillo, que es el que hemos utilizado.

La lectura de las coordenadas de cada punto, una vez orientado el lauediagrama y determinadas las direcciones de simetría, comienza por la operación previa de señalar por el reverso de la placa fotográfica, con tinta china y una pluma muy fina, los centros de los puntos de interferencia, asignándoles un número que colocamos al lado. Es de procurar que esta numeración vaya ordenada siguiendo las zonas cristalográficas que se aprecian en el lauediagrama, marchando siempre en un mismo sentido; en los esquemas que acompañan a las figuras de los lauediagramas (figs. 15-18, págs. 78-81) están marcados los puntos de este modo.

La medida de las coordenadas puede realizarse directamente, por medio de una regla graduada para la distancia $\Delta\rho$, y de un ciclómetro, como el representado en la figura 21 (ciclómetro de Gross), para el ángulo φ ; pero es más útil el empleo de una pauta o transportador, que permite leer al mismo tiempo las dos coor-

denadas. Para este trabajo hemos empleado el transportador de Rinne-Schiebold, que consta de una serie de círculos concéntricos cruzados por radios equidistantes (lámina VI, fig. 2); los círculos concéntricos tienen para sus radios respectivos el valor $R \operatorname{tg} 2 \alpha$, siendo $R = 4$ cm. en un modelo y 5,4 cm. en otro, por ser estas las distancias más convenientes a que deben estar separados el cristal y la placa fotográfica. A cada círculo no se le anota el valor de $\operatorname{tg} 2 \alpha$, sino el de α , para comodidad del cálculo; α va creciendo desde el centro a la periferia, de medio en medio grado, empezando en 3 y terminando en 30. Las líneas radiales equidistan entre sí dos grados. Para mayor claridad, están reforzadas de diez en diez grados por trazo más grueso, como también las circunferencias cada cinco grados. La numeración de los radios, como en las proyecciones gnomónicas, va de 0 a 90° en los cuadrantes I y III, y de 90 a 0° en los II y IV, siguiendo el sentido contrario a las agujas de un reloj.

Si superponemos el lauediagrama sobre una diapositiva tomada del transportador con igual radio, haciendo coincidir los centros, podemos leer directamente por transparencia los ángulos α y φ de cada punto y anotar los valores correspondientes, teniendo en cuenta, para el azimut, el cuadrante en que se halla. La superposición hay que procurar hacerla coincidiendo los centros del transportador y del lauediagrama, el diámetro 0° de los azimutes con una de las direcciones de zonas principales, y las caras de la gelatina en contacto, para evitar los errores de paralaje en la medida. Con las lecturas construimos un cuadro para cada lauediagrama, distribuído en cinco columnas: 1.^a, número de orden de los puntos; 2.^a, ángulo φ ; 3.^a, ángulo α ; 4.^a, índices (que determinaremos después), y 5.^a, intensidad relativa de los puntos (véanse cuadros I al V, al final).

Partiendo de estos datos, podemos calcular los índices haciendo uso de las fórmulas correspondientes a cada sistema. Para la epsomita rige la expresión de la clase rómbica piramidal, que es, según Schiebold (25):

$$h : k : l = \left(\frac{uh_0}{\mathcal{F}_0} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \varphi} + \frac{u^2 h_0 l_0}{\mathcal{F}_0 E_0} \operatorname{tg} \varphi - \frac{u^2 k_0}{E_0} \right) : \left(\frac{uk_0}{\mathcal{F}_0} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \varphi} + \frac{u^2 k_0 l_0}{\mathcal{F}_0 E_0} \operatorname{tg} \varphi \frac{h_0}{E_0} \right) : \left(\frac{u_0 l_0}{\mathcal{F}_0} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \varphi} - \frac{E_0}{\mathcal{F}_0} \operatorname{tg} \varphi \right);$$

h_0, k_0, l_0 son los índices de la cara tallada; h, k, l , los índices del plano reflectante que tratamos de determinar; \mathcal{F}_0 y E_0 son símbolos que representan las expresiones siguientes:

$$\mathcal{F}_0 = \sqrt{h_0^2 v^2 + k_0^2 u^2 v^2 + l_0^2 u^2} \quad E_0 = \sqrt{\mathcal{F}_0^2 - u^2 l_0^2}$$

en las que $u = \frac{a}{b}$, $v = \frac{c}{b}$, siendo $a : b : c$ la relación áxica del cristal.

Como se ve, la fórmula es bastante complicada en el caso general, aunque se simplifica a medida que la simetría aumenta y si las direcciones de incidencia de los rayos X coinciden con los elementos de la misma. Así, para el cálculo de los puntos de interferencia de la placa (001) rige la fórmula

$$h : k : l = \left(\frac{u}{v} \cot \alpha \operatorname{sen} \varphi \right) : \left(\frac{1}{v} \cot \alpha \cos \varphi \right) : 1.$$

Mucho más práctico para el análisis es el utilizar el método gráfico mediante proyecciones gnomónicas en vez del cálculo precedente, teniendo en cuenta que entre la proyección gnomónica y la proyección por reflexión que constituye un lauediagrama, existe una relación muy sencilla. En la proyección gnomónica, las zonas aparecen en forma de rectas, así que las curvas en que se alinean los puntos de un lauediagrama, al hacer la transposición, pasan a ser también alineaciones rectilíneas, con lo cual se aprecian mejor las relaciones zonares y se pueden medir las

coordenadas rectangulares. Podría parecer que la transposición de una a otra clase de proyección representa una complicación más en la marcha del análisis, y, sin embargo, dada la sencilla relación que existe entre la colocación del polo de una cara en proyección gnomónica y la posición de la misma en un lauediagrama, el cambio se hace con mucha facilidad.

Sea GTR la traza del plano de proyección, normal al del dibujo (fig. 12); OT la dirección del rayo incidente sobre la cara

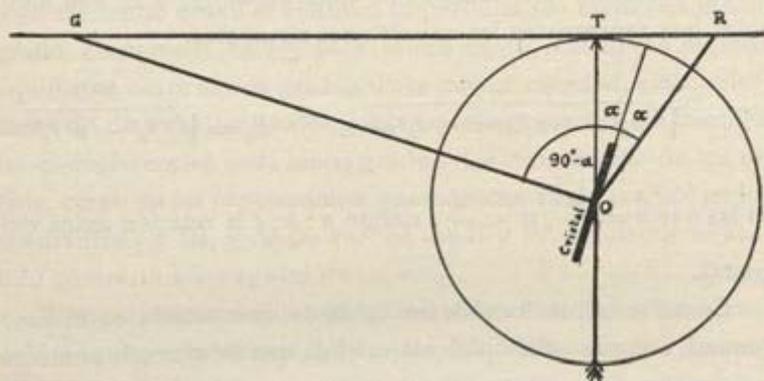


Fig. 12.—Relación que existe entre la posición de un punto de un lauediagrama y la del polo de la cara reflectante en proyección gnomónica.

(Según Rinne.)

del cristal, prolongada hasta el encuentro con GTR , y α el ángulo de reflexión. En el lauediagrama, R será el punto de contacto del rayo reflejado con la placa fotográfica, es decir, la representación de la cara en una proyección por reflexión; en proyección gnomónica, dicha cara irá a proyectarse en G (polo de la misma en el plano de proyección). Entre los segmentos TR y TG existen las siguientes relaciones:

$$TR = OT \operatorname{tg} 2 \alpha; \quad GT = OT \cdot \operatorname{tg} (90^\circ - \alpha) = OT \cdot \cot \alpha.$$

Para la transposición puede hacerse uso de las reglas de cálculo especiales construidas por Wyckoff o Schiebold, en que

para cada distancia TR se lee inmediatamente la TG , porque vienen a representar una transformación de radios recíprocos; a grandes valores de TR corresponden pequeños de TG , y viceversa: al punto cero corresponde otro en el infinito.

Pero mucho más ventajoso nos parece el procedimiento empleado por Rinne y Schiebold, que hemos seguido. Consiste en utilizar el método gráfico mediante un transportador gnomónico, que consta de una serie de círculos concéntricos (representantes en la proyección gnomónica de los círculos menores de una esfera de un centímetro de radio, paralelos al plano de proyección) atravesados por radios equidistantes, de grado en grado (lámina VII, fig. 1). Los círculos concéntricos están trazados a partir de 3° y terminando en 30° . El círculo más exterior tiene un radio de 19,08 centímetros, y el más interno, de 1,73; dichos radios M se han calculado por la fórmula

$$M = R \cot a,$$

valiendo R , como hemos dicho, 1 centímetro.

Entre los dos transportadores, uno de lectura del lauediagrama y el otro para proyección gnomónica, existe la relación recíproca antes mencionada, y por consiguiente, la numeración en grados de los círculos concéntricos va de dentro a fuera en la red para coordenadas y en sentido contrario en la red gnomónica. En virtud de esta disposición, no hay más que trasladar los puntos del lauediagrama a la nueva red con los mismos valores de coordenadas que allí hemos leído y anotado. El transportador de Schiebold nos sirve a modo de pauta, y el dibujo gnomónico lo hacemos sobre un papel transparente colocado sobre ella.

Las alineaciones rectilíneas de los puntos (polos) en proyección gnomónica aparecen paralelas si la placa del cristal se ha tallado normalmente a uno de los ejes de simetría; en caso contrario, o si pertenece al sistema triclinico o a una dirección no ortogonal del monoclinico, aparecerán las zonas como líneas rectas convergentes hacia un punto.

Trasladados los puntos del lauediagrama a la proyección gnomónica, la determinación de los índices de las caras de que ellos son polos requiere previamente la de las zonas principales en que aparecen alineados, y para hallar los índices de éstas, es preciso conocer los de un corto número de puntos de las zonas de los ejes cristalográficos $[001]$, $[100]$ y $[010]$, que constituyen el llamado triángulo fundamental. La determinación de dichos

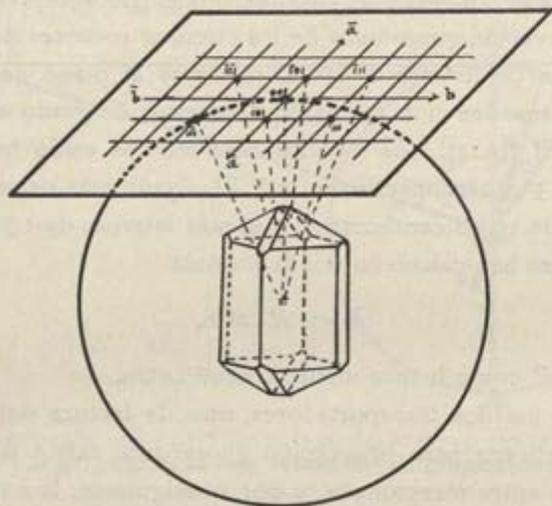


Fig. 13.—Proyección gnomónica de un cristal de epsomita sobre el plano (001) .

polos se puede hacer por cálculo o por aplicación de las propiedades del retículo recíproco, que más tarde explicaremos.

Como ejemplo, a continuación expondremos el procedimiento calculatorio seguido en el diagrama según la cara (001) , con ayuda de la figura 13, que, en esquema, señala la relación entre los elementos principales del cristal y la proyección gnomónica.

La cara (001) se proyectará en el centro O de la figura, porque su polo está en la intersección de los planos determinados por los ejes $c-b$ (plano transversal) y $c-a$ (plano cuya traza en el del dibujo es anteroposterior), que de antemano hemos orienta-

do convenientemente al instalar el cristal en el aparato soporte, para que en el lauediagrama tenga la referida dirección. Los polos de las caras (100) y ($\bar{1}00$), (010) y (0 $\bar{1}0$), que son paralelas al eje c , estarán en las direcciones oa y $o\bar{a}$, ob y $o\bar{b}$, respectivamente, pero en el infinito, donde también se encontrarán los polos de las caras (hko) siguiendo otras direcciones determinadas por rectas que pasan por O y yacen en el plano del dibujo.

Las caras (001) y (100) determinan una zona cuyo eje es el mismo b ; las intermedias (hol) serán tautozonales con ellas, y por lo tanto, sus polos irán en la recta $a\bar{a}$; las caras (001) y (010) determinan otra zona cuyo eje es a , y las intermedias (okl) estarán en la zona [100]; por consiguiente, sus polos se encuentran sobre la recta $b\bar{b}$. Lo que hay que buscar es a qué distancia del centro O se encuentra una cara (hol) o (okl) sobre las rectas respectivas.

Siendo la relación áxica de la epsomita

$$a : b : c = 0,9901 : 1 : 0,5709,$$

la cara (101) cortará a los ejes a y c (al b es paralela) a distancias determinadas por la igualdad $\frac{a}{c} = \operatorname{tg} \delta$ (véase la figura 14), de donde $a = c \operatorname{tg} \delta$, o también $a = c \cot \alpha$, puesto que los ángulos α y δ son complementarios.

Bastará, en virtud de la construcción del transportador, calcular α o δ y marcar el punto en el lugar correspondiente, teniendo en cuenta que los ángulos crecen de la periferia al centro y es más cómodo emplear el ángulo δ .

Para el cálculo de éste en las caras (hol) se aplica la fórmula general $\frac{la}{hc} = \operatorname{tg} \delta$ a las caras presuntas en el fotograma; es decir, aquéllas que formen un pequeño ángulo con el rayo incidente [normal a la cara (001)]; en el caso que tratamos serán las que cortan al eje c a larga distancia del origen, o lo que es lo mismo,

con $h > l$. Se calcula el valor de aquella expresión para un ángulo de 30° como límite máximo, puesto que las caras que lo formen mayor seguramente no estarán representadas en los lauediagramas de dimensiones corrientes: esa cara resulta ser la (301).

Se forma la serie de caras tautozonales siguiendo la ley de complicación, de las comprendidas entre la (301) y la (100), tales

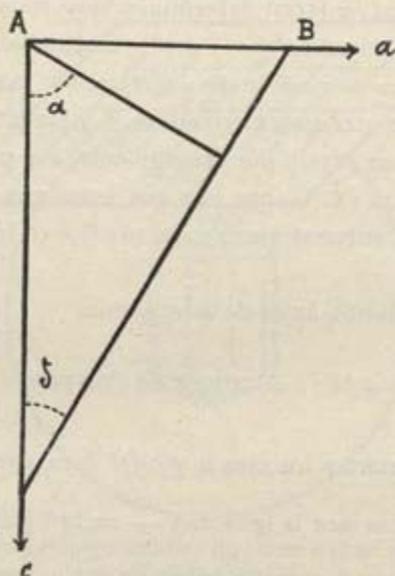


Fig. 14.—Ángulo de una cara ($h0l$) con la (001) (véase fig. 12).

como la (901), (801), (701), (601), (501), (902), (401) y (702). Los ángulos que nos da el cálculo son:

$$\begin{aligned} (100):(901) &= 10^\circ 55' & (100):(601) &= 16^\circ 7' & (100):(401) &= 23^\circ 26' \\ (100):(801) &= 12^\circ 14' & (100):(501) &= 19^\circ 8' & (100):(702) &= 26^\circ 21' \\ (100):(701) &= 13^\circ 55' & (100):(902) &= 21^\circ 5' & (100):(301) &= 30^\circ 2'. \end{aligned}$$

No todos los puntos calculados coinciden con los del lauediagrama, lo cual es debido a que algunos de los planos cuyo

ángulo acabamos de determinar, no producen reflexión alguna. Coinciden con los puntos de interferencia del lauediagrama, por ejemplo: el señalado con el número 49 (véase la figura 15) y el correspondiente al plano (701); el 48, con (801); el 50, con (601). El por qué no han producido reflejos caras de gran densidad como la (101), claramente se comprende examinando la figura 14: para aquélla, el ángulo δ es de $60^{\circ}2'$, y está muy alejada de la impresión del rayo primario, cayendo fuera del llamado *campo de índices*, que es un diagrama que nos muestra el conjunto de puntos posibles en el lauediagrama, limitando su área tres líneas que representan el ángulo α máximo observado, el valor de λ mínimo y el área máxima de malla plana. Para que apareciera la cara (101) sería necesario variar la posición del cristal, con lo que el ángulo α de la reflexión disminuiría.

De modo parecido determinaremos las caras de la zona $[okl]$ aplicando la fórmula:

$$\operatorname{tg} \delta_{okl} = \frac{lb}{kc}, \text{ y como } b = 1, \text{ resulta } \operatorname{tg} \delta_{okl} = \frac{l}{kc}.$$

Así hallaremos la posición de las caras que tienen $k > l$, tales como las siguientes, en las que van dados los ángulos de normales con (001):

$$\begin{array}{ll} (001) : (0.10.1) = 9^{\circ}56' & (001) : (051) = 19^{\circ}18' \\ (001) : (091) = 11^{\circ}1' & (001) : (092) = 21^{\circ}16' \\ (001) : (081) = 12^{\circ}21' & (001) : (041) = 23^{\circ}39' \\ (001) : (071) = 14^{\circ}3' & (001) : (072) = 26^{\circ}35' \\ (001) : (061) = 16^{\circ}17' & (001) : (031) = 30^{\circ}17' \end{array}$$

Veríamos que coinciden las caras (071) con el punto 57; la (081), con el punto 56; la (091), con el 55, etc.

RETÍCULO RECÍPROCO.—El retículo recíproco es un valioso medio auxiliar en la interpretación de los roentgenogramas, sobre

todo cuando se emplea el método gráfico. Desde los primeros tiempos de la Cristalografía se recurrió en el cálculo a considerar las normales a los planos diametrales, es decir, los ejes polares, porque si bien es sencilla la representación de las filas reticulares como líneas de unión del centro con los nudos del conjunto, expresados por sus tres coordenadas que son múltiplos de los valores paramétricos, en cambio no es posible una representación vectorial para los planos utilizando las filas como sus intersecciones. Pero si empleamos las normales a éstos, considerándolas como filas reticulares de un nuevo conjunto paralelepédico cuyos parámetros estén dados por la distancia que separa a los planos, entonces la relación de reciprocidad entre los dos retículos permite resolver vectorialmente los problemas matemáticos de la estructura.

Modernamente, Johnsen (27) y Ewald (42) han difundido la aplicación del retículo recíproco en las investigaciones cristalográficas de las estructuras. Sus principales propiedades de aplicación en el cálculo son (Schiebold): 1.^a Todo vector hacia un punto P_{hkl} del retículo recíproco es normal al plano correspondiente (hkl) del retículo normal. 2.^a El valor de este vector OP , desde el origen hasta el encuentro del primer punto en esa dirección, es el inverso de la distancia d de los planos reticulares normales a él. 3.^a Las coordenadas de un punto en el retículo recíproco son proporcionales a los índices del plano correspondiente.

Siendo a_0, b_0, c_0 las aristas del paralelepípedo fundamental, α, β, γ los ángulos planos del triedro correspondiente y ABC los rectilíneos de los tres diedros de éste (constantes cristalográficas), V_0 el volumen o producto del área de una malla I_{hkl} por la distancia d_{hkl} que la separa de su inmediata paralela; siendo, por otra parte, a'_0, b'_0, c'_0 las aristas; α', β', γ' los ángulos planos, y $A'B'C'$ los rectilíneos de los diedros de la célula cristalina en el retículo recíproco, tenemos las siguientes igualdades que muestran la relación de reciprocidad entre las dos clases de retículos:

$$\begin{aligned} a' &= A & a &= A' & V_0 &= a_0 b_0 c_0 \operatorname{sen} \Delta \\ \beta' &= B & \beta &= B' & V'_0 &= a'_0 b'_0 c'_0 \operatorname{sen} \Delta' \\ \gamma' &= C & \gamma &= C' & V_0 \cdot V'_0 &= 1 \end{aligned}$$

$$d_{hkl} = \frac{V_0}{I_{hkl}}$$

$$\operatorname{sen} \Delta = 2 \sqrt{\operatorname{sen} p \operatorname{sen} (p - \alpha) \operatorname{sen} (p - \beta) \operatorname{sen} (p - \gamma)}$$

$$p = \frac{\alpha + \beta + \gamma}{2}$$

$$\operatorname{sen} \Delta' = 2 \sqrt{-\cos \sigma \cos (\sigma - A) \cos (\sigma - B) \cos (\sigma - C)}$$

$$\sigma = \frac{A + B + C}{2}$$

$$a'_0 = \frac{1}{d_{100}} = \frac{b_0 c_0 \operatorname{sen} \alpha}{V_0} = \frac{1}{a} \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{sen} \Delta} \quad a_0 = \frac{1}{a'_0} \frac{\operatorname{sen} \alpha'}{\operatorname{sen} \Delta'}$$

$$b'_0 = \frac{1}{d_{010}} = \frac{a_0 c_0 \operatorname{sen} \beta}{V_0} = \frac{1}{b} \frac{\operatorname{sen} \beta}{\operatorname{sen} \Delta} \quad b_0 = \frac{1}{b'_0} \frac{\operatorname{sen} \beta'}{\operatorname{sen} \Delta'}$$

$$c'_0 = \frac{1}{d_{001}} = \frac{a_0 b_0 \operatorname{sen} \gamma}{V_0} = \frac{1}{c} \frac{\operatorname{sen} \gamma}{\operatorname{sen} \Delta} \quad c_0 = \frac{1}{c'_0} \frac{\operatorname{sen} \gamma'}{\operatorname{sen} \Delta'}$$

Si basándonos en estas relaciones construimos un retículo recíproco de otro normal, los nudos de aquél representarán los planos de éste, y los vectores que les unen con el origen, sus normales; luego cortando estas rectas por una superficie que tenga la posición y distancia al origen como del plano de una proyección gnomónica al centro de la esfera, las intersecciones serán precisamente los polos de aquellos planos en este modo de representación. Superponiendo la gráfica obtenida con la proyección gnomónica del lauediagrama, se leen directamente los índices de los planos y se van anotando en los puntos coincidentes los símbolos correspondientes. La figura 22 (pág. 101) representa los retículos paralelogramáticos del recíproco de la epsomita para las caras (100), (010), (001) y (120), construido con las dimensiones

$$a' = \frac{1}{a} = \frac{1}{0,99} \quad b' = \frac{1}{b} = 1 \quad c' = \frac{1}{c} = \frac{1}{0,57},$$

puesto que siendo los ángulos α , β y γ en la epsomita rectos, se simplifican las expresiones.

Todos estos puntos calculados, estén o no representados por las interferencias del lauediagrama, nos servirán a modo de jalones para ir determinando en la proyección gnomónica los demás, con sólo aplicar la ley de las zonas. En efecto, cada cara (hol) forma la zona [uow] con la (010), y toda cara (okl) forma con la (100) la zona [ovw]. Los polos de las caras de la zona [uow] estarán en una línea que pasando por el de la cara (hol), irá a parar al polo de la (010), y como éste se halla en el ejemplo que describimos, en el infinito, dicha recta será paralela al eje b ; luego trazando con una regla, paralelas a este eje por los polos de todas las caras calculadas (901), (801), (701), (501)... etc., tendremos las zonas correspondientes. Del mismo modo los polos de las caras de la zona [ovw] estarán en rectas que pasan por (okl) y por (100), y como este último está en el infinito, dichas rectas son paralelas al eje a .

En virtud de las leyes de las zonas, se pueden determinar los índices [uvw] de cualquiera de ellas en cuanto conozcamos los índices (hkl) y ($h'k'l'$) de dos caras pertenecientes a una misma zona; del mismo modo que conociendo los índices [uvw] y [$u'v'w'$] de dos zonas distintas se puede determinar los de una cara (hkl) que se encuentra a la vez en las dos. Esta ley recíproca se formula por las expresiones

$$[1] \quad h : k : l = vw' - wv' : wu' - w'u : uv' - u'v$$

$$[2] \quad u : v : w = kl' - lk' : lh' - hl' : hk' - kh'$$

Trazando, pues, todas las rectas (zonas) indicadas, queda dividido el plano de proyección en rectángulos cuyas intersecciones son polos de cara en proyección gnomónica.

Cuando la placa cristalina tiene un error de talla, aunque sólo sea de pocos minutos, las líneas dejan de ser paralelas para hacerse convergentes; los rectángulos se convierten en trapecios.

La oblicuidad del lauediagrama en esos grados o minutos se aprecia porque las alineaciones de los puntos marcan la divergencia de las líneas que debieran ser paralelas (ejemplo, el lauediagrama de la figura 19). Por ellos trazamos la línea cuya dirección nos permite calcular el punto de convergencia y calcular el error de la orientación del cristal.

Hay muchos puntos del lauediagrama, la mayoría, que se encuentran en la intersección de estas líneas zonares. Como conocemos los símbolos de zona correspondientes, aplicando la expresión [1] de la página anterior se determinan sus índices.

Todas las caras que correspondan a los puntos de intersección de las zonas señaladas en el dibujo podrán ser determinadas de esta manera. Claro está, que debido a la poca precisión de las lecturas, ya que las divisiones del transportador gnomónico utilizado sólo van de medio en medio grado, se pueden haber cometido algunos errores en la colocación de los puntos llevándolos fuera de la intersección de zonas; pero esto en la mayoría de los casos, si el error es pequeño, no ofrece dificultad alguna; la ley de racionalidad nos hace ver claramente que un punto separado de una intersección a distancia cuya fracción no sea un número sencillo, es falso. Así, pues, consideraremos coincidiendo a los puntos de escasa separación.

Habrán algunos, sin embargo, que no coincidiendo con los puntos de cruce estén comprendidos entre otros dos pertenecientes a una misma zona; midiendo la distancia del punto de referencia a los dos más próximos de aquélla, se llegan a fijar los índices por la ley de complicación, mediante las interpolaciones correspondientes, en cuyo examen no entraremos por ser cuestión bien conocida en las reglas de proyección gnomónica.

En los cuadros I a V que acompañan a este trabajo, indicamos en cinco columnas el resultado de la determinación de los

índices: la primera columna indica el número de orden asignado a cada reflejo; la segunda, el ángulo φ , y la tercera, el ángulo α

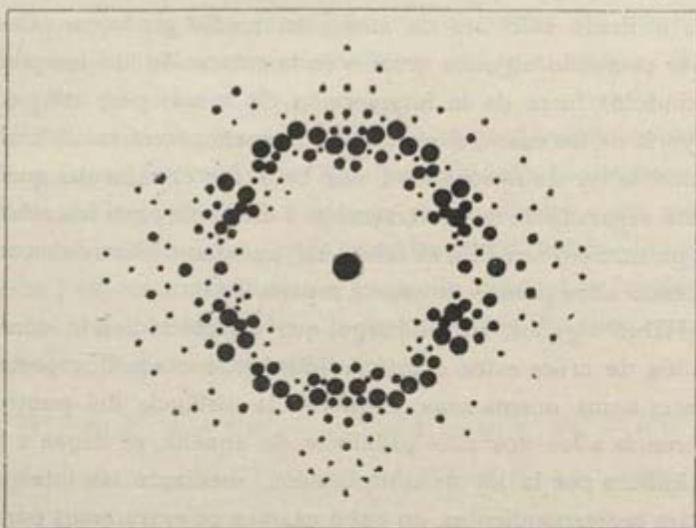
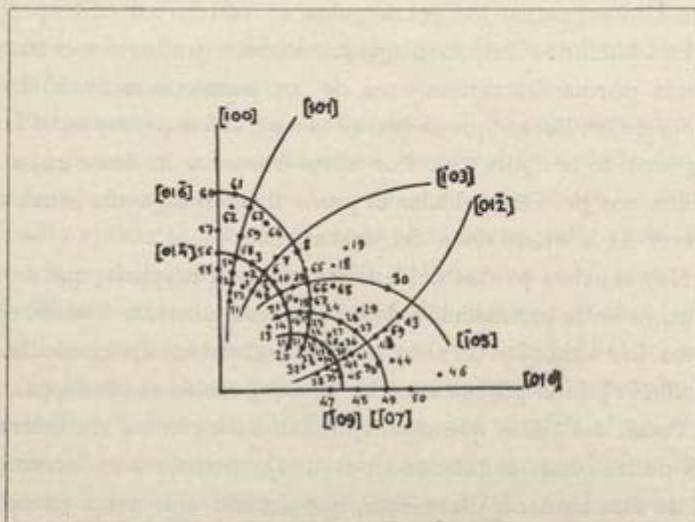


Fig. 15.—Lauediagrama de la epsomita según la cara (001). Eje b horizontal. En la parte superior, numeración de los puntos del primer cuadrante e indicación de las principales zonas cristalográficas.

(ambos, coordenadas de los distintos puntos o reflejos); la cuarta

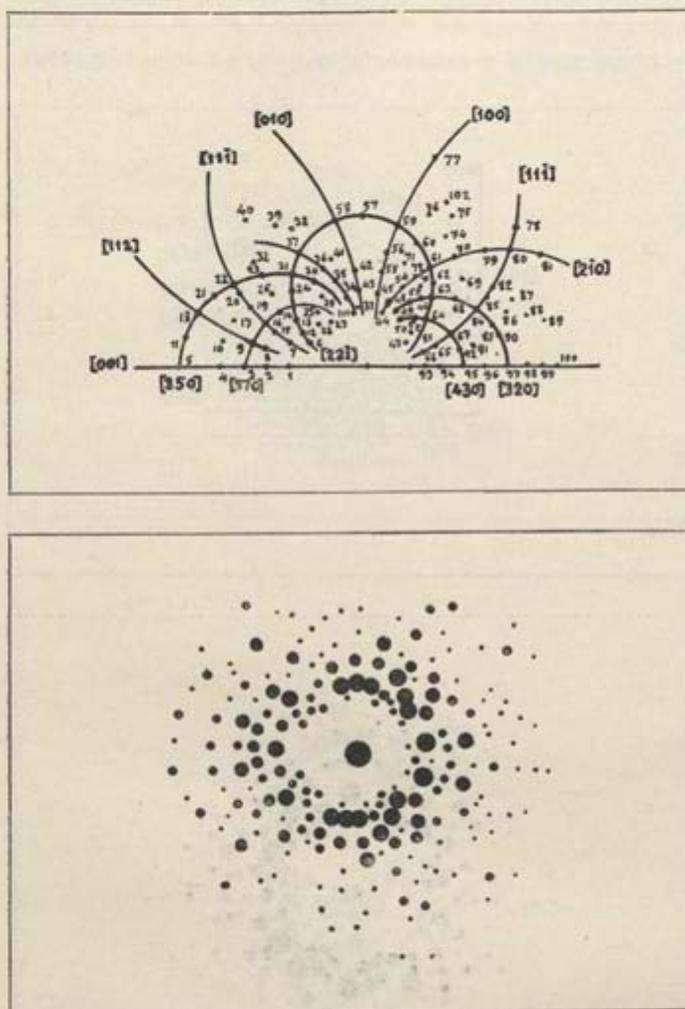


Fig. 16.—Laue diagrama de la epsomita según la cara (110). Eje c vertical. En la parte superior, numeración de los puntos de los dos primeros cuadrantes e indicación de las principales zonas cristalográficas. (Corresponde este esquema al fotografiado de la figura 10.)

columna, los índices determinados por el método gráfico, y la quinta, la intensidad relativa de cada punto. En el cuadro VI

hacemos el resumen de todos los planos reflectantes hallados en

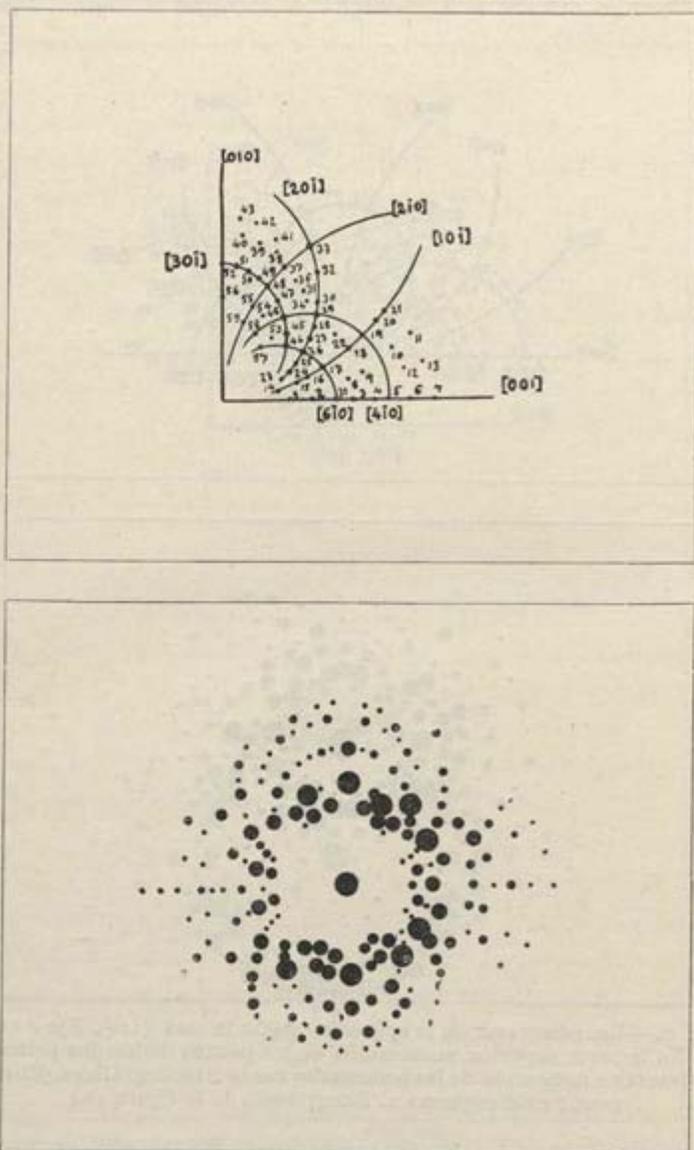


Fig. 17.—Lauediagrama de la epsomita según la cara (100). Eje c vertical. En la parte superior, numeración de los puntos de un cuadrante e indicación de las principales zonas cristalográficas.

los puntos se representan por el mayor o menor diámetro de éstos. La figura 19 corresponde a un lauediagrama de una placa tallada con una oblicuidad de $4^{\circ} 30'$ con relación a la cara (010),

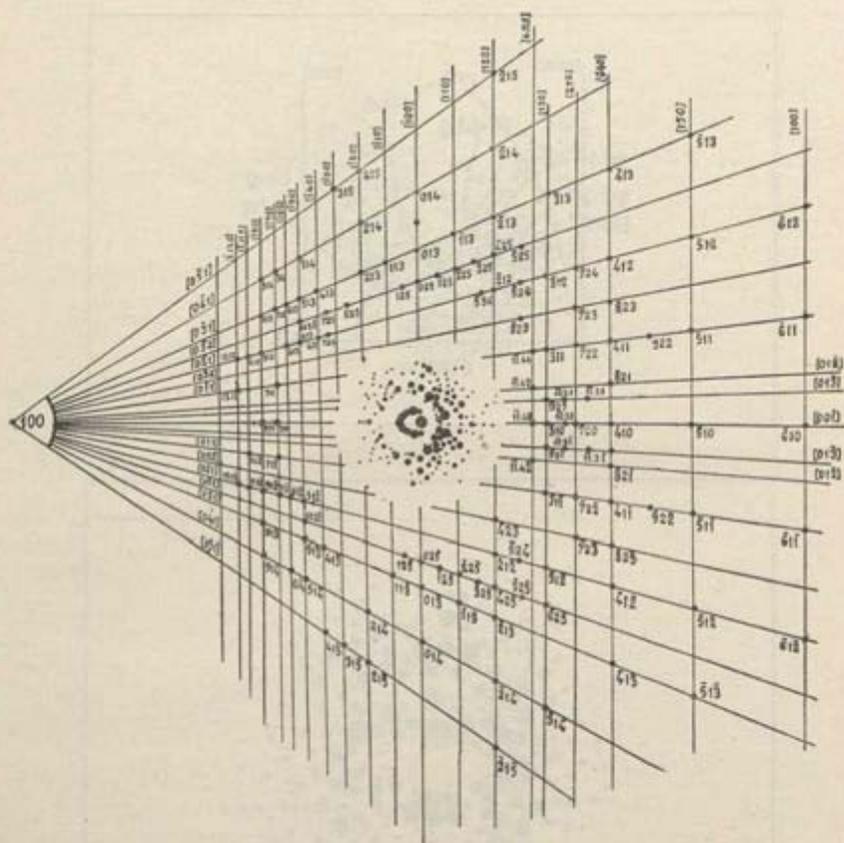


Fig. 19.—Lauediagrama de la epsomita según la cara (010) con una oblicuidad de $4^{\circ} 30'$. Proyección gnomónica de los puntos e indicación de sus índices.

de la epsomita, y la proyección gnomónica correspondiente (método de Wyckoff). La figura 17 es un lauediagrama con inclinación de $30'$ respecto a la cara (100). Adjuntos a cada uno de esos esquemas acompañamos otros, en la parte superior, que indican las zonas principales del lauediagrama y los puntos de éste con

numeración que corresponde a la de los cuadros I a V. Como en los lauediagramas no se acusan las formas esfenoédricas derecha e izquierda de la epsomita, sino que aparecen cual si fueran holoédricas, en los esquemas de las figuras 15, 17 y 18 la misma cara se repite cuatro veces, una en cada cuadrante (salvo algún caso excepcional debido a causas accidentales que pueden producir la ausencia de alguna en uno o dos cuadrantes). Por eso hemos representado para la numeración, únicamente la cuarta parte de los lauediagramas, es decir, un cuadrante; en cambio, en el esquema del lauediagrama (110) (fig. 16), una misma cara sólo sale en dos cuadrantes, debido a las condiciones de simetría, por lo que hemos representado medio lauediagrama: dos cuadrantes contiguos. En éstos el ángulo φ crece de 0 a 180°, marchando en el mismo sentido para que no haya dudas respecto al cuadrante que le corresponde. (Véanse cuadros III y V.)

La repetición dos o cuatro veces, según el lauediagrama, de cada reflejo, nos ha permitido representar los índices de las caras sin tener en cuenta el signo. Así, por ejemplo, la cara (270) es representativa de las cuatro: (270), ($\bar{2}\bar{7}0$), ($\bar{2}70$) y ($2\bar{7}0$); respecto a sus coordenadas, hemos tomado el valor medio en los cuatro cuadrantes, con lo cual eliminamos el pequeño error que pudiera aparecer ante la consideración de una sola. Así, el lauediagrama (010) normal, asigna al plano reflector (711) (núm. 17 de orden) las coordenadas $\varphi = 14^\circ$, y $\alpha = 7^\circ 35'$: dichos valores son la media aritmética de 13° que encontramos en el primer cuadrante, 14 en el segundo, 14 en el tercero y 15 en el cuarto, para el azimut; $8^\circ 10'$ en el primero, $8^\circ 15'$ en el segundo, $7^\circ 5'$ en el tercero y 7° en el cuarto, para el ángulo α . Las apreciaciones de los minutos entiéndase hechas por aproximación, empíricamente.

Considerando las referidas figuras 15 a 19 y los cuadros I a VI, sacamos las siguientes consecuencias:

Primera. El lauediagrama (001) es muy próximo a tetragonal, prueba inmediata de la *gran semejanza de las traslaciones*

primitivas en la dirección de los ejes a y b y de la concordancia del valor absoluto de dichas traslaciones con la relación áxica de la epsomita.

Segunda. Por la misma razón, obsérvase la *gran semejanza entre los diagramas, según (100) y (010), normales a los ejes a y b*, que son casi iguales. La igualdad absoluta se ofrecería si el cristal perteneciese al sistema cuadrático; los diagramas de referencia serían completamente idénticos.

Tercera. Comparando los diagramas (100) y (010) con el (001), se aprecia también otra concordancia entre la relación áxica cristalográfica y la estructura interna. *El lauediagrama según (001) (véase cuadro IV), en que la dirección del rayo primario coincide con la del eje c del cristal, encierra preferentemente caras con valores para h y k muy elevados, y para l pequeños (la mayoría de las caras tienen $l = 1$). De modo análogo predominan en el diagrama (010) caras con $k = 1$, y en el (100) caras con $h = 1$.*

Las condiciones experimentales en que se han producido los tres diagramas han sido idénticas, y por lo tanto, podemos hacer la comparación directa. Al primer golpe de vista observamos cómo *en el diagrama (001) la región que rodea al rayo primario es muy amplia, mucho más que la correspondiente en los diagramas (100) y (010)*, lo cual demuestra que *el período primitivo en la dirección del eje c es bastante más corto que el de las otras dos direcciones b y c.*

La correspondencia entre la relación áxica elemental y la cristalográfica externa queda de este modo prejuzgada. Su determinación exacta, así como la del grupo simétrico en que cristaliza la epsomita, la realizamos aplicando los métodos del cristal móvil que vamos a exponer a continuación.

Fotogramas de cristal rotatorio.

Hemos indicado ya el modo de obtenerlos: el cristal se mueve alrededor de un eje que, para mayor sencillez, se dispone normal al haz incidente. En virtud de la ley de Bragg $n\lambda = 2d \sin \alpha$,

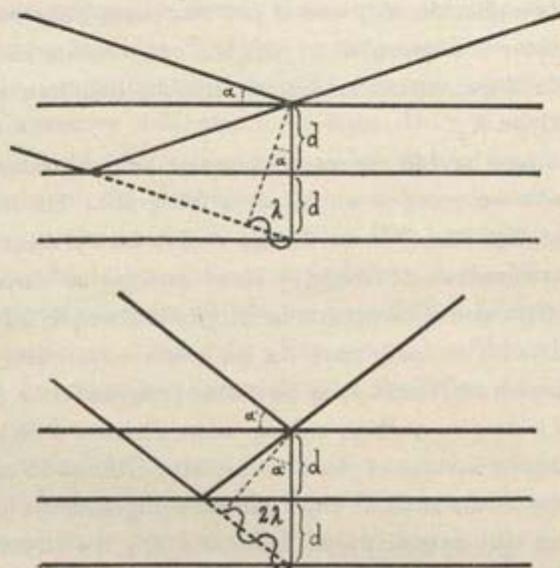


Fig. 20.—Expresión gráfica de la ley de Bragg.

siempre que la diferencia de marcha de dos ondas reflejadas en un mismo plano sea igual a un múltiplo de la longitud de onda λ (fig. 20), aparece en la placa fotográfica o film una interferencia; la radiación que se emplea es selectiva, y por lo tanto, el espectro constará de tantas rayas como ondas diferentes contenga la radiación.

Hemos utilizado tubos Lilienfeld con anticátodo de molibdeno que da una radiación bicromática K_α y K_β , cuya longitud de onda es: $K_\alpha = 0,70759 \text{ \AA}$ y $K_\beta = 0,63065 \text{ \AA}$ (26). Las reflexiones en los planos reticulares producen, por lo tanto, dos

líneas espectrales: una más débil, la β , y otra más fuerte y refrangible, la α . Aunque hemos interpretado ambas en la mayoría de los casos, como β suele ser tan débil que con frecuencia sólo se percibe en los primeros órdenes, empleamos constantemente α , y β en los casos en que aparece, como medio comprobante. Con esta finalidad no hemos utilizado filtros absorbentes ¹ de la radiación K_{β} , que si por una parte tienen la ventaja de simplificar el número de rayas, tan conveniente en los fotogramas de líneas estratificadas, en cambio debilitan mucho la intensidad de K_{α} .

Dos clases hay de espectrogramas de cristal giratorio: unos en que sólo se recogen en la placa fotográfica las interferencias de los distintos órdenes de una misma cara o de caras de la misma zona, *método de Bragg*, y otros en que se disponen los aparatos para que el campo de la fotografía abarque, además, los rayos reflejados en los planos de las zonas adyacentes; éstos, a su vez, pueden ser, como ya se ha dicho, *fotogramas de Seemann-Schiebold* o de giro parcial, y *fotogramas Polanyi* o de líneas estratificadas, en los que el giro es completo. Utilizando cualquiera de éstos podemos analizar en el mismo fotograma los espectros principales, que suministra la cara tallada, y los adyacentes de las vecinas, lo que facilita la interpretación de la estructura cristalina con un número reducido de diagramas. Por eso se emplean casi siempre en los estudios cristalográficos los fotogramas completos, al paso que en las investigaciones físicas de determinación de longitudes de onda, se utilizan de ordinario sólo los espectros principales. Bastando de ordinario un pequeño giro para apreciar las condiciones de reflexión en los planos reticulares y deducir la estructura, son muy útiles los fotogramas Schiebold-Seemann, que hemos empleado de preferencia.

Si nos fijamos detenidamente en un fotograma de esta cla-

¹ Para la radiación emitida por un anticátodo de molibdeno se emplea una lámina de zirconio de 0,03 mm. de espesor; para anticátodo de cobre, el níquel.

se (lámina VII, fig. 2), vemos la impresión del rayo primario en la posición inicial del giro, cuando llega a la placa fotográfica, tangente a la superficie del cristal. A uno y otro lado de dicha impresión, y en la dirección de la traza sobre el fotograma del plano normal al eje de giro del cristal, aparecen los espectros de los distintos órdenes de la serie principal, casi siempre tres o cuatro órdenes, porque los demás disminuyen de intensidad hasta hacerse imperceptibles. Si el giro se dirige hacia un solo lado de la posición inicial (que es el caso de nuestros espectrogramas), las rayas aparecen únicamente de aquel lado. A derecha e izquierda de dichos espectros principales, que forman la llamada zona ecuatorial del diagrama, aparecen los adyacentes sobre fajas que partiendo de la impresión del rayo primario, van divergentes hacia los órdenes superiores. Todas las rayas son próximamente paralelas al eje de giro. En los fotogramas Seemann, en que el chasis y la placa giran simultáneamente con el cristal, las rayas se alinean en arco alrededor de la mancha del rayo primario.

Cada serie adyacente de espectros corresponde a un plano reticular reflector del cristal. La faja radial en que aparecen estos espectros se acusa por una débil iluminación debida a la radiación continua que nunca se puede eliminar por completo; sobre las mencionadas fajas o bandas, que son curvilíneas y divergentes tanto más cuanto más alejadas de la principal, aparecen de trecho en trecho las líneas α y β . Cuando el eje de giro es una fila reticular, como se procura siempre, se observan, además, dos alineaciones diferentes de las rayas: una, que sigue aproximadamente la dirección del eje de giro, y otra normal a la anterior; estas alineaciones no son rectas, sino curvas, que resultan de la intersección de las superficies cónicas, lugar geométrico de los rayos secundarios reflejados, con el plano de la placa fotográfica.

En la figura 23 (pág. 107), las interferencias α de las caras (031) , (021) , (011) , $(0\bar{1}1)$, $(0\bar{2}1)$, $(0\bar{3}1)$, $(0\bar{4}1)$ y las β correspondientes,

constituyen una alineación paralela al eje de giro, que Schiebold denomina *línea estratificada de primera especie* (*Schichtlinie I. Art*). Las rayas (002) y (004), las (011), (013) y (014), las (021), (022), (023), (024), (025) y (026), etc., constituyen tres *líneas estratificadas de segunda especie*, cuya separación de la primera (002)-(004), o *ecuador*, permite calcular fácilmente la traslación primitiva en la fila reticular del eje de giro. Cuando se emplea un film cilíndrico, en el fotograma Polanyi resultante son círculos las líneas estratificadas de segunda especie (rectas desarrollando el cilindro). Si el eje de giro es una línea irracional del cristal, no aparecen las rayas alineadas, sino distribuidas sin regularidad aparente.

La intensidad de las rayas de interferencia varía con el orden n de la reflexión en la fórmula de Bragg y depende de varios factores; en el fotograma es difícil precisarla con exactitud por las mismas razones que hemos indicado para los puntos de los lauediagramas. Mediante el empleo de la cámara de ionización, se ha visto que la intensidad decrece, a medida que se eleva el orden, en una proporción que guarda la relación 100 : 20 : 7 : 3 : 1 con el número atómico, existiendo, sin embargo, algunas anomalías.

La determinación de los índices de los planos que producen las interferencias, se hace hallando primero el valor d de los mismos, y éste se obtiene de la fórmula de Bragg

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen} \alpha,$$

que es la base de la interpretación de esta clase de diagramas.

Si conocemos la longitud de onda λ empleada, podremos hallar d despejándole en aquella igualdad, de la misma manera que conociendo d se puede hallar λ ;

$$d = \frac{n\lambda}{2 \operatorname{sen} \alpha}, \text{ puesto que } \lambda = \frac{2d \operatorname{sen} \alpha}{n}.$$

De aquí que en las determinaciones físicas se utilicen cristales

cuyos períodos Roentgen d en las direcciones principales sean conocidos con exactitud (por ejemplo, en la calcita o la sal común), analizando las ondas emitidas por anticátodos de los metales que se desea estudiar. En Cristalografía, el problema estriba en hallar los valores de d en las diferentes direcciones de

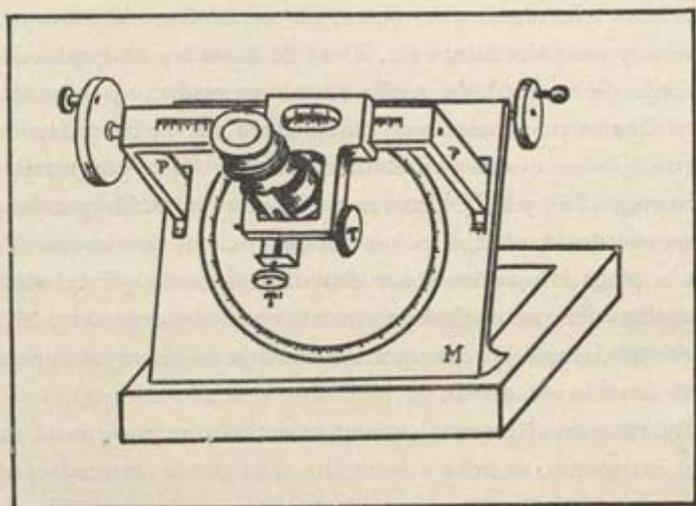


Fig. 21.—Ciclómetro de Gross.

un cristal, y para ello necesitamos utilizar anticátodos que emitan ondas de longitud bien conocida.

DETERMINACIÓN DE LOS PLANOS REFLECTANTES EN UN FOTOGRAMA SCHIEBOLD.—Para proceder a fijar las coordenadas de cada línea espectral, empezamos por marcar con tinta china en el envés de la placa el punto medio de cada raya, asignándole un número de orden como en los lauediagramas; a él referiremos las dos coordenadas polares $\Delta\rho$ y φ . El origen de las coordenadas será: para $\Delta\rho$ el centro de la impresión del rayo primario, y para φ , el azimut de los espectros de la serie ecuatorial. Para medir las coordenadas utilizamos el *ciclómetro de Gross* (fig. 21), que consiste en un microscopio simple sobre un puente metálico (P), a lo largo del cual puede correr el tubo montado

en un carrito; el puente, que lleva una escala para apreciar por medio de un nonius divisiones de 0,1 mm., va fijo a una gran platina (*M*) metálica, oblicua 45° sobre el soporte de madera colocado horizontalmente sobre la mesa de trabajo. La platina tiene un disco de cristal engastado en un anillo metálico que forma parte de ella y que puede girar en su mismo plano mediante una cremallera y un tornillo sin fin. El anillo metálico va graduado en su borde de 1 a 360°, de medio en medio grado, y por medio de un nonius se pueden apreciar fracciones de 6'. El retículo del microscopio se centra con el disco de la platina por medio de los tornillos (*T*) y (*T'*). Una vez hecha esta operación y colocado el círculo de la platina coincidiendo el 0 del nonius con 0°, se lleva la placa fotográfica sobre ésta de tal modo que coincida la impresión del rayo primario con el centro del retículo y el hilo horizontal del mismo pase por los centros de las rayas espectrales de la serie ecuatorial.

En estas condiciones, haciendo avanzar o retroceder el carro del microscopio, se lleva a coincidir cada punto marcado con el centro del retículo; cuando las líneas son muy anchas debe marcarse el punto en el borde externo de las mismas, que es más recortado porque corresponde al canto de la arista de platino del soporte del cristal (fig. 11), y así se hace la coincidencia con más exactitud; anotada la división correspondiente de la escala, por diferencia con la posición inicial ¹ se sabe la distancia $\Delta\rho$ expresada en décimas de milímetro. El ángulo φ se aprecia en la platina movable graduada.

En unas tablas cuyo modelo indicamos en el cuadro B (página 118), vamos anotando las lecturas en esta forma: en la primera columna, número de orden correlativo de las rayas, empezando por las de la serie principal, continuando por las de las adyacentes de un lado, y terminando por las de las adyacentes del otro,

¹ La numeración crece en un solo sentido y el cero se halla a la izquierda, de modo que al centrar el aparato no coincide el cero del nonius con el cero de la escala, sino con la división 85 mm.

incluyendo las líneas α , y las β si existen; en la segunda columna, los valores $\Delta\rho$ leídos; en la tercera, los valores angulares φ que determinamos sin más que hacer girar la platina del ciclómetro, sin variar la posición de la placa, hasta que el hilo horizontal del retículo pase por los diferentes espectros adyacentes. Los de la serie principal tendrán un ángulo $\varphi = 0^\circ$; los demás, un ángulo que irá creciendo a medida que se acerquen a la proyección del eje de giro. Si cada serie de espectros adyacentes siguiese una línea recta, todos los órdenes de una misma cara tendrían el mismo ángulo φ ; pero como esas series forman curvas divergentes, ofrecerán las rayas ángulos diferentes; sin embargo, como puede apreciarse en las figuras 23 a 28, que representan en esquema los fotogramas Schiebold de la epsomita, y en el cuadro B, que corresponde a las medidas hechas en el fotograma de la cara (010) con giro alrededor de [100], las rayas espectrales de las fajas próximas a la principal aparecen sensiblemente en línea recta y bajo idéntico ángulo φ , porque la divergencia es muy pequeña.

También se observa simetría, como en los lauediagramas, en los fotogramas de cristal oscilante según las caras pinacoidales y prismáticas cuando giran las placas alrededor de un eje de simetría (véanse figuras 23 a 28); por lo tanto, el ángulo φ de caras de igual notación tendrá el mismo valor en este caso.

Para determinar el ángulo α nos basta conocer la coordenada $\Delta\rho$ y el radio R (distancia del eje de giro a la impresión del rayo primario); aplicando la fórmula $\Delta\rho = R \operatorname{tg} 2\alpha$ (como en los lauediagramas), y despejando $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\Delta\rho}{R}$.

Para facilitar el cálculo, en las tablas de cada fotograma, de las cuales sirve de ejemplo la indicada en el cuadro B, las columnas que siguen a las tres antes mencionadas encierran las operaciones de resolución de esas igualdades. Así, en la cuarta columna vamos anotando los logaritmos de $\Delta\rho$; en la quinta, los logaritmos de $\operatorname{tg} 2\alpha$ determinados por la igualdad: $\log. \operatorname{tg} 2\alpha =$

$$= \log. \Delta \rho - \log. R, \text{ correspondientes a la fórmula } \operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\Delta \rho}{R}.$$

En la sexta columna insertamos el valor de 2α , obtenido por el logaritmo de su tangente; en la séptima, la mitad, o sea el valor del ángulo α .

La columna final (número 12) representa los valores de d , según la fórmula

$$d = \frac{n\lambda}{2 \operatorname{sen} \alpha},$$

obtenidos aplicando los de α , que acabamos de determinar y anotar en la columna 7. El valor de λ es conocido. Para determinar con seguridad los índices no basta conocer d , porque algunas caras de índices distintos ofrecen el mismo período Roentgen; es necesario, además, un nuevo cálculo, con objeto de conocer el valor de ϑ , que es el *complemento del ángulo que forma el eje de giro con la normal a la cara respectiva*. La expresión que relaciona este ángulo ϑ con valores medidos y determinados es

$$\operatorname{sen} \vartheta = \operatorname{sen} \varphi \cdot \cos \alpha.$$

En las columnas octava a undécima del cuadro B van los valores de los logaritmos de los cosenos correspondientes a los ángulos α anotados en la columna séptima, los logaritmos de los senos de φ (ángulos que van expresados en la columna tercera), y las operaciones para llegar a determinar el valor de ϑ por la fórmula anterior.

Como las rayas de la zona ecuatorial tienen un ángulo $\vartheta = 0$ porque su ángulo $\varphi = 0$, aparecen en blanco los lugares respectivos de las columnas octava a undécima.

Con los valores d hallados se pueden determinar los índices (hkl) de los planos reflectantes, puesto que cada plano tiene una malla de área $I_{hkl} = \frac{V_0}{d_{hkl}}$ constante, inversamente proporcional a d .

En la fórmula de Bragg: $n\lambda = 2d \operatorname{sen} \alpha$, que nos ha servido para determinar d , hemos prescindido del valor de n como si todas las interferencias fuesen de primer orden, con lo cual la distancia entre los planos va dividida por n . Se acostumbra a expresar de este modo, por $\frac{d}{n}$, los órdenes superiores de la reflexión, ya que las condiciones de ésta sobre un plano (hkl) serán las mismas que se necesiten para producirse el primer orden en una cara $n(hkl)$; las distancias reticulares $\frac{d}{2}, \frac{d}{3}, \frac{d}{4} \dots \frac{d}{n}$ corresponden a planos $2(hkl), 3(hkl), 4(hkl) \dots n(hkl)$, que darían interferencias análogas bajo idénticos ángulos α de incidencia, que un mismo plano (hkl) para el segundo, tercero, cuarto y enésimo orden. Este modo de expresar la ley de Bragg, lejos de ofrecer complicación, permite fácilmente comprobar la existencia de los tipos de mallas centradas (véase pág. 17) en los planos reticulares intercalados, por la extinción de determinadas interferencias.

Consideremos, por ejemplo, un paralelepípedo elemental de cualquiera de los sistemas trirrectangulares (cúbico, tetragonal, rómbico), en los cuales, por ser $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, coinciden en dirección y magnitud a_0, b_0, c_0 , con d_{100}, d_{010} y d_{001} , respectivamente. Si el paralelepípedo es cúbico, se deduce geométricamente que $d_{110} = \frac{a}{2} \sqrt{2}$ y que $d_{111} = \frac{a}{3} \sqrt{3}$. Si el cuerpo elemental fuese cúbico de cuerpo centrado (pág. 18), el nudo interior de coordenadas $[\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}]$ determina tres nuevos planos que pasan por él y por los puntos análogos de los paralelepípedos vecinos; planos que aun siendo idénticos a los primeros en la distribución de los nudos, y hasta en la carga atómica cuando todos los puntos están ocupados por el mismo elemento, sin embargo, la distancia de separación d_{100} no es igual a a , sino a $\frac{a}{2}$, resultando, además, que $d_{111} = \frac{a}{6} \sqrt{3}$ y $d_{110} = \frac{a}{2} \sqrt{2}$,

este último período es el único igual que en el cuerpo elemental simple. En los casos en que los átomos son diferentes y ocupan también puntos del interior de la malla espacial, la separación de los planos que pasan por ellos es igual a una fracción exacta de a_0 , b_0 y c_0 . Así se explica que aparentemente muchas veces un orden elevado de la reflexión, por ejemplo $n = 12$ en la cara (010) de la estauroлита, sea de gran intensidad, que no coincide con la que le correspondería por la caída normal, según Bragg. En el ejemplo mencionado, la aparente anomalía se debe a que un plano (0.12.0) en el que $d = \frac{b_0}{12}$ contiene una carga atómica considerable.

Como se ve, puede prescindirse de n en la fórmula de Bragg siempre que los planos (hkl) correspondientes a $d_{(hkl)}$ se expresen por fracciones de a_0 , b_0 , c_0 , cuando crucen por el interior de la célula cristalina.

El valor de d es absoluto: se indica en Å (angstroms), porque en esta unidad va expresado el valor de $\lambda_{k\alpha}$ y $\lambda_{k\beta}$ que hemos utilizado. Tanto d como θ son el punto de partida para conocer la estructura del cristal, que exige determinar: 1.º, las dimensiones (longitud de las aristas) del paralelepípedo elemental; 2.º, el número de moléculas contenidas en él; 3.º, el grupo estereo-cristalino. La estereoquímica cristalina requiere, además, hallar la posición del centro de gravedad de los átomos en la célula o paralelepípedo elemental, lo cual necesita ante todo la apreciación de las diferencias más pequeñas en la intensidad de las interferencias.

DIMENSIONES DEL PARALELEPÍPEDO ELEMENTAL O CÉLULA CRISTALINA.—Hasta ahora hemos llegado en la interpretación de los fotogramas de Schiebold, a la determinación de la distancia d (período Roentgen) que separa a los planos reticulares acusados en la placa por las interferencias, sin haber intervenido en el cálculo las constantes reticulares. Para determinar los índices de los planos se precisa conocer los valores absolutos de las aristas a_0 ,

b_0 y c_0 , que no son otra cosa que los períodos de identidad o de traslación de las tres filas reticulares que coinciden con ellas. Cuando el sistema cristalino es trirrectangular y no hay extinción de reflexiones en las caras pinacoidales, bastará tomar los tres valores máximos d_{100} , d_{010} y d_{001} , que serán iguales a a_0 , b_0 y c_0 , respectivamente; pero en el caso general, para la determinación de los períodos de traslación se recurre a la separación que muestran las líneas estratificadas («Schichtlinien») de primera clase de los fotogramas obtenidos por giro alrededor de [100], [010] y [001]. Estas «Schichtlinien» formadas por alineación de rayas espectrales, siguen una dirección de hipérbola en los fotogramas sobre placas, y de circunferencias en los films cilíndricos. La fórmula que liga el valor de la traslación T con la longitud de onda y la desviación del rayo difractado cuando se considera al cristal como retículo lineal (conjunto de filas reticulares paralelas), es, según Laue ¹, $s\lambda = T(\cos \rho - \cos \rho_0)$, que se convierte en $s\lambda = T \cos \rho$ si la incidencia del rayo es normal a la fila: s es un número entero que representa el orden, y ρ el ángulo de desviación con la fila. Siempre que se haga coincidir a ésta con el eje de rotación del cristal, el ángulo ρ de desviación se puede determinar por la fórmula $s = R \cot \rho$, en la cual s es la distancia sobre el fotograma desde el ecuador a la raya, y R el radio del film. Si en vez de film cilíndrico se utiliza placa, hay que considerar que ésta sería tangente a un cilindro que tuviese de radio su distancia al cristal, que llamaremos r ; por cualquier otro punto de la placa pasaría un film de radio R mayor, y para calcularlo no hay más que medir la coordenada $\Delta \rho$ como se ha indicado en la página 90, y hallar el ángulo α ; conocido éste se determina en seguida la distancia del cristal al punto, que es hipotenusa del triángulo que forman $\Delta \rho$ y r , como también lo es de otro triángulo constituido por los catetos s y el valor R que buscamos.

Por lo tanto, $R = \sqrt{\left(\frac{\Delta \rho^2}{\sin^2 2\alpha}\right) - s^2}$. Una vez hallado ρ , el pe-

¹ Véase: *Fortschritte der Min. Krist. u. Petrogr.*, t. IV, 1914, pág. 43.

Trab. del Mus. Nac. de Cienc. Nat. de Madrid.—Ser. Geol., núm. 37.—1930.

río T se determina por la igualdad $T = \frac{s\lambda}{\cos \rho_n}$ para las tres direcciones $T_{100} = a_0$, $T_{010} = b_0$ y $T_{001} = c_0$. Todas las rayas que pertenezcan a una misma línea estratificada deberán dar igual valor T , por lo cual conviene hallar la media aritmética de varias medidas. Se necesitan, por lo tanto, tantos fotogramas como pinacoides.

Como en la instalación del Instituto Mineralógico de Leipzig, para fotogramas Schiebold hay cuatro aparatos que funcionan a la vez recogiendo radiación del mismo tubo Lilienfeld, obtuvimos los tres fotogramas al mismo tiempo, con una exposición de unas tres horas.

Al hacer la determinación notamos algunas divergencias en los valores de las distintas constantes reticulares, según el aparato empleado para la obtención de los fotogramas, deduciendo en consecuencia que, dadas las condiciones en que habíamos operado, sólo eran imputables a imprecisión del valor que habíamos aplicado para R (distancia de la placa fotográfica al eje de giro). Este valor varía con frecuencia entre límites muy pequeños, pero suficientes para ocasionar en los cálculos errores de alguna importancia. Puede ser causa de variaciones, por ejemplo, la misma dilatación térmica. A fin de determinar dicha distancia R con toda exactitud, sin recurrir a medidas directas, nos valimos del procedimiento comúnmente empleado en aquel Instituto: de la comparación con los espectros de calcita. Obtuvimos un nuevo espectrograma de cada pinacoide de la epsomita en común con el de la cara $(10\bar{1}1)$ de la calcita; para lo cual colocamos a la vez sobre el soporte Schiebold (fig. 7, pág. 42) una placa tallada del sulfato magnésico y otra de espato de Islandia según $(10\bar{1}1)$, de modo que las dos caras sobre las que iban a incidir simultáneamente los rayos Roentgen, quedasen en un mismo plano y en contacto por uno de sus bordes, al cual vendría a caer el haz luminoso. Así aparecieron los dos espectrogramas superpuestos, y en el ecuador las rayas de ambos cuerpos.

El valor $d_{(10\bar{1}1)}$ en la calcita se conoce con toda precisión (23), (26); es igual a $3,029 \text{ \AA}$, y nos sirve en este caso de escala comparativa al aparecer dos órdenes de la reflexión en el ecuador, y dos también de la epsomita, el segundo y cuarto, pudiéndose leer a la vez la coordenada $\Delta\rho$ de las rayas de cada substancia por medio del ciclómetro. En la fórmula de Bragg $n\lambda = 2d \operatorname{sen} \alpha$ para la calcita, conocemos d , n y λ ($d = 3,029$, λ para $K\alpha = 0,70759$); luego, en el primer orden:

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{\lambda}{2d} = \frac{0,70759}{2 \times 3,029},$$

de donde $2\alpha = 13^\circ 25'$, y ahora este valor lo sustituimos en la fórmula $\Delta\rho = R \operatorname{tg} 2\alpha$, despejando $R = \frac{\Delta\rho}{\operatorname{tg} 2\alpha}$, para hallar su valor exacto, que en seguida aplicamos para el cálculo de d en todos los fotogramas de la epsomita obtenidos con el mismo aparato, empezando por las rayas del ecuador de cada placa fotográfica.

Por este procedimiento hemos hallado que los valores absolutos de las constantes reticulares a_0 , b_0 , c_0 , con una aproximación de dos decimales, son:

$$a_0 = 11,91 \text{ \AA} \quad b_0 = 12,02 \text{ \AA} \quad c_0 = 6,87 \text{ \AA},$$

siendo un \AA (angstrom) $= 10^{-8}$ centímetros.

NÚMERO DE MOLÉCULAS DE $SO_4 Mg \cdot 7H_2O$ CONTENIDAS EN EL PARALELEPÍPEDO ELEMENTAL.—Multiplicando las constantes halladas obtenemos el volumen del paralelepípedo elemental V_0 , pues en el sistema rómbico en que dicho cuerpo es recto de base rectangular, $V_0 = a_0 \cdot b_0 \cdot c_0 = 983,6 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^3$.

El peso molecular de la epsomita P_m es 246,49; su peso específico $S = 1,678$, luego el volumen de la molécula-gramo (Mol):

$$V_m = \frac{P_m}{S} = \frac{246,49}{1,678} = 146,90 \text{ cm}^3.$$

Según la *ley de Loschmidt*, la *molécula-gramo* de una sustancia cualquiera, *contiene* $6,06 \cdot 10^{23}$ moléculas. Si representamos por N el número de Loschmidt, el peso de n moléculas contenidas en la célula cristalina será: $P_c = \frac{n \cdot P_m}{N}$ y su volumen

$$V_c = \frac{n \cdot V_m}{N}.$$

El número de moléculas n no podemos determinar roentgenográficamente teniendo presente que el peso de la célula es igual a su volumen V_c por la densidad, y si dividimos este producto por el número de moléculas n , el cociente que resulte será el peso de una molécula, igual también al cociente de dividir la molécula grammo por el número de Loschmidt, luego

$$\begin{aligned} \frac{V_c \cdot s}{n} &= \frac{P_m}{N} \text{ en donde despejando, } n = \frac{V \cdot s \cdot N}{P_m} = \\ &= \frac{a_0 b_0 c_0 \cdot s \cdot N}{P_m} = \frac{983,6 \cdot 10^{-24} \cdot 1,678 \cdot 6,06 \cdot 10^{23}}{246,49}; \end{aligned}$$

por lo tanto,

$$n = \frac{983,6 \cdot 1,678 \cdot 6,06 \cdot 10^{-1}}{246,49} = 4,057;$$

es decir, que *el paralelepípedo elemental de la epsomita contiene cuatro moléculas*.

Esto concuerda perfectamente con el número de simetría y de posiciones equivalentes que puede adoptar un punto dentro de la célula, igual también a 4. Así, pues, existen en su interior cuatro moléculas de $SO_4 Mg \cdot 7H_2O$, lo que hace un total de 28 de agua.

DETERMINACIÓN DEL GRUPO ESTEREOCRISTALINO.—La determinación de la simetría interna de la célula, o sea el «Raumgruppe», *grupo espacial* o *estereocristalino*, exige ante todo el conoci-

miento de los índices de los planos que han producido el fotograma. Los átomos están distribuidos en la célula con arreglo a condiciones de simetría del grupo, que originan la extinción de determinadas interferencias (extinciones características). Cuando se han hallado los índices y se hace el examen de esas extinciones por la regularidad que ofrecen las ausencias de rayas, se llega a establecer el grupo a que corresponde la cristalización. Niggli (12) y Mark (45) han publicado unas tablas analíticas de los 230 grupos estereocristalinos, con ayuda de las cuales se abrevia la determinación. Se comprenderá la ventaja de utilizar fotogramas cuya interpretación sea fácil, que contengan el menor número posible de rayas, pero sin faltar el suficiente para discernir con la mayor seguridad posible el grupo cristalino de la substancia; y aquí es donde se ofrece la gran ventaja del método de Schiebold: el movimiento del cristal limitado a un giro de 25 a 30°, reduce el número de interferencias a una duodécima parte con relación al giro de 360°, evita con frecuencia confusiones de rayas que aparecen muy próximas entre sí, y a igualdad de duración en la exposición, permite mayor intensidad en las interferencias por pasar repetidas veces el cristal por las posiciones de reflexión, todo ello sin dejar de producir las rayas suficientes para la interpretación de la simetría.

ÍNDICES DE LOS PLANOS REFLECTANTES: SU DETERMINACIÓN.—

Lo mismo que en los lauediagramas, podemos seguir un método calculatorio o gráfico.

El método gráfico ofrece gran sencillez, como hemos visto en la interpretación de los lauediagramas. Se basa, lo mismo que allí, en la aplicación del retículo recíproco (véase pág. 73) y, además, en que el fotograma de cristal giratorio simboliza de modo patente la distribución de los puntos de las interferencias como trazas de los nudos del retículo recíproco, al moverse el cristal, sobre el plano meridiano normal a otro, también meridiano, que pasa por el rayo incidente y el eje de giro; este hecho se debe a que durante el movimiento los ángulos θ y los valores

d no se alteran. Los nudos que en el giro no alcancen aquel plano, supuesto fijo, no aparecerán en el fotograma.

Se comprende que la aplicación de este método consiste en dibujar, a la misma escala, la reproducción esquemática del fotograma (sustituyendo la coordenada medida $\Delta\rho$ por $\text{sen } \alpha$, y el ángulo φ por el θ hallados para cada interferencia) y el plano meridiano antes mencionado con las trazas de los nudos (campo de índices) y las notaciones, superponiendo los dos dibujos. Los puntos coincidentes tendrán los mismos índices. En la figura 22 (pág. 101) están representados los tres planos (100), (010) y (001) del retículo recíproco, con valores

$$a'_0 = \frac{1}{d_{100}} = \frac{1}{a_0}, \quad b'_0 = \frac{1}{d_{010}} = \frac{1}{b_0} \quad \text{y} \quad c'_0 = \frac{1}{d_{001}} = \frac{1}{c_0}$$

para las traslaciones primitivas y $\alpha' = \beta' = \gamma' = 90^\circ$. Supongamos que se trata de interpretar el fotograma Schiebold sobre la cara (010), obtenido siendo eje de giro c [001]. En la posición de reposo, el rayo incidente llega rasante a la cara (010) en dirección de [100]; si la amplitud del giro es de 25° , llegará un momento, cerca del límite del movimiento, en que la cara (120) pase a ocupar la posición de la (010); el plano del retículo recíproco determinado por el eje [001] y la fila normal a (120) (véase la figura), se desplazará hasta caer sobre los puntos señalados con cifras inclinadas sobre el plano ($b' c'$). Haciendo la superposición de este dibujo (*campo de índices*) sobre el esquema del fotograma dibujado a la misma escala, se leen inmediatamente los índices de las interferencias de éste. Como escala más conveniente, recomienda Schiebold la de 500 mm. para R_0 ; de modo que las dimensiones para a_0'' , b_0'' y c_0'' (traslaciones primitivas del retículo recíproco sobre el dibujo) serán para K_α

$$a_0'' = R_0 \text{ sen } \alpha_{100} = 14,85 \text{ mm.} \quad b_0'' = R_0 \text{ sen } \alpha_{010} = 14,38 \text{ mm.}$$

$$c_0'' = R_0 \text{ sen } \alpha_{001} = 25,75 \text{ mm.}$$

Por el método calculatorio, los valores absolutos de a , b , y c , que se designan por a_0 , b_0 y c_0 , nos sirven para calcular teóricamente los ángulos α , β y el período Roentgen d , que corresponden a caras de índices determinados, comparándolos luego con los valores α , β y d encontrados en las tablas; si concuerdan, los

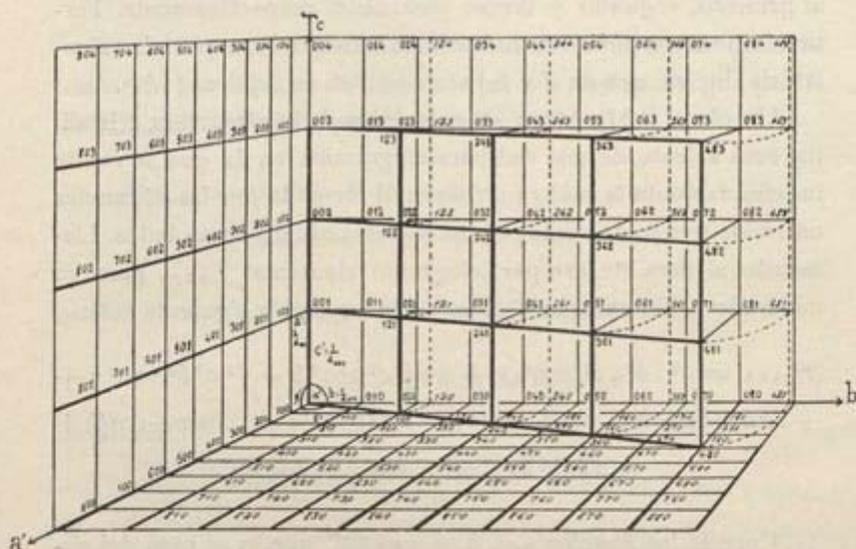


Fig. 22.—Esquema del retículo recíproco de las zonas cristalográficas $[100]$, $[010]$, $[001]$ de la epsomita, y de la variación de posición que experimenta el plano reticular formado por las caras de la zona $[2\bar{1}0]$ al girar hacia atrás 25° . Sobre el plano del fondo (zona $[100]$) están proyectados los nudos del $[2\bar{1}0]$ en los puntos por donde pasan al verificarse el giro.

planos reflectantes que han producido las rayas espectrales en el fotograma son los que poseen las notaciones indicadas. Pero esta comparación exige tener en cuenta una serie de condiciones que vamos a indicar a continuación. En este estudio de la epsomita hemos seguido un procedimiento mixto, gráfico y calculatorio.

CÁLCULO DE LOS VALORES α , β Y d PARA CARAS DETERMINADAS, PARTIENDO DE LOS VALORES ABSOLUTOS Y RELATIVOS DE LA RELACIÓN ÁXICA.—Los fotogramas de cristal giratorio nos permiten hallar el valor de α y d con bastante sencillez para las caras

que producen las rayas de la faja ecuatorial; para las adyacentes se complica el cálculo por la intervención del ángulo θ .

Determinadas las dimensiones del paralelepípedo fundamental a_0, b_0, c_0 , sus aristas serán iguales en el sistema rómbico en que cristaliza la epsomita, a los períodos Roentgen normales al primero, segundo y tercer pinacoide, respectivamente. Partiendo de estos períodos, hallaremos teóricamente, por vía calculatoria, los valores de d y θ para una cara cualquiera (hkl) .

Un plano (hkl) , según los principios de la estructura cristalina, será asiento de una red paralelográmica en la que se repite indefinidamente la malla fundamental formada por las distancias entre los tres nudos más próximos del conjunto como lados. Llamando al área de ese paralelogramo elemental $\mathcal{F}_{(hkl)}$, para su cuadrado la Geometría analítica da la expresión siguiente (12):

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_{(hkl)}^2 = & h^2 \cdot b^2 \cdot c^2 \operatorname{sen}^2 \alpha + k^2 a^2 c^2 \operatorname{sen}^2 \beta + l^2 a^2 b^2 \operatorname{sen}^2 \gamma + \\ & + 2hk \cdot abc^2 (\cos \alpha \cdot \cos \beta - \cos \gamma) + 2hla^2 b^2 c (\cos \gamma \cdot \cos \alpha - \cos \beta) + \\ & + 2kla^2 bc (\cos \beta \cdot \cos \gamma - \cos \alpha). \end{aligned}$$

Cuando los ángulos $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, que es el caso del sistema rómbico, la fórmula se reduce así:

$$\mathcal{F}_{(hkl)}^2 = h^2 b^2 c^2 + k^2 a^2 c^2 + l^2 a^2 b^2.$$

Si llamamos V_0 al volumen de la célula cristalina, o paralelepípedo elemental, cuya base sea el paralelogramo de la cara (hkl) , el valor de d para dicha cara será el cociente de dividir el volumen por el paralelogramo de la base, es decir,

$$d_{(hkl)} = \frac{abc}{V \mathcal{F}_{(hkl)}},$$

donde sustituyendo \mathcal{F}_{hkl}^2 por los valores antes indicados, tendremos:

$$d_{(hkl)} = \frac{V}{\sqrt{\mathcal{F}_{hkl}^2}} = \frac{abc}{\sqrt{h^2 b^2 c^2 + k^2 a^2 c^2 + l^2 a^2 b^2}} =$$

$$= \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 \frac{a^2}{b^2} + l^2 \frac{a^2}{c^2}}} = \frac{b}{\sqrt{h^2 \frac{b^2}{a^2} + k^2 + l^2 \frac{b^2}{c^2}}}$$

Por otra parte, el parámetro de una línea $[uvw]$, es decir, la traslación primitiva en la dirección $[uvw]$, que se designa por la letra $T_{[uvw]}$, está dada por la fórmula

$$T^2_{[uvw]} = a^2 u^2 + b^2 v^2 + c^2 w^2 + 2bc \cdot vw \cdot \cos \alpha +$$

$$+ 2ca \cdot wu \cdot \cos \beta + 2ab \cdot uv \cdot \cos \gamma,$$

que en el caso del sistema rómbico se simplifica así:

$$T^2_{[uvw]} = a^2 u^2 + b^2 v^2 + c^2 w^2,$$

de donde

$$T_{[uvw]} = \sqrt{a^2 u^2 + b^2 v^2 + c^2 w^2},$$

y la inclinación ϑ de una recta $[uvw]$ con respecto a un plano (hkl) es

$$\text{sen } \vartheta = \frac{V}{\mathcal{F}_{(hkl)} \cdot T_{[uvw]}} \cdot (hu + kv + lw).$$

Sustituyendo V_0 por su valor en el sistema rómbico, tenemos:

$$\text{sen } \vartheta = \frac{a \cdot b \cdot c}{\mathcal{F}_{(hkl)} \cdot T_{[uvw]}} \cdot (hu + kv + lw).$$

Según que empleemos valores $a : b : c$ de la relación áxica o $a_0 b_0 c_0$ de las constantes reticulares, obtendremos d_0 (absoluto) o d_r (relativo).

Ambos valores están relacionados por la fórmula $\frac{d_0}{d_r} = \frac{c_0}{c_r}$, y si conocemos c_0 y los demás datos relativos, d absoluto será $d_0 = \frac{d_r \cdot c_0}{c_r}$.

En resumen, para calcular los valores de d_{hkl} y ϑ_{hkl} de diferentes caras de la epsomita y ver si concuerdan con los hallados para las rayas de los fotogramas de cristal giratorio, hemos empleado las fórmulas siguientes, aplicables a los casos del sistema rómbico:

$$\text{I. } d_{hkl} = \frac{a \cdot b \cdot c}{\sqrt{h^2 b^2 c^2 + k^2 a^2 c^2 + l^2 a^2 b^2}}$$

$$\text{II. } \sin \vartheta = \frac{d_{hkl}}{T_{[uvw]}} (hu + kv + lw)$$

$$\text{III. } T_{[uvw]} = \sqrt{a^2 u^2 + b^2 v^2 + c^2 w^2}.$$

En estas fórmulas significan:

$a : b : c$, la relación áxica cristalográfica.

a_0, b_0, c_0 , la longitud real de las aristas del paralelepípedo elemental.

$[uvw]$, el símbolo de la zona del eje de giro.

(hkl) , el símbolo de la cara a determinar.

$d_{(hkl)}$, el período Roentgen relativo de la cara (hkl) .

$d_{0(hkl)}$, el período Roentgen absoluto de la cara (hkl) .

$T_{[uvw]}$, el parámetro del eje de giro.

ϑ , complemento del ángulo que forma el eje de giro con la normal a la cara (hkl) .

En cada fotograma formamos por separado un cuadro en el que, aplicando estas fórmulas, hallamos d y ϑ para cada una de las caras posibles. Como modelo, acompañamos a este trabajo la tabla formada para calcular las caras posibles en el espectrograma Schiebold según (OIO), siendo eje de giro $[100]$. A

este modelo (cuadro A) pueden referirse los de todos los espectrogramas.

Con las diversas caras que pueden existir en los espectros adyacentes, y en orden creciente del índice l , formamos la primera columna del cuadro A; la segunda, tercera, cuarta y quinta son el desarrollo de la fórmula que resulta de simplificar la I:

$$\log d_0 = \log b_0 - \log \sqrt{\frac{b^2}{a^2} h^2 + k^2 + \frac{b^2}{c^2} l^2}$$

que tenemos que aplicar en este caso para hallar el valor del período Roentgen, empleando d absoluto determinado en el espectro principal. En la columna sexta insertamos el valor de d correspondiente a cada cara; en las columnas séptima, octava y novena desarrollamos la fórmula II, simplificada:

$$\log \operatorname{sen} \vartheta = \log d_r + \log h - \log a$$

para averiguar el ángulo ϑ , y en la décima y última, el valor de éste, deducido del logaritmo del seno que nos da la columna no-

vena, ($\operatorname{sen} \vartheta = \frac{d_r}{T_{100}} \times k$).

Obsérvese que para las caras cuyos índices son múltiplos de otra (caras paralelas) no hace falta calcular el ángulo ϑ , porque será el mismo; respecto de d , tampoco es necesario el cálculo, porque está en razón inversa: a índices dobles, período Roentgen

mitad; así, la cara 440 tendrá un valor $d = \frac{1}{2} d_{220} = \frac{1}{4} d_{110}$.

Antes de examinar los dos cuadros A y B para confrontar los valores de d y ϑ medidos sobre la placa con los que acabamos de calcular, es preciso cerciorarnos que bajo el ángulo ϑ que el cálculo nos da en cada cara, el α que ha de formar la placa con el rayo incidente para que aparezca la interferencia correspondiente, cae dentro del límite de giro que hemos realizado;

una sencilla proyección estereográfica nos sirve de auxiliar a este fin.

COMPARACIÓN DE LOS VALORES d Y ϑ CALCULADOS ANALÍTICAMENTE CON LOS DETERMINADOS MIDIENDO LAS COORDENADAS EN LOS FOTOGRAMAS.—Comparando los valores de d entre sí, las divergencias de las medidas y del cálculo no deben pasar, para que los resultados sean aceptables, de tres unidades en la segunda decimal. El valor de ϑ en los espectros adyacentes muy alejados del ecuador, es difícil de fijar con exactitud por la oblicuidad de las rayas respecto al plano del azimut, y por la consiguiente imprecisión del punto que hacemos coincidir con el retículo del microscopio en la lectura: por esto se tolera un margen de error bastante considerable.

En nuestro trabajo hemos compensado los errores, en parte, hallando la media aritmética de las rayas simétricas a uno y otro lado de la serie espectral del ecuador y, en parte también, por la comparación con los valores de K_{β} cuando existen las dos líneas α y β . Por esta razón, en los cuadros VII a IX no representamos más que la mitad de un fotograma, y los valores d y ϑ medidos se refieren a la mencionada media aritmética. La primera columna de todos esos cuadros contiene los índices de los planos reticulares a que corresponden d y ϑ calculados y que, por lo tanto, son también los índices de los planos reflectantes, que en nuestros fotogramas han dado los espectros de igual valor para d y ϑ . Las figuras 23 a 28 son esquemas en tamaño algo aumentado de los fotogramas Schiebold de la epsomita, con indicación, al lado de cada raya, de los índices de los planos reflectantes hallados según las indicaciones que anteceden; el grueso de las líneas está en relación con la intensidad relativa: por eso las rayas K_{β} son siempre más débiles que las correspondientes K_{α} ; un corchete liga en algunos casos que pudieran ofrecer duda la línea K_{β} a su K_{α} respectiva. Correspondiendo a estas figuras se insertan los cuadros VII a IX. Al cuadro X no acompaña esquema: se trata de un fotograma asimétrico; los espectros de la cara (420) siguen

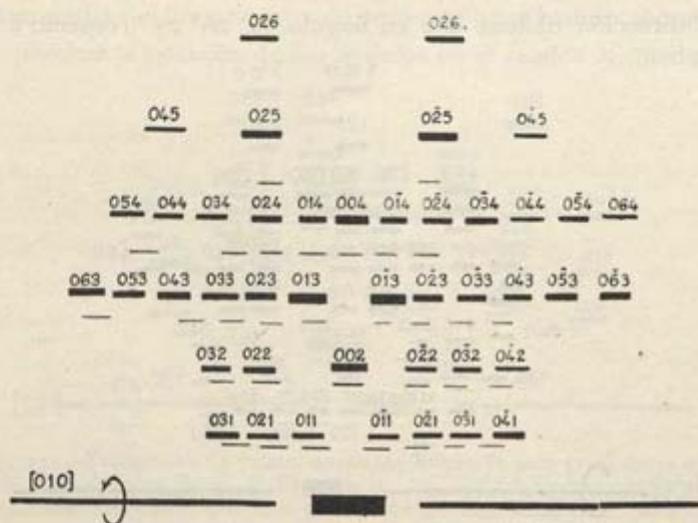


Fig. 23.—Fotograma de cristal oscilante según la cara (001) de la epsomita. Eje de giro [010].—Indicación de los índices correspondientes a los planos reticulares que han producido las interferencias. (Aumento: 1,5.)

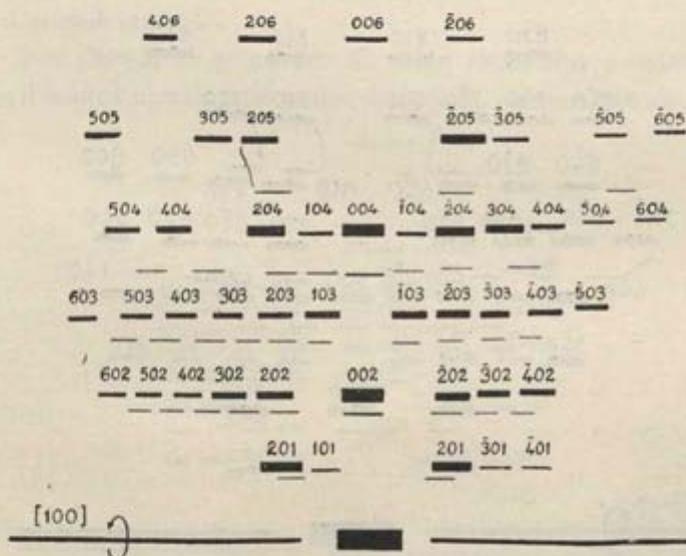


Fig. 24.—Fotograma de cristal oscilante según la misma cara (001) de la epsomita, pero siendo eje de giro [100].—Indicación de los índices correspondientes a los planos reticulares que han producido las interferencias. (Aumento: 1,5.)

una dirección oblicua con un ángulo de $26^{\circ} 25'$ respecto a la

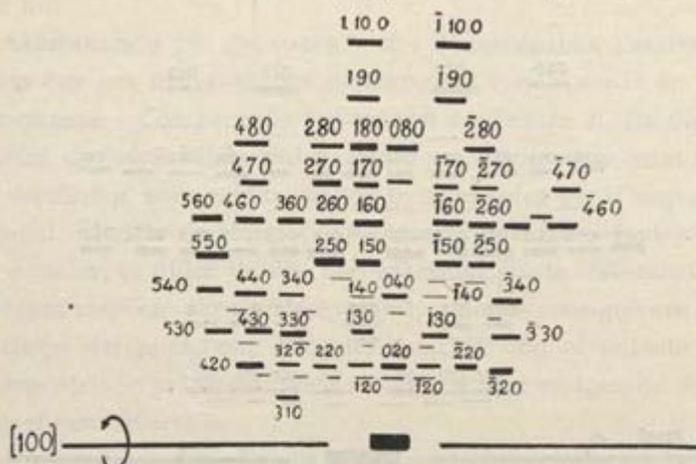


Fig. 25.—Fotograma de cristal oscilante según la cara (010) de la epsomita. Eje de giro [100]. Indicación de los índices correspondientes a los planos reticulares que han producido las interferencias. (Aumento: doble tamaño.)

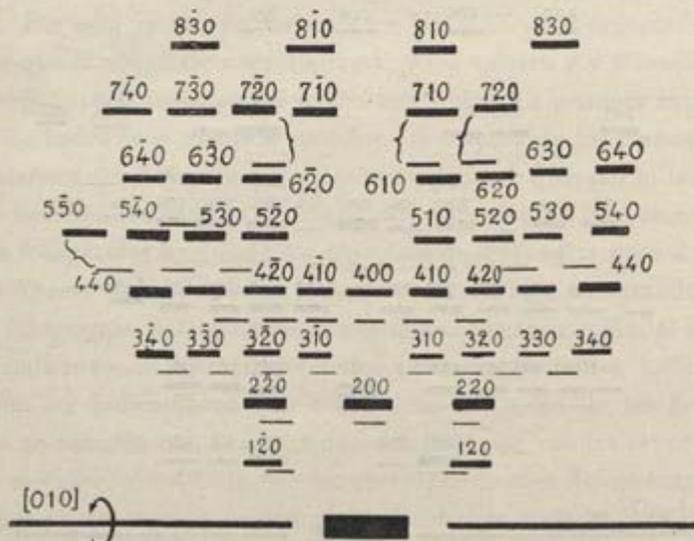


Fig. 26.—Fotograma de cristal oscilante según la cara (100) de la epsomita.—Eje de giro [010].—Indicación de los índices correspondientes a los planos que han producido las interferencias. (Aumento: doble tamaño.)

línea media del fotograma; y de aquí que haya habido necesidad de precisar la posición de los ángulos en el cuadro X, mediante

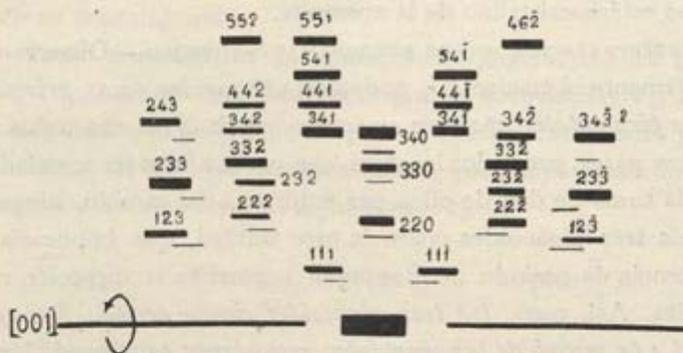


Fig. 27.—Fotograma de cristal oscilante según la cara (110) de la epsomita. Eje de giro [001]. Indicación de los índices correspondientes a los planos reticulares que han producido las interferencias. (Aumento: doble tamaño.)

los signos + o - para designar si se hallan a un lado u otro del azimut indicado.

Por último, en el cuadro XI están resumidos y ordenados los distintos planos reflectantes del cristal, que nos han dado es-

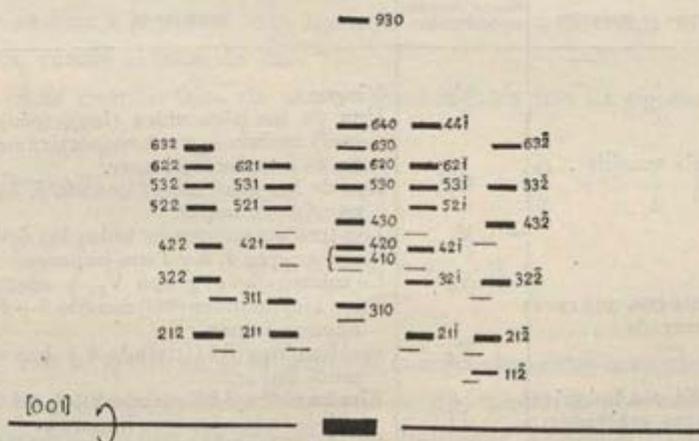


Fig. 28.—Fotograma de cristal oscilante según la cara (210) de la epsomita. Eje de giro [001]. Indicación de los índices correspondientes a los planos que han producido las interferencias. (Aumento: 1,5.)

pectros en los roentgenogramas. A la vista de este cuadro podemos interpretar la regularidad de las extinciones y deducir el grupo estérocristalino de la epsomita.

INTERPRETACIÓN DE LOS FOTOGRAMAS SCHIEBOLD.—Observando atentamente el cuadro XI, podemos ver que las *caras prismáticas y piramidales aparecen en serie normal*: caras con todos los índices pares, con todos impares, con pares e impares mezclados, con la suma de dos de ellos par e impar. En cambio, ninguno de los tres pinacoides posee la cara unidad, que implicaría la existencia de período de Roentgen normal en la dirección respectiva. Así, pues, *los tres pinacoides tienen período Roentgen igual a la mitad de las constantes reticulares*: esta condición la ofrece en el sistema rómbico, dentro de la *clase esfenoidica*, el grupo estérocristalino número 19 que se designa con el nombre de *dihelicoidal* y se representa por V_4 (véase el cuadro inserto a continuación).

Extinciones características de los grupos estéreo-cristalinos que comprende la clase rómbica biesfenoidica.

Grupo de traslación	Grupo estéreo-cristalino	Extinciones.
Célula sencilla	V_1	Ninguna.
	V_2	Uno de los pinacoides ($h00$), ($0k0$) o ($00l$) cuando h , k o l , respectivamente, es un número impar.
	V_3	Dos de los pinacoides, cuando h , k o l es número impar.
Célula con una cara centrada	V_4	Los tres pinacoides en todos los órdenes en que h , k y l son impares.
	V_5	Lo mismo que el grupo V_2 , y además los biesfenoides (hkl) cuando $h+k$ = número impar.
Célula con todas las caras centradas	V_6	Biesfenoides (hkl) cuando $h+k$ = número impar.
	V_7	Biesfenoides (hkl) cuando $h+k$, o $h+l$, o $k+l$ son números impares.
Célula de cuerpo centrado	V_8 V_9	Biesfenoides cuando la suma de los tres índices ($h+k+l$) es número impar.

Esta es, por consiguiente, la simetría que posee la célula cristalina de la epsomita, *completamente de acuerdo con la simetría externa cristalográfica.*

GRUPO SIMÉTRICO DE LA EPSOMITA, $\text{SO}_4\text{Mg}\cdot 7\text{H}_2\text{O}$.—El grupo simétrico número 19, designado por la abreviación V_4 , a que hemos visto que pertenece la epsomita, está caracterizado por la existencia de 12 ejes binarios helicogiros, cuya posición está fijada por las coordenadas siguientes (12):

$$\begin{array}{cccc} [\text{OOI}]_0 \frac{1}{4} & [\text{OOI}]_{\frac{1}{2}} \frac{3}{4} & [\text{OOI}]_{\frac{1}{2}} \frac{1}{4} & [\text{OOI}]_0 \frac{3}{4} \\ \frac{1}{4}^\circ [\text{OIO}] & \frac{3}{4} \frac{1}{2} [\text{OIO}] & \frac{3}{4}^\circ [\text{OIO}] & \frac{1}{4} \frac{1}{2} [\text{OIO}] \\ [\text{IOO}]_0 \frac{1}{4} & [\text{IOO}]_{\frac{1}{2}} \frac{3}{4} & [\text{IOO}]_0 \frac{3}{4} & [\text{IOO}]_{\frac{1}{2}} \frac{1}{4} \end{array}$$

En la figura 29 representamos en esquema la forma característica del paralelepípedo elemental, con indicación de los ejes y de su posición relativa. En el dibujo aparecen 18 ejes; pero de ellos, 12 pertenecen a la vez a dos paralelepípedos contiguos, por estar en el plano de contacto, y por lo tanto, el número se reduce a la mitad; con los seis interiores a la célula cristalina, suman el total de 12.

Las coordenadas de puntos equivalentes son las siguientes:

$$\begin{aligned} [mnp] \quad & [\bar{m}, \bar{n} + \frac{1}{2}, \bar{p} + \frac{1}{2}] \quad [m + \frac{1}{2}, n + \frac{1}{2}, \bar{p}] \\ & [m + \frac{1}{2}, \bar{n}, \bar{p} + \frac{1}{2}]. \end{aligned}$$

Por lo tanto, en el espacio del cuerpo elemental la existencia de un punto determinado supone la de otros tres equivalentes relacionados por las coordenadas indicadas. El grado de independencia es 3, lo cual quiere decir que un punto puede desplazarse en el interior de la célula en cualquier dirección sin alterar

la simetría, siempre que los otros tres ligados por las coordenadas indicadas sufran la misma traslación para conservar la equivalencia.

Teniendo en cuenta que el número de moléculas de $\text{SO}_4\text{Mg} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ contenidas en la célula es 4 (pág. 98), lo que hace un to-

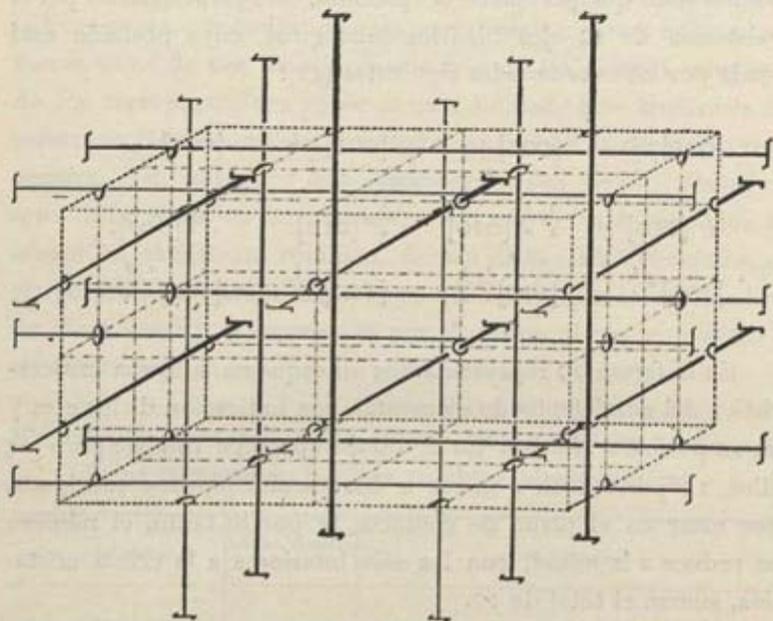
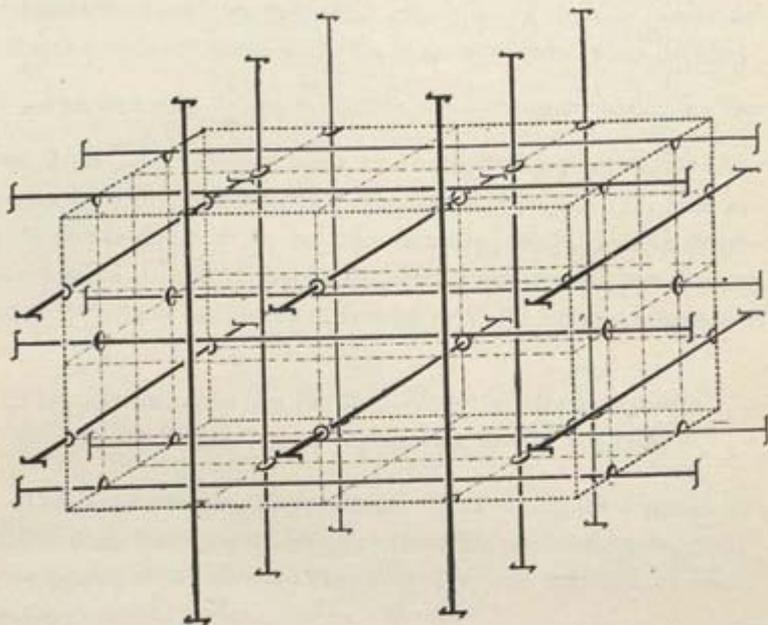


Fig. 29.—Célula cristalina de la epsomita con sus dimensiones relativas y elementos de simetría.

tal de 28 de agua repartidas en grupos de siete alrededor de las correspondientes de SO_4Mg , es difícil resolver el problema de su distribución, especialmente con respecto a los núcleos de sulfato magnésico; no tenemos datos bastantes para prejuzgar la colocación: el número excesivo de H_2O , 7, impar y primo, dificulta las hipótesis sobre la posición interna estéreo-química. Probablemente los grupos de SO_4 y los Mg estarán constituidos como en otros sulfatos, en forma de tetraedro, cuyo interior ocupa el átomo de azufre, y los vértices, los cuatro oxígenos; tal vez los magnesios

formen una red intercalar con los cuatro átomos correspondientes a cada cuerpo elemental. Respecto al agua, no puede prejugarse la situación de las siete moléculas, aunque deben de inter-



La figura 29, por estar del revés en el texto (pág. 112), debe ser substituída por ésta.

química es relativamente considerable, y por esta razón decidimos hacer en ellas el estudio.

Como en la cristalización del sulfato magnésico para obtener cristales puros, habíamos observado la tendencia a las formas fibrosas siempre que la precipitación es rápida o en la disolución existen sustancias extrañas suspendidas, sospechamos que

la simetría, siempre que los otros tres ligados por las coordenadas indicadas sufran la misma traslación para conservar la equivalencia.

magnésico, no tenemos datos bastantes para prever la colocación: el número excesivo de H_2O , 7, impar y primo, dificulta las hipótesis sobre la posición interna estéreo-química. Probablemente los grupos de SO_4 y los Mg estarán constituidos como en otros sulfatos, en forma de tetraedro, cuyo interior ocupa el átomo de azufre, y los vértices, los cuatro oxígenos; tal vez los magnesios

formen una red intercalar con los cuatro átomos correspondientes a cada cuerpo elemental. Respecto al agua, no puede juzgarse la situación de las siete moléculas, aunque deben de jugar papel importantísimo en la estructura, ya que la pérdida de una tan sólo, lleva consigo el cambio de clase y de sistema cristalinos (el sulfato magnésico exahidratado es monoclinico). Otra causa que contribuye a esta dificultad reside en el elevado grado de independencia de sus puntos. En el ámbito de la esfera de libertad, que alcanza a $\frac{V}{8} = \frac{a}{2} \times \frac{b}{2} \times \frac{c}{2}$, puede variar en las tres direcciones la posición de un punto, conservándose sin alteración la relación simétrica indicada en la página 111. Sólo un tanteo en la elección de las coordenadas $[[mnp]]$ podría orientarnos si, al aplicar el factor de estructura, concordase con el grado de intensidad de las diferentes rayas de los diagramas.

Determinación de la dirección de alargamiento en los cristales de epsomita de Calatayud.

Una vez hecha la interpretación analítica de los cristales de sulfato magnésico eptahidratado obtenidos artificialmente, réstanos comprobar las direcciones de crecimiento máximo, es decir, de alargamiento de los cristales naturales.

El ensayo lo hemos hecho en ejemplares españoles de epsomita procedentes del yacimiento de Calatayud.

La epsomita de Calatayud llama la atención por el aspecto tan bello de las largas fibras aciculares, de brillo sedoso, agrupadas en paquetes o haces; el grado de pureza en la composición química es relativamente considerable, y por esta razón decidimos hacer en ellas el estudio.

Como en la cristalización del sulfato magnésico para obtener cristales puros, habíamos observado la tendencia a las formas fibrosas siempre que la precipitación es rápida o en la disolución existen sustancias extrañas suspendidas, sospechamos que

éstas deben de ser las condiciones que encontraría la epsomita al formar los depósitos de cristales en forma de fibras. Tratamos de comprobar al microscopio, por la dirección del plano de los ejes ópticos y las bisectrices, cuál sería el sentido del alargamiento; pero la imperfección de los cristales y su extraordinaria finura nos dificultaban el examen.

Entonces acudimos al análisis roentgenográfico. Tomamos de un haz de aquellas finísimas agujas, con el mayor cuidado posible, una pequeña porción en que los individuos aparecían sensiblemente paralelos. Ya que una aguja aislada (que sería lo ideal) se hace tan difícil de separar, nos conformamos con un fino haz paralelo.

En una cámara de Debye-Scherrer colocamos las agujas, fijándolas en el centro de modo que al girar el eje realizasen una rotación sobre sí mismas, coincidiendo el eje de giro con el de alargamiento de las agujas de epsomita.

El giro, completo = 360° . Empleamos tubo Roentgen con anticátodo de cobre, 40 kilovoltios de tensión y 10 miliamperios de corriente. Tiempo de exposición: hora y media.

En el film apareció un diagrama de Polanyi o de *líneas estratificadas*, tan perfecto, que pudimos medir sin dificultad la separación entre las cinco series de líneas (una central, ecuador z_0 , y dos laterales, z_1 y z_2). En cada serie las rayas no resultan sino groseramente paralelas, debido a que tampoco lo estaban entre sí con precisión las agujas de epsomita; además alcanzaban número extraordinario, como rayas pertenecientes a las distintas caras pinacoidales y prismáticas de los varios cristales aciculares sometidos al giro.

La distancia entre las series estratificadas de primera clase es de $z_1 = 5,73$ mm. y de $z_2 = 12,50$; como el radio de la cámara Debye-Scherrer $R = 25$ mm., resulta que el ángulo ρ_R deducido de $\cot \rho_R = \frac{z_n}{R}$ sería igual a $77^\circ 4'$ para la línea estratificada z_1 y $59^\circ 58'$ para z_2 .

Aplicando la fórmula de Laue $h\lambda = T \cos \rho_R$, resulta que:

$$T = \frac{h\lambda}{\cos \rho_R} = 6,87 \text{ \AA},$$

en la cual T = período de traslación, h = número de orden como n en la fórmula de Bragg y ρ_R es el ángulo del cono que forman los rayos difractados por las filas reticulares de dirección T .

La traslación primitiva en la dirección del eje del giro o de alargamiento de las agujas de epsomita nos da el valor 6,87 Å, que concuerda con el de c absoluto del paralelepípedo elemental, quedando probado que las agujas del mineral tienen el alargamiento según el eje c (traslación $T_{[001]}$), que es, según hemos visto en páginas anteriores, la dirección de máxima velocidad de crecimiento de los cristales.

RESUMEN

Como resultado del estudio que hemos expuesto en las páginas anteriores, podemos establecer las conclusiones siguientes:

1.^a La *simetría interna* del paralelepípedo elemental de la epsomita concuerda perfectamente con la *simetría cristalográfica externa*.

2.^a La *misma concordancia existe entre las constantes reticulares* en las tres direcciones principales a_0 , b_0 , c_0 , de la célula cristalina o cuerpo elemental y la *relación áxica de los cristales*: se trata de un mineral rómbico pseudotetragonal por la analogía de la traslación primitiva en las direcciones a y b , siendo en cambio, la traslación en c , considerablemente más corta:

$$a_0 = 11,91 \text{ \AA}; \quad b_0 = 12,02 \text{ \AA}; \quad c_0 = 6,87 \text{ \AA}.$$

3.^a Considerando los planos reflectores, muy numerosos en los fotogramas, se deduce que *el periodo Roentgen es normal en todas las caras, excepto las pinacoidales: en éstas el periodo es igual a la mitad de las traslaciones respectivas de la misma dirección.*

4.^a En consonancia con la anormalidad de los periodos Roentgen en las tres direcciones *a*, *b* y *c*, el grupo simétrico de la epsomita corresponde, dentro de la clase esenoídica del sistema rómbico, al designado por V_4 , que posee un paralelepípedo elemental sencillo con ejes binarios todos helicogiros, en número de 12; en su interior todo punto posee otros tres equivalentes y tres grados de libertad.

5.^a *El número de moléculas contenidas en la célula cristalina es de cuatro, y por lo tanto, encierra 28 moléculas de agua.*

6.^a *La dirección del alargamiento de los cristales de epsomita, cuando éstos adoptan la forma fibrilar o acicular, es la del eje c cristalográfico.*

Cuadro A.—MODELO DE CUADRO PARA EL CÁLCULO DE LOS VALORES DE d Y DE θ . EJEMPLO: FOTOGAMA SCHIEBOLD SEGÚN (010), SIENDO [100] EJE DE GIRO.

Indices	$\frac{b^2}{a^2} h^2 + k^2$	$\log \left(\frac{b^2}{a^2} h^2 + k^2 \right)$	$\log \sqrt{\frac{b^2}{a^2} h^2 + k^2}$ = $\log \sqrt{N}$	$\frac{\log b_0}{\log \sqrt{N}} = \log d_0$	d_{0ax}	$\frac{\log b_{rel}}{\log \sqrt{N}} = \log d_{rel}$	$\frac{\log d_{rel}}{\log h}$	$\frac{\log d_{rel}}{\log h} + \log \operatorname{sen} \theta$	θ
110	02,0201	0,3053	0,1526	0,9274	8,460	9,8474	9,8474	9,8517	45° 16'
120	05,0201	0,7007	0,2503	0,7296	5,365	9,6497	9,6497	9,6540	26 48
130	10,0201	1,0009	0,5004	0,5795	3,797	9,4996	9,4996	9,5039	18 36
140	17,0201	1,2310	0,6155	0,4644	2,914	9,3845	9,3845	9,3888	14 10
150	26,0201	1,4153	0,7076	0,3722	2,356	9,2924	9,2924	9,2967	11 26
160	37,0201	1,5684	0,7842	0,2957	1,975	9,2158	9,2158	9,2201	9 34
170	50,0201	1,6991	0,8495	0,2303	1,700	9,1505	9,1505	9,1548	8 12
180	65,0201	1,8130	0,9065	0,1734	1,491	9,0935	9,0935	9,0978	7 12
190	82,0201	1,9139	0,9569	0,1229	1,327	9,0431	9,0431	9,0474	6 24
1.10.0	101,0201	2,0044	1,0022	0,0777	1,196	8,9978	8,9978	9,0021	5 46
230	13,0804	1,1166	0,5583	0,5218	3,325	9,4417	9,4417	9,7470	33 57
250	29,0804	1,4636	0,7318	0,3482	2,229	9,2682	9,2682	9,5735	22 00
270	53,0804	1,7249	0,8624	0,2175	1,650	9,1376	9,1376	9,4429	16 06
310	10,1809	1,0077	0,5038	0,5763	3,770	9,4962	9,4962	9,9776	71 46
320	13,1809	1,1199	0,5599	0,5202	3,312	9,4401	9,4401	9,9215	56 34
340	25,1809	1,4011	0,7005	0,3795	2,396	9,2995	9,2995	9,7809	37 08
420	20,3216	1,3079	0,6539	0,4262	2,668	9,3461	9,3461	9,9482	63 42
430	25,3216	1,4035	0,7017	0,3784	2,390	9,2983	9,2983	9,9004	53 25
470	65,3216	1,8151	0,9075	0,1725	1,487	9,0925	9,0925	9,6946	30 00
530	34,5025	1,5378	0,7689	0,3112	2,047	9,2311	9,2311	9,9301	59 18
540	41,5025	1,6181	0,8090	0,2711	1,866	9,1910	9,1910	9,8900	51 38
560	61,5025	1,7889	0,8944	0,1856	1,533	9,1056	9,1056	9,3689	40 06
230	.....	.....	.....	1/2 110 =	4,230	.....	.....	.....	45 16
260	.....	.....	.....	1/2 130 =	1,898	.....	.....	.....	18 36
280	.....	.....	.....	1/2 140 =	1,457	.....	.....	.....	14 10
460	.....	.....	.....	1/2 230 =	1,662	.....	.....	.....	33 57

Trab. del Mus. Nac. de Cienc. Nat. de Madrid.—Ser. Geol., núm. 37.—1930.

Cuadro B.—EJEMPLO DE DETERMINACIÓN DE d , α Y β PARTIENDO DE LAS COORDENADAS POLARES Y APLICANDO LA FÓRMULA DE BRAGG, FOTOGAMA SEGÚN (101); EJE DE GIRO [100], $R = 39,21$ MM.—ANTICÁTRON DE MOLIBDENO.

N.º	$\Delta\phi$	$\angle\psi$	$\log \Delta\rho$	$\frac{\log \Delta\rho - \log R = \log tg 2\alpha}{\log R}$	2α	α	$\log \cos \alpha$	$\log \operatorname{sen} \varphi$	$\log \operatorname{sen} \beta$	β	d en Å
1	4,1	100° 00'	0,6128	9,0194	5° 58'	2° 59'	9,9993	9,6449	9,6442	26 10	6,05
2	4,6	00 00	0,6628	9,0594	6 41	3 21	9,9991	9,6449	9,6440	26 08	6,055
3	8,3	00 00	0,9191	9,3257	11 57	5 59	9,9986	9,5060	9,5046	18 38	3,02
4	10,5	00 00	1,0777	9,3843	13 37	6 48	9,9983	9,5060	9,5043	18 38	2,99
5	19,3	00 00	1,2856	9,6922	26 12	13 06	9,9970	9,3986	9,3956	14 24	1,40
6	20,3	00 00	1,3075	9,7141	27 22	13 41	9,9963	9,2883	9,2846	12 06	1,50
7	4,6	26 12	0,6628	9,0594	6 41	3 21	9,9993	9,6449	9,6442	26 10	6,05
8	5,2	26 12	0,7160	9,1226	7 34	3 47	9,9991	9,6449	9,6440	26 08	6,05
9	6,6	18 42	0,8195	9,2261	9 34	4 47	9,9986	9,5060	9,5046	18 38	4,24
10	7,4	18 42	0,8692	9,2758	10 42	5 21	9,9983	9,5060	9,5043	18 38	2,905
11	9,8	14 30	0,9912	9,3978	14 02	7 01	9,9970	9,3986	9,3956	14 24	2,905
12	11,0	11 12	1,0414	9,4480	15 40	7 50	9,9963	9,2883	9,2846	12 06	2,32
13	12,2	11 12	1,0864	9,4930	17 18	8 39	9,9955	9,2883	9,2838	11 05	2,36
14	14,7	8 48	1,1673	9,5739	20 34	10 17	9,9936	9,1846	9,1782	8 40	1,98
15	17,5	8 06	1,2430	9,6496	24 02	12 01	9,9912	9,1489	9,1401	7 56	1,70
16	23,5	6 12	1,3711	9,7777	30 56	15 28	9,9853	9,0334	9,0187	6 00	1,325
17	27,5	5 54	1,4393	9,8459	35 02	17 31	9,9810	9,0120	8,9930	5 39	1,175
18	6,6	45 42	0,8195	9,2261	9 34	4 47	9,9986	9,5060	9,5043	18 35	4,22
19	11,5	22 06	1,0607	9,4673	16 20	8 10	9,9960	9,5754	9,5714	21 53	2,22
20	13,1	22 06	1,1173	9,5239	18 28	9 14	9,9949	9,5754	9,5703	21 50	2,23
21	13,6	18 54	1,1335	9,5401	19 08	9 34	9,9945	9,5104	9,5049	18 39	1,89
22	15,5	18 54	1,1903	9,5969	21 34	10 47	9,9929	9,5104	9,5033	18 35	1,89
23	18,2	15 11	1,2601	9,6667	24 54	12 27	9,9906	9,4181	9,4087	14 51	1,64
24	21,1	14 12	1,3243	9,7309	28 18	14 09	9,9878	9,3897	9,3775	13 48	1,45
25	8,0	37 12	0,9931	9,3097	11 32	5 46	9,9980	9,9246	9,9226	56 48	3,32
26	10,1	46 24	1,0004	9,4070	14 20	7 10	9,9960	9,8598	9,8567	45 58	2,835
27	10,7	37 12	1,0293	9,4359	15 14	7 37	9,9965	9,7815	9,7780	36 52	2,37
28	12,1	37 12	1,0828	9,4894	17 10	8 35	9,9956	9,7815	9,7771	36 46	2,37
29	16,5	27 18	1,2175	9,6241	22 50	11 25	9,9921	9,6615	9,6536	26 46	1,785
30	18,2	35 12	1,2601	9,6667	24 54	12 27	9,9906	9,7607	9,7513	34 20	1,65
31	20,7	31 54	1,3160	9,7226	27 50	13 55	9,9882	9,7230	9,7112	30 57	1,47

Cuadro I.—LAUEDIAGRAMA DE LA EPSOMITA SEGÚN LA CARA (100). COORDENADAS, ÍNDICES E INTENSIDAD RELATIVA DE LOS PUNTOS.

N.º de orden	$\angle \varphi$	$\angle \alpha$	Índices	Intensidad	N.º de orden	$\angle \varphi$	$\angle \alpha$	Índices	Intensidad	N.º de orden	$\angle \varphi$	$\angle \alpha$	Índices	Intensidad
1	0° 00'	7° 00'	190	5	21	28° 00'	15° 35'	3.10.3	5	41	72° 00'	14° 10'	347	4
2	0 00	8 45	170	2	22	30 00	11 50	293	3	42	80 00	14 40	327	5
3	0 00	12 20	150	4	23	22 00	6 45	192	5	43	85 30	14 50	317	5
4	0 00	14 00	3.13.0	5	24	24 00	7 10	182	5	44	40 45	7 45	163	5
5	0 00	15 10	140	4	25	27 00	7 50	172	5	45	46 00	8 40	153	5
6	0 00	16 20	3.11.0	5	26	31 00	8 50	162	1	46	53 00	9 25	143	1
7	0 00	17 10	3.10.0	5	27	35 45	10 05	152	3	47	00 00	10 15	133	4
8	9 30	12 10	2.10.1	4	28	41 00	11 30	142	3	48	69 00	10 50	123	4
9	11 30	13 30	291	4	29	44 75	12 15	274	5	49	74 00	12 10	236	5
10	17 15	14 45	3.11.2	5	30	49 30	13 15	132	4	50	79 30	11 30	113	4
11	19 00	16 15	3.10.2	5	31	00 00	11 30	160	5	51	84 00	12 25	216	5
12	10 00	12 45	3.11.1	5	32	53 45	13 50	254	4	52	90 00	11 50	103	2
13	10 30	15 25	3.10.1	5	33	60 30	14 30	122	5	53	54 00	7 20	154	2
14	10 00	7 10	1.10.1	3	34	51 00	12 15	275	5	54	07 30	8 15	134	1
15	12 00	7 40	181	3	35	55 00	13 00	265	5	55	74 00	8 35	124	3
16	14 00	8 35	171	5	36	60 30	12 15	255	5	56	90 00	8 50	104	1
17	16 00	9 50	161	2	37	65 30	12 45	245	4	57	55 00	6 30	165	5
18	21 00	12 15	292	5	38	70 30	13 15	235	5	58	66 00	6 30	145	2
19	23 00	14 00	141	4	39	77 00	13 30	225	5	59	77 30	6 50	125	2
20	26 30	15 30	3.11.3	5	40	83 45	13 50	215	4					

Cuadro II.—LAUEDIAGRAMA DE LA EPSOMITA SEGÚN LA CARA (010). COORDENADAS, ÍNDICES E INTENSIDAD RELATIVA DE LOS PUNTOS.

N.º de orden	Ángulo φ	Ángulo α	Índices	Intensidad.	N.º de orden	Ángulo φ	Ángulo α	Índices	Intensidad.	N.º de orden	Ángulo φ	Ángulo α	Índices	Intensidad.	N.º de orden	Ángulo φ	Ángulo α	Índices	Intensidad.
1	0° 00'	6° 30'	910	5	28	33° 00'	11° 25'	823	2	56	86° 00'	13° 50'	149	5					
2	0 00	6 55	810	5	29	36 30	12 30	723	4	57	41 00	8 45	10.2.5	4					
3	0 00	7 50	710	3	30	49 00	15 35	946	5	58	55 00	10 20	625	3					
4	0 00	9 05	610	3	31	56 00	17 05	746	5	59	60 00	10 55	525	3					
5	0 00	10 00	11.2.0	5	32	41 00	12 05	14.4.7	5	60	65 15	11 25	425	5					
6	0 00	10 50	5.1.0	4	33	44 00	13 00	935	5	61	71 00	11 50	325	5					
7	0 00	12 30	13.3.0	4	34	51 30	14 30	947	5	62	77 00	12 15	225	5					
8	0 00	13 30	410	5	35	60 00	15 35	747	4	63	83 15	12 25	125	3					
9	0 00	14 25	11.3.0	5	36	76 00	17 20	347	5	64	90 00	12 30	025	5					
10	0 00	17 45	310	5	37	85 45	17 40	147	5	65	32 00	5 45	813	3					
11	8 00	13 30	12.3.1	4	38	20 00	5 15	10.1.2	4	66	41 00	6 55	613	3					
12	9 00	9 45	11.2.1	5	39	24 30	6 20	812	5	67	46 00	7 40	513	5					
13	10 00	10 40	10.2.1	5	40	26 30	7 00	712	5	68	51 30	8 20	413	3					
14	12 30	13 10	821	5	41	30 00	7 55	612	2	69	60 00	9 10	313	3					
15	14 30	16 20	13.4.2	5	42	34 30	9 00	512	4	70	69 00	9 45	213	4					
16	16 00	6 35	911	5	43	38 00	9 40	924	4	71	79 00	10 15	113	4					
17	14 00	7 35	711	3	44	41 00	10 25	412	4	72	90 00	10 25	013	1					
18	16 00	8 45	611	3	45	45 00	11 10	724	2	73	53 45	6 30	514	2					
19	19 00	10 20	511	3	46	49 00	11 55	312	4	74	66 00	7 15	314	3					
20	21 00	11 20	922	4	47	52 15	12 55	836	4	75	74 00	7 40	214	1					
21	23 45	12 25	411	4	48	56 00	12 55	736	4	76	83 00	7 50	114	4					
22	25 30	13 55	11.3.3	4	49	60 00	13 30	212	5	77	89 30	7 55	014	1					
22'	26 45	13 45	722	4	50	63 45	14 00	536	4	78	75 00	8 50	327	5					
23	27 30	15 00	10.3.3	5	51	69 00	14 30	436	5	79	90 00	9 00	027	5					
24	30 00	15 30	311	5	52	73 45	15 05	112	5	80	77 00	6 10	215	2					
25	43 00	14 45	11.4.6	5	53	79 00	15 20	236	5	81	69 00	5 55	315	4					
26	24 00	9 30	11.2.3	5	54	84 00	15 25	136	5	82	50 00	6 30	614	3					
27	28 00	9 45	10.2.3	4	55	90 00	15 40	012	5	83	36 30	6 20	713	2					

Cuadro III.—LAUEDIAGRAMA DE LA EPSOMITA SEGUN UNA SECCION OBLICUA 4° 30' CON LA CARA (010). COORDENADAS, INDICES E INTENSIDAD RELATIVA DE LOS PUNTOS.

N.º de orden	Ángulo φ	Ángulo α	Índices	Intensidad.	N.º de orden	Ángulo φ	Ángulo α	Índices	Intensidad.	N.º de orden	Ángulo φ	Ángulo α	Índices	Intensidad.
1	0° 00'	4° 45'	610	5	25	54° 30'	14° 45'	10.6.9	5	49	68° 00'	8° 15'	213	4
2	0 00	6 30	510	5	26	21 45	9 50	11.1.2	5	50	78 00	9 25	113	5
3	0 00	9 15	410	5	27	30 00	4 00	612	5	51	88 00	10 30	013	3
4	0 00	11 10	720	3	28	34 15	5 25	512	3	52	99 30	11 10	113	3
5	0 00	11 50	10.3.0	5	29	41 00	7 05	412	4	53	110 00	11 00	213	5
6	0 00	13 15	310	5	30	44 00	8 00	724	4	54	127 45	10 55	413	4
7	0 00	15 05	11.4.0	5	31	48 00	9 05	312	4	55	132 45	10 40	513	5
8	8 45	10 15	11.3.1	5	32	54 30	10 25	524	5	56	138 00	10 15	613	5
9	9 30	11 45	10.3.1	5	33	59 00	11 15	212	5	57	152 00	9 50	713	5
10	10 15	13 30	931	5	34	02 45	12 30	536	5	58	155 00	9 30	813	3
11	17 15	14 25	11.4.2	5	35	54 00	8 00	625	5	59	148 00	9 20	913	4
12	11 30	9 10	821	3	36	59 00	8 45	525	5	60	66 00	5 40	314	5
13	16 30	4 55	611	3	37	63 30	9 35	425	5	61	74 00	6 25	214	3
14	19 00	6 10	511	1	38	69 30	10 15	325	5	62	89 45	7 55	014	3
15	20 30	7 15	922	5	39	75 00	11 10	225	5	63	105 30	8 50	214	3
16	23 15	8 35	411	4	40	81 45	12 00	125	3	64	125 00	9 05	514	3
17	26 00	9 55	722	3	41	88 30	12 30	025	3	65	129 00	9 00	614	5
18	29 30	11 55	311	5	42	95 15	13 00	125	5	66	132 00	8 40	714	5
19	41 00	8 35	914	5	43	120 00	12 45	525	5	67	160 45	9 15	13.1.2	4
20	32 00	13 00	11.4.4	5	44	127 30	12 40	725	5	68	168 30	10 15	13.1.1	5
21	32 15	7 45	823	4	45	137 15	11 30	10.2.5	5	69	102 00	6 10	215	4
22	36 30	9 00	723	4	46	46 00	4 30	513	4	70	109 00	4 55	315	5
23	24 00	10 10	912	5	47	51 30	5 45	413	3	71	165 15	12 20	711	5
24	49 30	11 45	523	5	48	59 30	7 00	313	3	72	77 00	5 05	215	5

Cuadro IV.—LAUEDIAGRAMA DE LA EPSOMITA SEGÚN LA CARA (001). COORDENADAS, ÍNDICES E INTENSIDAD RELATIVA DE LOS PUNTOS.

N.º de orden	Ángulo φ	Ángulo α	Índices	Intensidad.	N.º de orden	Ángulo φ	Ángulo α	Índices	Intensidad.	N.º de orden	Ángulo φ	Ángulo α	Índices	Intensidad.
1	78° 00'	9° 45'	2.10.1	3	25	21° 45'	9° 05'	10.4.1	5	49	0° 00'	13° 40'	701	3
2	77 30	10 30	291	1	26	24 00	9 50	941	1	50	0 00	15 50	601	3
3	76 00	11 50	281	4	27	26 15	10 55	841	3	51	85 15	8 05	1.12.1	2
4	73 00	9 25	3.10.1	2	28	29 15	12 00	741	2	52	84 45	9 00	1.11.1	5
5	71 00	10 15	391	5	29	29 45	13 45	12.7.2	5	53	84 00	9 45	1.10.1	1
6	69 00	11 25	381	2	30	31 00	16 25	531	5	54	83 30	10 50	191	3
7	66 45	12 45	371	5	31	28 45	9 20	951	1	55	89 30	10 55	091	2
8	59 15	13 45	7.12.2	5	32	13 30	7 50	12.3.1	5	56	89 30	12 10	081	5
9	66 00	10 00	491	3	33	14 30	8 30	11.3.1	5	57	89 30	13 50	071	5
10	63 00	11 00	481	2	34	16 00	9 20	10.3.1	5	58	82 45	12 05	181	4
11	58 00	10 20	581	3	35	18 00	10 10	931	1	59	82 00	13 40	171	5
12	54 00	11 20	571	1	36	20 15	11 20	831	4	00	89 45	16 40	061	5
13	51 30	7 35	8.10.1	4	37	23 15	12 40	731	5	61	84 45	16 15	1.12.2	5
14	51 15	8 35	791	2	38	9 45	8 40	11.2.1	5	62	86 00	15 00	1.13.2	5
15	48 45	10 30	671	2	39	11 15	9 35	10.2.1	5	63	80 15	15 50	161	5
16	44 45	8 45	881	5	40	12 30	10 30	921	5	64	76 30	14 35	3.13.2	5
17	44 30	9 45	771	5	41	13 00	11 55	721	4	65	53 00	12 55	9.12.2	5
18	47 45	14 15	9.10.2	4	42	17 00	14 00	13.4.2	5	66	50 00	12 15	561	5
19	48 00	15 55	892	5	43	20 00	16 25	11.4.2	5	67	44 30	11 15	661	5
20	37 15	7 40	10.8.1	3	44	8 45	14 35	13.2.2	3	68	41 30	11 00	1.10.2	5
21	30 30	8 20	10.6.1	2	45	6 15	10 40	911	5	69	18 00	15 00	621	5
22	33 15	9 05	961	4	46	3 45	17 45	16.1.3	5	70	8 00	13 20	711	5
23	36 30	9 45	861	1	47	0 00	9 40	10.0.1	2	71	52 45	9 45	681	3
24	35 00	11 20	751	1	48	0 00	12 00	801	2	72	14 15	11 45	821	4

Cuadro V.—LAUEDIAGRAMA DE LA EPSOMITA SEGÚN LA CARA (110). COORDENADAS, ÍNDICES E INTENSIDAD RELATIVA DE LOS PUNTOS.					
N.º de orden	Ángulo φ	Ángulo α	Índices	Intensidad.	N.º de orden
1	0° 00'	7° 45'	540	1	35
2	0 00	9 30	430	3	36
3	0 00	11 15	750	4	37
4	0 00	13 00	320	4	38
5	0 00	16 00	530	5	39
6	25 00	5 40	652	4	40
7	15 30	7 30	541	1	41
8	10 00	9 30	861	3	42
9	11 30	11 00	751	2	43
10	9 30	12 50	961	4	44
11	8 30	15 50	10.6.1	4	45
12	29 00	6 45	542	3	46
13	35 30	8 00	432	1	47
14	31 30	9 30	753	2	48
15	19 30	9 10	431	4	49
16	22 30	10 30	752	5	50
17	18 30	12 40	962	5	51
18	17 00	15 20	531	4	52
19	26 30	12 00	321	4	53
20	29 30	13 00	835	4	54
21	25 00	14 45	10.6.3	4	55
22	32 00	13 30	532	4	56
23	42 00	11 30	533	5	57
24	44 00	9 20	322	4	58
25	47 00	6 45	433	3	59
26	36 00	10 45	643	4	60
27	48 30	5 15	544	4	61
28	39 00	6 00	543	4	62
29	57 00	7 40	323	3	63
30	58 00	9 00	535	4	64
31	50 30	10 15	534	3	65
32	42 00	13 10	744	4	66
33	80 00	5 30	3.11.0	3	67
34	71 30	6 30	214	1	68
Intensidad.					
N.º de orden	Ángulo φ	Ángulo α	Índices	Intensidad.	N.º de orden
69	137° 30'	11° 15'	213	2	69
70	128 30	12 20	425	5	70
71	108 30	9 40	212	4	71
72	116 30	9 00	525	5	72
73	123 30	8 15	736	5	73
74	120 30	12 45	735	5	74
75	119 00	14 30	315	5	75
76	112 00	13 45	103	4	76
77	107 30	17 35	104	1	77
78	137 00	16 45	125	4	78
79	134 00	13 50	014	2	79
80	140 30	15 30	465	5	80
81	147 00	16 45	563	5	81
82	148 30	12 45	124	3	82
83	150 30	12 00	334	4	83
84	154 30	10 45	344	5	84
85	162 00	11 30	453	5	85
86	159 30	13 00	582	5	86
87	155 30	13 45	343	1	87
88	163 30	14 20	233	2	88
89	165 30	15 20	123	2	89
90	166 00	11 45	013	3	90
91	168 30	9 45	025	5	91
92	170 00	8 20	114	5	92
93	180 00	5 30	102	5	93
94	180 00	6 45	012	4	94
95	180 00	8 30	134	4	95
96	180 00	10 30	122	4	96
97	180 00	12 00	354	4	97
98	180 00	13 45	232	4	98
99	180 00	15 00	342	2	99
100	180 00	16 00	451	1	100
101	177 00	4 55	561	3	101
102	113 00	15 00	341	3	102
103	113 00	15 00	463	3	103

Cuadro VII.—FOTOGRAMAS DE CRISTAL OSCILANTE (MÉTODO DE SCHIEBOLD) SOBRE LAS CARAS:

Indices	(100). EJE DE GIRO [010].				(010). EJE DE GIRO [100].				
	d medido	d calculado	θ medido	θ calculado	Indices	d medido	d calculado	θ medido	θ calculado
200	5,97	5,95	00° 00'	00° 00'	020	6,05	6,01	00° 00'	00° 00'
400	2,98	2,98	00 00	00 00	040	2,99	3,01	00 00	00 00
310	3,77	3,77	18 30	19 55	080	1,50	1,50	00 00	00 00
410	2,88	2,89	13 55	13 55	120	5,36	5,37	26 15	26 48
510	2,33	2,34	11 35	11 10	130	3,79	3,80	18 55	18 36
610	1,95	1,96	9 05	9 20	140	2,91	2,91	15 05	14 10
710	1,69	1,68	8 00	8 05	150	2,36	2,36	11 40	11 26
810	1,47	1,48	7 00	7 05	160	1,97	1,98	9 25	9 34
120	5,34	5,37	63 45	63 15	170	1,70	1,70	8 15	8 12
220	4,21	4,23	45 00	44 45	180	1,47	1,49	7 40	7 12
320	3,31	3,31	33 55	33 25	190	1,33	1,32	6 10	6 24
420	2,67	2,67	26 30	26 20	110,0	1,18	1,20	5 40	5 46
520	2,23	2,21	21 55	21 35	220	4,22	4,23	45 40	45 16
620	1,89	1,89	18 50	19 55	250	2,23	2,23	22 05	22 00
720	1,64	1,64	15 50	15 50	260	1,90	1,90	18 50	18 36
330	2,84	2,85	45 10	44 45	270	1,64	1,65	15 45	16 06
430	2,37	2,39	37 00	36 35	280	1,45	1,46	14 10	14 10
530	2,04	2,05	31 00	30 45	310	3,75	3,77	71 35	71 46
630	1,78	1,78	26 00	26 20	320	3,32	3,31	56 50	56 24
730	1,57	1,57	23 35	23 00	330	2,84	2,82	46 30	45 16
830	1,39	1,40	20 30	20 20	340	2,37	2,40	37 30	37 08
340	2,38	2,40	52 50	52 55	360	1,79	1,79	26 45	26 48
440	2,11	2,12	45 00	44 45	420	2,66	2,67	64 35	63 42
540	1,86	1,87	38 35	38 35	430	2,43	2,45	54 15	53 25
640	1,66	1,66	33 40	33 25	440	2,12	2,12	46 10	45 16
740	1,47	1,48	29 25	29 30	460	1,65	1,66	34 35	33 57
550	1,69	1,69	45 00	44 45	470	1,47	1,49	31 10	30 00
					480	1,34	1,34	26 55	26 48
					530	2,09	2,05	59 40	59 18
					540	1,86	1,87	52 50	51 38
					550	1,68	1,69	46 30	45 16
					560	1,53	1,53	41 15	40 06

Trab. del Mus. Nac. de Cienc. Nat. de Madrid, —Ser. Geol., núm. 37,—1930.

Cuadro VIII. — FOTOGRAFÍAS DE CRISTAL OSCILANTE (MÉTODO DE SCHIEBOLD) SOBRE LAS CARAS:

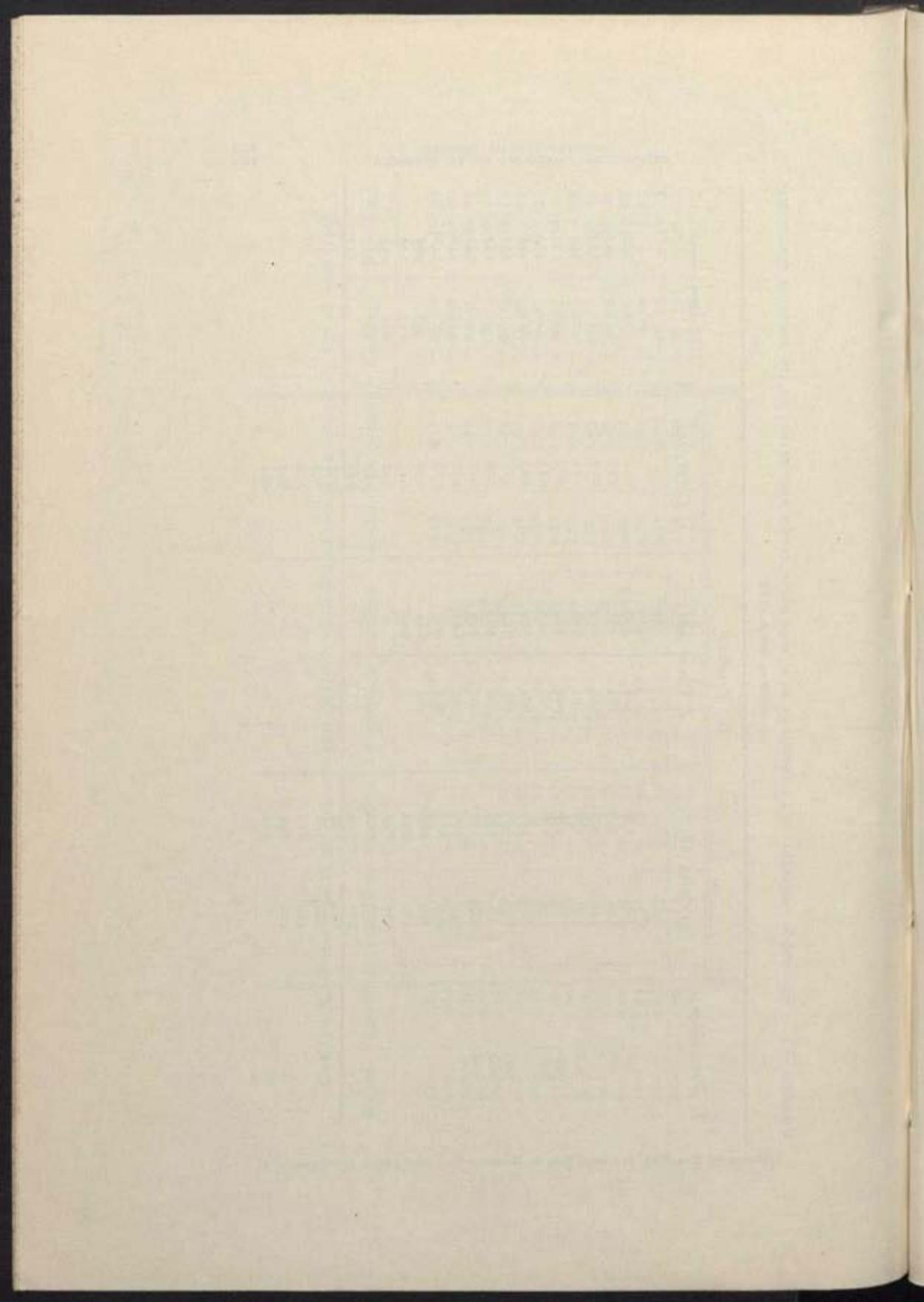
Índices	(001), EJE DE GIRO [100].				(001), EJE DE GIRO [010].				
	d medido	d calculado	θ medido	θ calculado	Índices	d medido	d calculado	θ medido	θ calculado
002	3,42	3,43	00° 00'	00° 00'	002	3,43	3,43	00° 00'	00° 00'
004	1,71	1,72	00 00	00 00	004	1,71	1,71	00 00	00 00
006	1,14	1,15	00 00	00 00	011	5,98	5,97	28 15	29 45
101	5,99	5,95	29 10	29 55	013	2,24	2,25	9 20	10 45
103	2,23	2,25	10 45	10 55	014	1,70	1,70	8 15	8 10
104	1,69	1,70	8 05	8 10	021	4,53	4,53	48 20	48 50
201	4,48	4,50	48 40	49 05	022	2,98	2,98	29 15	29 45
202	2,97	2,98	29 50	29 55	023	2,14	2,14	20 35	20 50
203	2,13	2,14	20 20	21 00	024	1,65	1,65	15 35	15 35
204	1,63	1,65	16 10	16 10	025	1,35	1,34	12 25	12 50
205	1,32	1,34	13 10	13 00	026	1,12	1,12	10 30	10 45
206	1,12	1,12	11 00	10 55	031	3,48	3,46	57 36	59 40
301	3,39	3,44	59 25	60 00	032	2,63	2,61	41 00	40 35
302	2,57	2,60	40 40	40 50	033	1,98	1,99	29 45	29 45
303	1,96	1,98	29 30	29 55	034	1,57	1,58	23 40	23 10
304	1,56	1,58	22 55	23 25	041	2,77	2,76	65 20	66 25
305	1,29	1,30	19 20	19 05	042	2,26	2,26	48 40	48 50
401	2,72	2,73	66 50	66 35	043	1,82	1,82	37 10	37 20
402	2,25	2,25	48 45	49 05	044	1,49	1,49	29 15	29 45
403	1,81	1,82	37 15	37 35	045	1,24	1,25	23 50	24 35
404	1,48	1,50	29 55	29 55	053	1,65	1,66	43 50	43 35
406	1,06	1,07	21 05	21 00	054	1,40	1,40	34 45	35 30
502	1,93	1,96	54 15	55 15	063	1,49	1,51	48 10	48 50
503	1,62	1,65	43 20	43 50	064	1,29	1,30	41 15	40 35
504	1,37	1,39	35 35	35 50					
505	1,18	1,19	30 00	29 55					
602	1,69	1,72	59 40	60 00					
603	1,47	1,50	49 10	49 05					
604	1,29	1,30	40 45	40 50					
605	1,12	1,13	34 40	34 40					

Cuadro IX.—FOTOGRAMAS DE CRISTAL OSCILANTE (MÉTODO DE SCIEHOLD) SOBRE LAS CARAS:

(110). EJE DE GIRO [001].				(210). EJE DE GIRO [001].					
Indices	d medido	d calculado	β medido	β calculado	Indices	d medido	d calculado	β medido	β calculado
220	4,25	4,23	00° 00'	00° 00'	310	3,78	3,77	00° 00'	00° 00'
330	2,86	2,82	00 00	00 00	420	2,65	2,67	00 00	00 00
340	2,38	2,40	00 00	00 00	410	2,86	2,89	00 00	00 00
111	5,36	5,33	51 10	50 55	530	2,93	2,39	00 00	00 00
341	2,25	2,26	18 45	19 15	530	2,03	2,05	00 00	00 00
441	2,02	2,02	17 10	17 10	620	1,88	1,89	00 00	00 00
541	1,80	1,80	15 35	15 10	630	1,75	1,78	00 00	00 00
551	1,65	1,64	13 15	13 50	640	1,65	1,66	00 00	00 00
222	2,69	2,67	51 00	50 55	930	1,26	1,26	00 00	00 00
232	2,38	2,38	44 20	44 00	211	4,18	4,21	38 45	37 50
332	2,19	2,18	39 55	39 25	311	3,32	3,30	30 05	29 30
342	1,97	1,97	35 00	34 55	321	2,96	2,98	27 10	25 45
442	1,82	1,80	31 55	31 40	421	2,47	2,49	21 35	21 15
462	1,48	1,50	25 50	25 50	521	2,10	2,11	18 25	17 50
552	1,53	1,52	25 55	26 15	531	1,95	1,96	17 10	17 55
123	2,11	2,11	67 20	66 55	621	1,81	1,82	15 35	15 20
233	1,87	1,88	55 55	55 30	641	1,60	1,61	14 10	13 35
243	1,71	1,74	50 25	49 30	112	3,14	3,18	69 30	67 55
343	1,63	1,66	47 50	46 20	212	2,86	2,89	57 55	57 15
					322	2,36	2,38	44 05	44 00
					422	2,07	2,11	38 50	37 50
					432	1,93	1,96	35 30	34 50
					522	1,86	1,86	32 55	32 50
					532	1,75	1,76	31 10	30 50
					622	1,65	1,65	28 55	29 30
					632	1,57	1,58	27 20	27 25

Cuadro X.—FOTOGRAFIA DE CRISTAL OSCILANTE (Método de Schiebold) sobre la cara (310). EJE DE GIRO [120].

Indices	d medido	d calculado	θ medido	θ calculado	Indices	d medido	d calculado	θ medido	θ calculado
420	2,64	2,67	00° 00'	00° 00'	320	3,34	3,31	-59° 30'	-59° 50'
420	2,64	2,67	-52 55	-52 40	520	2,20	2,21	-48 00	-48 00
310	3,78	3,77	+ 7 50	+ 6 25	620	1,87	1,89	-44 45	-46 20
310	3,74	3,77	-45 10	-46 20	720	1,63	1,64	+10 55	+10 30
410	2,86	2,89	+12 20	+12 25	720	1,62	1,64	-42 45	-42 10
410	2,85	2,89	-40 55	-40 15	130	3,78	3,80	+45 50	+45 05
400	2,98	2,98	+26 25	+26 20	330	2,88	2,85	+19 25	+18 35
610	1,94	1,96	-36 30	-35 45	430	2,37	2,39	+10 15	+10 20
710	1,66	1,68	-35 25	-34 25	530	2,04	2,05	+ 4 15	+ 4 20
810	1,46	1,48	+19 35	+19 15	530	2,04	2,05	-57 30	-57 05
810	1,46	1,48	-33 55	-33 25	340	2,38	2,40	+26 45	+26 30
020	6,02	6,01	+62 55	+63 40	540	1,86	1,87	+12 05	+12 05
120	5,34	5,37	+37 50	+36 50	640	1,66	1,66	+ 6 50	+ 7 05
220	4,23	4,23	+19 10	+18 25	250	2,20	2,23	+41 55	+42 25
220	4,23	4,23	-70 15	-71 05	550	1,68	1,69	+18 35	+18 25
320	3,32	3,31	+ 7 35	+ 7 05	260	1,90	1,90	+45 00	+45 05



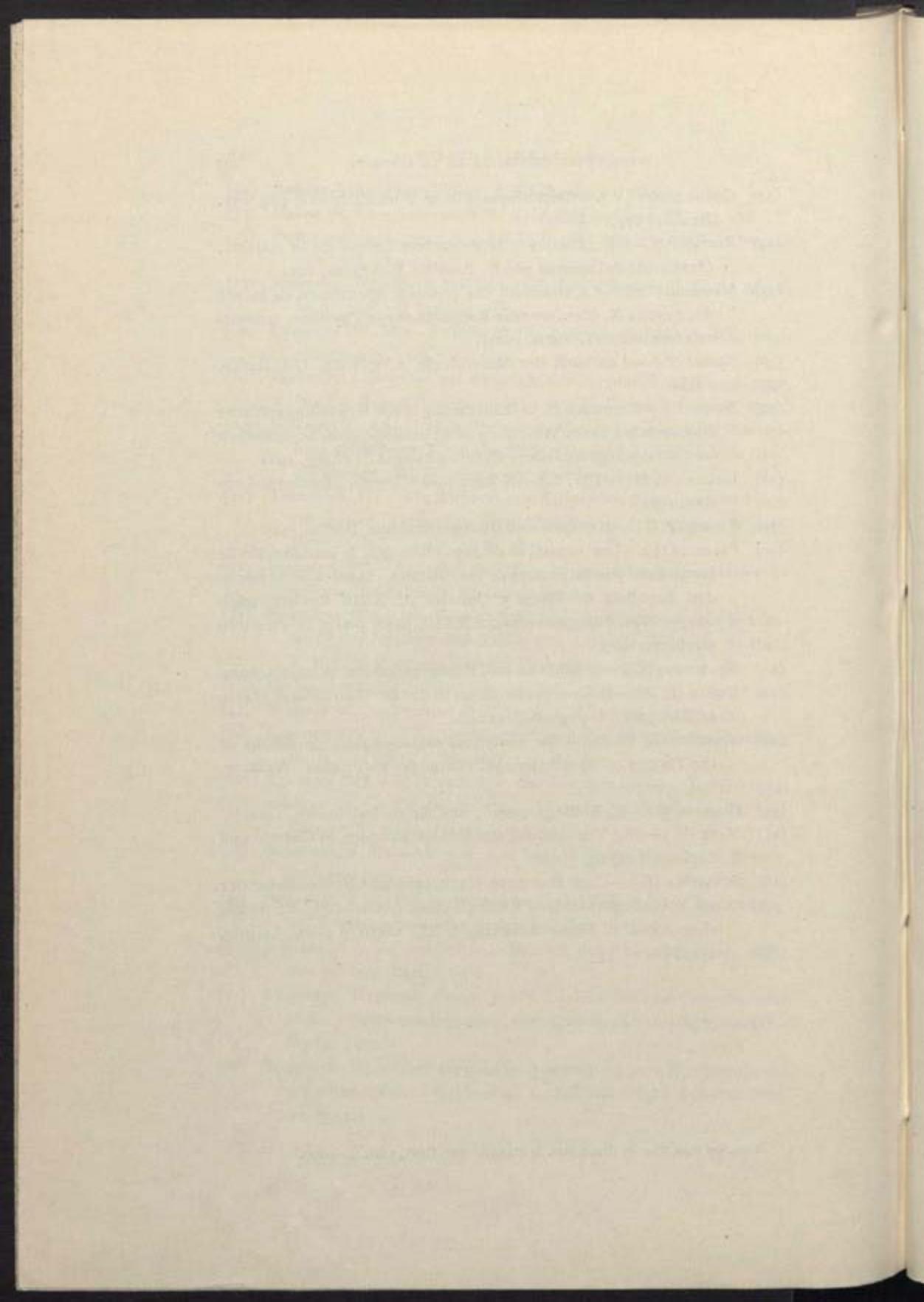
BIBLIOGRAFIA

Los números que en el texto van incluidos entre paréntesis, corresponden a los de orden de la relación siguiente:

- (1) ROENTGEN (W. C.).—Über eine neue Art von Strahlen. (Ann. d. Physik., 1896.)
- (2) LAUE, FRIEDRICH y KNIPPING.—Interferenz-Erscheinungen bei Roentgestrahlen. (Sitzungsber. math. phys. Kl. Akad. d. Wiss. zu München, págs. 303-322 y 362-373.) Munich, 1912.
- (3) BRAGG (W. H. y W. L.).—The Reflection of X Rays by crystals. (Proc. of The Roy. Soc. of London, t. LXXXVIII, págs. 428-438). Londres, 1913.
- (4) DE BROGLIE.—Sur un nouveau procédé permettant d'obtenir la photographie des spectres de raies des rayons Roentgen. (C. R., t. CLVII, pág. 924, 1913.)
- (5) SEEMANN (H.).—Vollständige Spektraldiagramme von Kristallen. (Physical. Zeitschrift, t. XIV, págs. 317-319, 1919.)
- (6) DEBYE (P.) y SCHERRER (P.).—Interferenzen an regellos orientierten Teilchen im Röntgenlicht. (Nachz. der Kgl. Ges. der Wissenschaften, págs. 1-26. Gottingen, 1916. — Physikal. Zeitschr., t. XVIII, págs. 291-301, 1917.)
- (7) HULL (A. W.).—A new method of X-Rays crystal analysis. (Physical Review, t. X, pág. 661, 1917.)
- (8) GROTH (P.).—Physikalische Kristallographie. Leipzig, 1905.
- (9) GROTH (P.).—Chemische Kristallographie, Bd. II, S. 428. Berlin, 1908.
- (10) FEDOROW.—Zusammenstellung der Kristallographischen Resultate des Herrn Schoenflies und der meinigen. (Zeits. f. Krist., t. XX, págs. 25-75, 1892.)
- (11) SCHOENFLIES (A.).—Krystallsysteme und Kristallstruktur. Leipzig, 1891.—Theorie der Kristallstruktur. Berlin, 1923.
- (12) NIGGLI (P.).—Geometrische Kristallographie des Diskontinuums. Leipzig, 1919.
- (13) WYCKOFF (R. W. G.).—The Structure of Crystals. New York, 1924.

- (14) BROOKE.—Annale of Philos., t. XXII, pág. 40, 1823.
- (15) HAUER (K. v.).—Zeitschrift für Kristallographie, t. VI, pág. 529.
- (16) DUFET.—Compt. rend., t. LXXXVI, pág. 880, 1878.—Bull. Soc. fr. min., t. I, pág. 58.
- (17) ABEGG'S.—Handbuch der Anorganischen Chemie, II Bd., 2 Abteilung, (pág. 57). Leipzig, 1905.
- (18) LEHMANN (W. M.).—Zeitschrift für Kristallographie, t. LX, páginas 379-413, 1924.
- (19) RINKE (F.).—Beiträge zur Kenntnis der Kristall-Röntgenogramme. (Mitt. a. d. Inst. f. Min. u. Petr. der Universität Leipzig, 1915.)
- (20) WÜLFING (E. A.).—Ueber einen vereinfachten Apparat zur Herstellung orientierter Kristallschliffe. (Neues Jahrbuch f. Min. Geol. u. Palaeont., Bd. II, págs. 1-22. Stuttgart, 1901.)
- (21) TUTTON (A. E.).—Ein Apparat zum Schneiden, Schleifen und Polieren genau orientierter Kristallplatten und Prismen. (Zeits. f. Krist., t. XXV, págs. 79-85, 1896.)
- (22) PARDILLO (F.).—Aparato para dar en los cristales secciones de orientación definida. Barcelona, 1918.
- (23) SCHIEBOLD (E.).—Die Verwendung der Lauediagramme zur Bestimmung der Struktur des Kalkspates Leipzig. (Mitt. an d. Inst. f. Min. u. Petr. d. Universität Leipzig, 1919.)
- (23a) GOLDSCHMIDT (V.).—Zeits. f. Krist., t. LI, pág. 358.
- (24) WAGNER (E.).—Annalen der Physik, t. XLVI, pág. 868, 1915.
- (25) SCHIEBOLD (E.).—Die Drehkristallmethode. (Fortschritte der Min. Krist. und Petr., t. XI, págs. 113-280. Jena, 1927.)
- (26) SIEGBAHN (M.).—Spektroskopie der Röntgenstrahlen. Berlin, 1924.
- (27) JOHNSEN (A.).—Kristallstruktur. (Fortschritte d. Min. Krist. und Petr., t. V, págs. 17-130. Jena, 1916.)
- (28) SOMMERFELD (A.).—Atombau und Spektrallinien, 3.^a edición. Braunschweig, 1922.
- (29) BOEKE (H. E.).—Die gnomonische Projektion in ihrer Anwendung auf kristallographische Aufgaben. Berlin, 1913.
- (30) JOHNSEN (A.).—Fortschritte in Bereich der Kristallstruktur, páginas 270-297. Berlin, 1922.
- (31) FRIEDRICH, KNIPPING, DEBYE y otros.—Die Naturwissenschaften. (Zehn Jahre Lauediagramm, año X, cuaderno 16, págs. 361-416. Berlin, 1922.)
- (32) SCHIEBOLD (E.).—Über graphische Auswertung von Röntgenphotogrammen. (Zeits. f. Physik., t. XXVIII, págs. 355-370. Berlin, 1924.)

- (33) GOLDSCHMIDT (V.).—Kristallographische Winkeltabellen, pág. 132. Berlin, 1897.
- (34) RINNE (F.).—Los cristales y la estructura íntima de la materia. (Traducido del alemán por F. Pardillo. Barcelona, 1923.)
- (35) MAUGUIN (Ch.).—La structure des cristaux déterminée au moyen des rayons X. (Conférences-Rapports sur la Physique, première série, vol. VI. Paris, 1924).
- (36) NIGGLI (P.).—Lehrbuch der Mineralogie, 2.^a edición, t. I. Berlin, 1924.
- (37) RINNE (F.) y SCHIEBOLD (E.).—Einführung in die Kristallographische Formenlehre sowie Anleitung zu Kristallographische-optischen und Röntgenographischen Untersuchungen. Leipzig, 1922.
- (38) BRAGG (W. H. and W. L.).—X-Rays and Chrystal structure. London, 1924.
- (39) EWALD (P. P.).—Kristalle und Röntgenstrahlen. Berlin, 1923.
- (40) PALACIOS (J.).—Los espectros de rayos Röntgen, la constitución de los átomos y la estructura de los cristales. (Anales de la Sociedad Española de Física y Química, t. XXII; Revista, páginas 171-179, diciembre 1924; t. XXIII, págs. 5-21 y 32-42, enero y febrero 1925.)
- (41) NEUBURGER (C.).—Kristallbau und Röntgenstrahlen. Stuttgart, 1924.
- (42) EWALD (P. P.).—Das reziproke Gitter in der Strukturtheorie. (Zeits. f. Krist., t. LVI, pág. 129, 1921.)
- (43) WYCKOFF (R. W. G.).—The analytical expression of the results of the Theory of Space-Groups. (Carnegie Institution. Washington, 1922.)
- (44) GOSSNER (B.).—Kristallberechnung und Kristallzeichnung, 1914.
- (45) MARK (H.).—Die Verwendung der Röntgenstrahlen in Chemie und Technik. Leipzig, 1926.
- (46) SCHIEBOLD (E.).—Über eine neue Herleitung und Nomenklatur der 230 kristallographischen Raumgruppen. (Abhandlgn. d. Sächsischen Akad. d. Wissenschaften, t. XL, texto y atlas. Leipzig, 1929.)



ÍNDICE

	<u>Páginas.</u>
INTRODUCCIÓN	5
I.—GENERALIDADES	7
Historia, desenvolvimiento y estado actual de las investiga- ciones roentgenográficas.....	7
La estructura cristalina.....	13
II.—MATERIAL.....	23
Epsomita	23
Aparatos.....	30
Manantial eléctrico.....	45
III.—TÉCNICA.....	48
IV.—INTERPRETACIÓN DE LOS FOTOGRAMAS.....	59
Lauediagramas	59
Fotogramas de cristal rotatorio.....	85
Grupo estéreo-cristalino de la epsomita.....	110
Determinación del alargamiento en los cristales de Epsomi- ta de Calatayud.....	113
RESUMEN	115
CUADROS	117
BIBLIOGRAFÍA.....	131

1. Introduction 1

2. The first part of the work 2

3. The second part of the work 3

4. The third part of the work 4

5. The fourth part of the work 5

6. The fifth part of the work 6

7. The sixth part of the work 7

8. The seventh part of the work 8

9. The eighth part of the work 9

10. The ninth part of the work 10

11. The tenth part of the work 11

12. The eleventh part of the work 12

13. The twelfth part of the work 13

14. The thirteenth part of the work 14

15. The fourteenth part of the work 15

16. The fifteenth part of the work 16

17. The sixteenth part of the work 17

18. The seventeenth part of the work 18

19. The eighteenth part of the work 19

20. The nineteenth part of the work 20

21. The twentieth part of the work 21

22. The twenty-first part of the work 22

23. The twenty-second part of the work 23

24. The twenty-third part of the work 24

25. The twenty-fourth part of the work 25

26. The twenty-fifth part of the work 26

27. The twenty-sixth part of the work 27

28. The twenty-seventh part of the work 28

29. The twenty-eighth part of the work 29

30. The twenty-ninth part of the work 30

31. The thirtieth part of the work 31

32. The thirty-first part of the work 32

33. The thirty-second part of the work 33

34. The thirty-third part of the work 34

35. The thirty-fourth part of the work 35

36. The thirty-fifth part of the work 36

37. The thirty-sixth part of the work 37

38. The thirty-seventh part of the work 38

39. The thirty-eighth part of the work 39

40. The thirty-ninth part of the work 40

41. The fortieth part of the work 41

42. The forty-first part of the work 42

43. The forty-second part of the work 43

44. The forty-third part of the work 44

45. The forty-fourth part of the work 45

46. The forty-fifth part of the work 46

47. The forty-sixth part of the work 47

48. The forty-seventh part of the work 48

49. The forty-eighth part of the work 49

50. The forty-ninth part of the work 50

51. The fiftieth part of the work 51

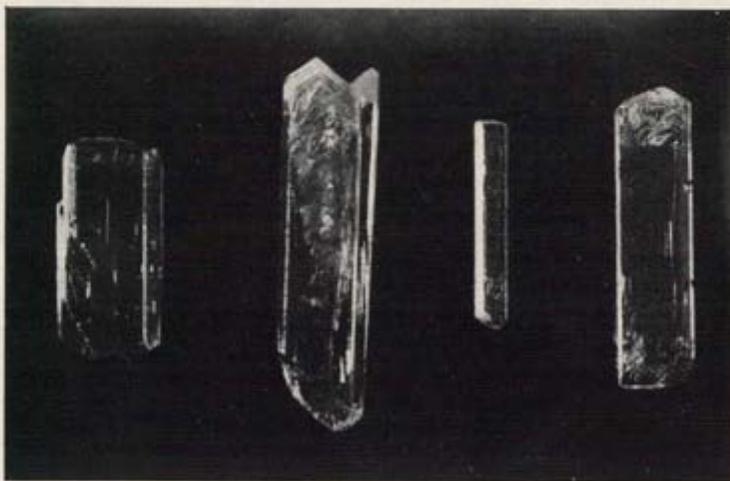


Fig. 1.—Cristales de sulfato magnésico, $\text{SO}_4 \text{Mg} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. (Ampliados a $\frac{4}{3}$.)

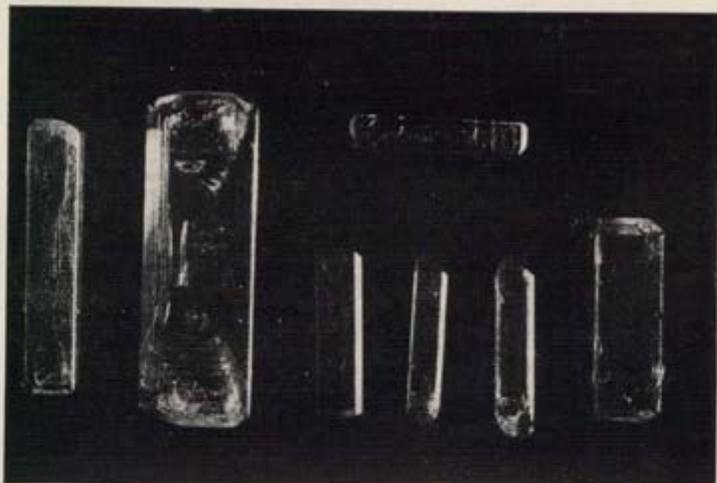
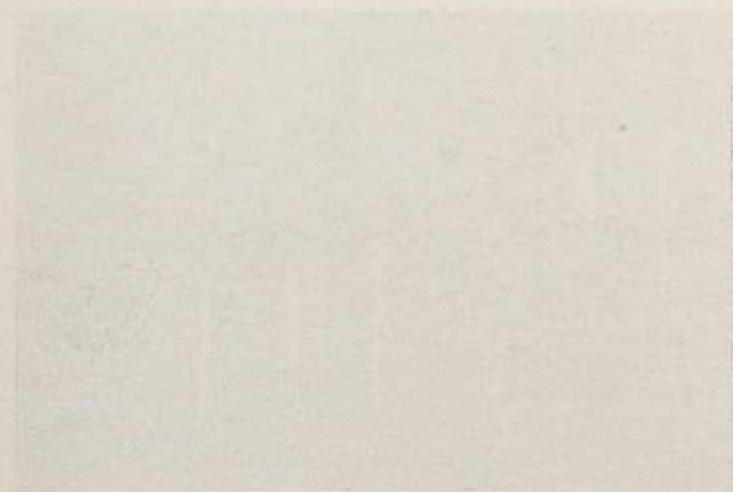


Fig. 2.—Cristales de sulfato magnésico, $\text{SO}_4 \text{Mg} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. (Ampliados a $\frac{4}{3}$.)



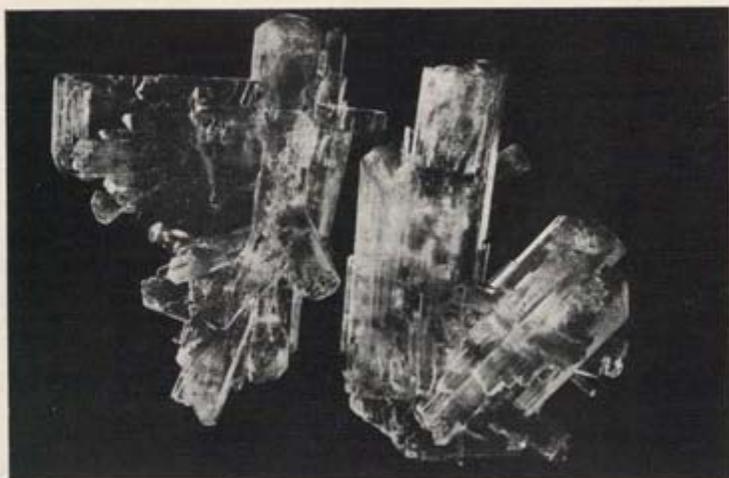


Fig. 1.—Grupo de cristales de sulfato magnésico, $\text{SO}_4\text{Mg} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. (Tamaño natural.)

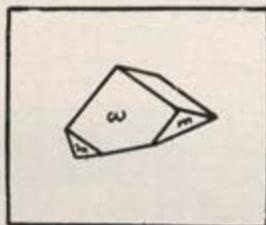


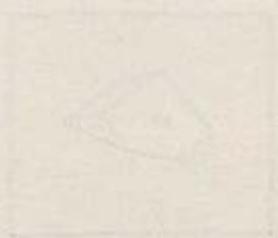
Fig. 2.—Forma de los cristales de sulfato magnésico, $\text{SO}_4\text{Mg} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, obtenidos en presencia de bórax.



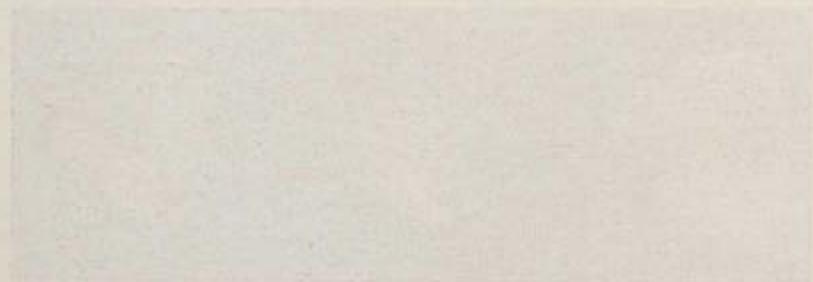
Fig. 3.—Cristales de sulfato magnésico, $\text{SO}_4\text{Mg} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, obtenidos en presencia de bórax en la disolución. (Ampliado a doble tamaño.)



Faint, illegible text centered below the first image.



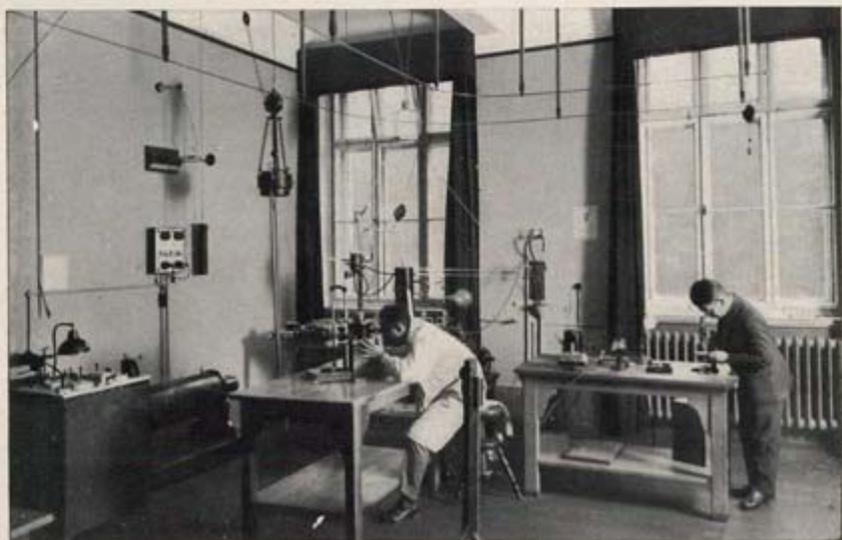
Faint, illegible text centered below the second image.



Faint, illegible text centered below the third image.



Fig. 1.—Vista del laboratorio de Roentgenografía del Instituto Mineralógico de Leipzig.



(Fot. Siemens, Berlin.)

Fig. 2.—Vista del laboratorio de Roentgenografía del Instituto Mineralógico de Leipzig. Al fondo, tubo Hadding preparado con el sistema de bombas combinadas para el vacío; delante está montado un tubo Müller para experiencias por el método Debye-Scherrer con polvo cristalino.



Faint, illegible text at the bottom of the page, possibly a caption or a page number.

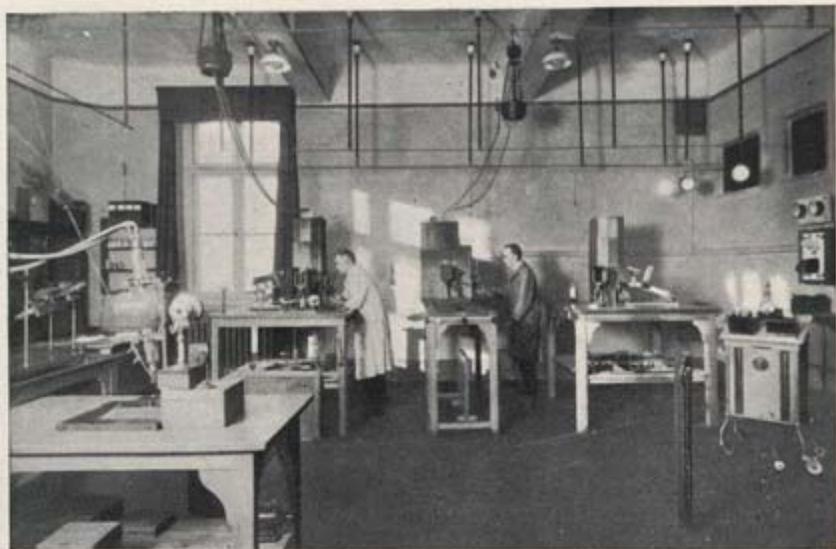
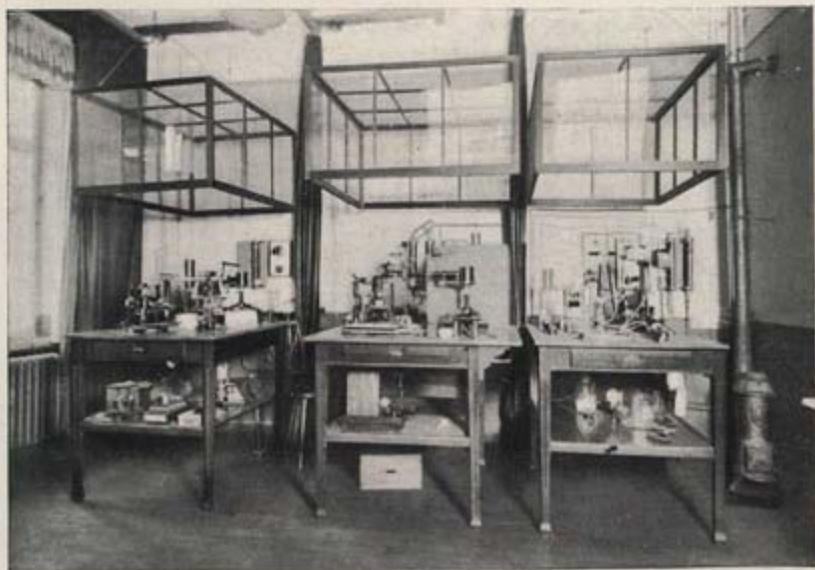
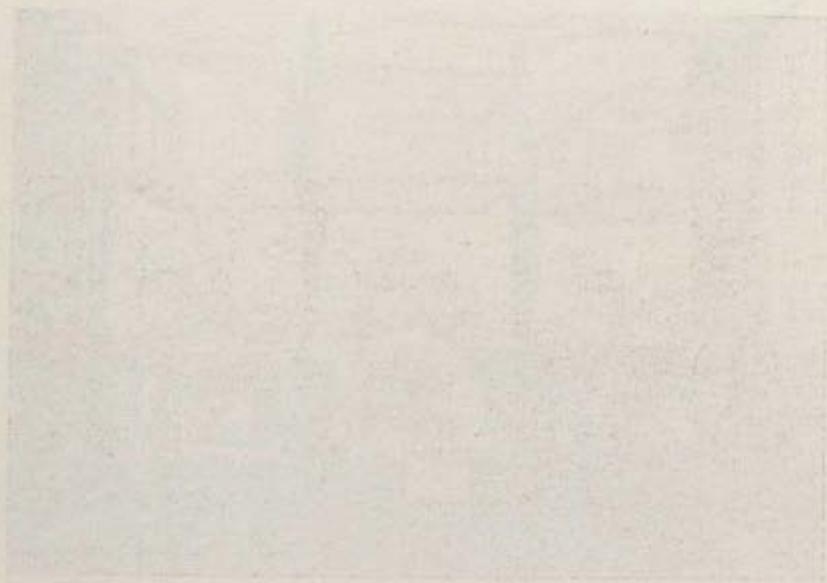
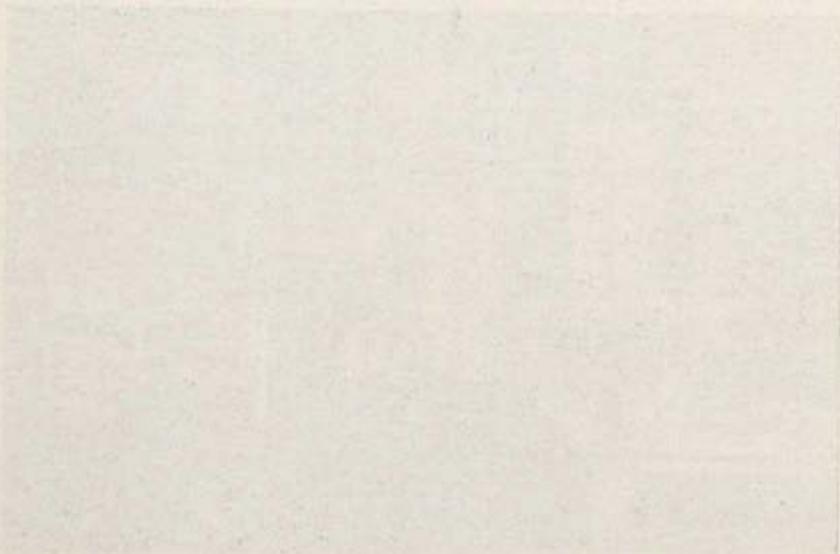


Fig. 1.—Otra vista del laboratorio de Roentgenografía del Instituto Mineralógico de Leipzig.



(Fots. Hoffmann-Fursch. Leipzig)

Fig. 2.—Laboratorio de Goniometría del Instituto Mineralógico de Leipzig.





(Fot. Siemens, Berlín.)

Fig. 1.—Vista del laboratorio de Roentgenografía del Instituto Mineralógico de Leipzig. Derecha, espectrógrafo; izquierda, aparatos para la obtención de lauediagramas (al rincón) y de fotogramas Schiebold; detrás, sala de transformadores.

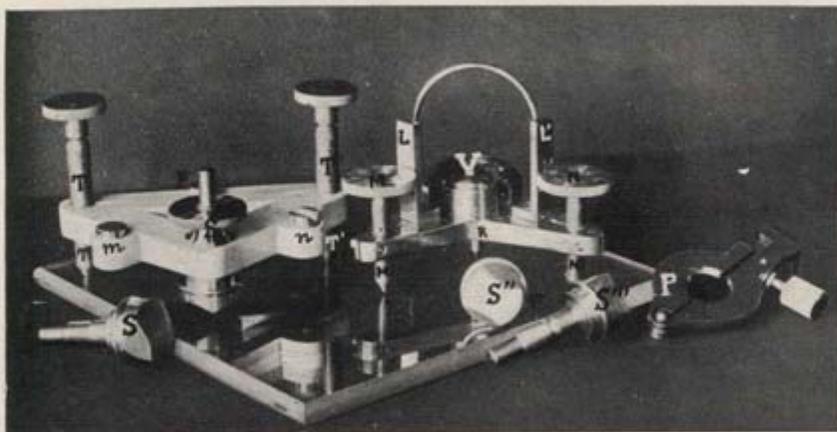
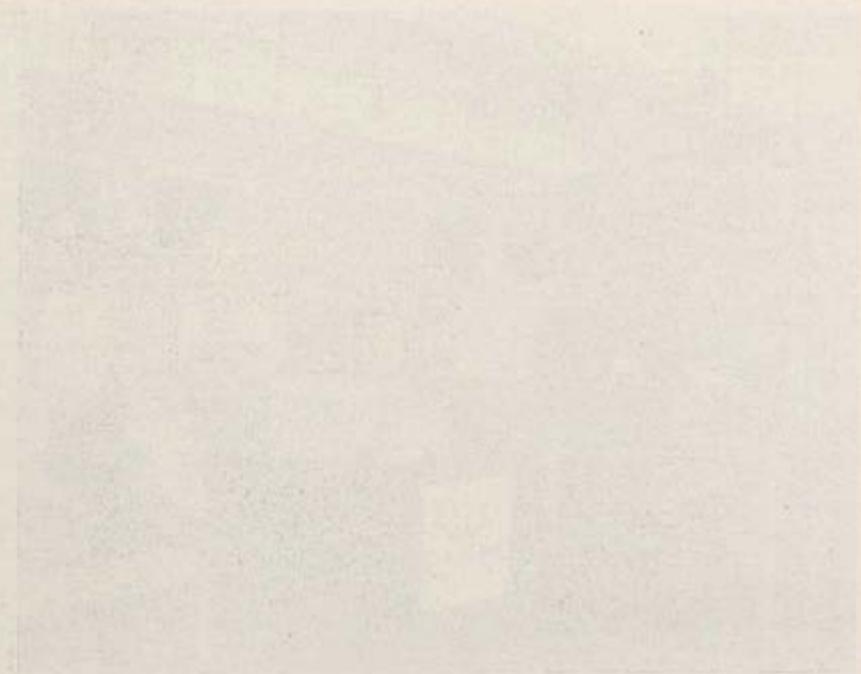
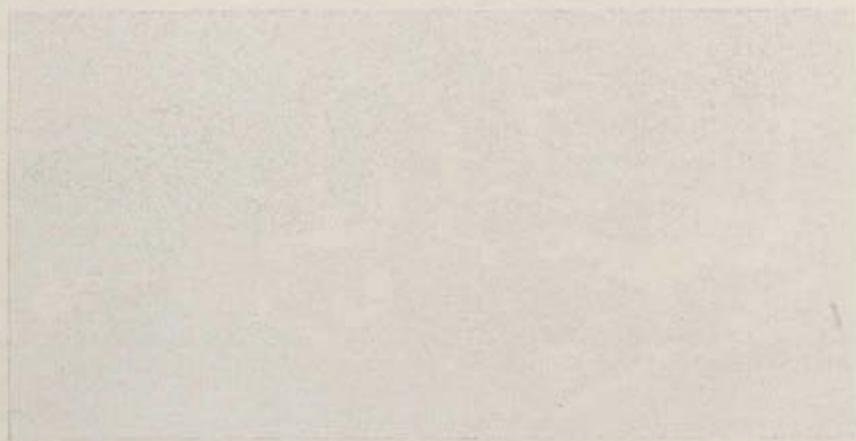


Fig. 2.—Aparato de Wülfing para tallar cristales en direcciones determinadas.



Faint, illegible text, possibly a title or header, centered on the page.



Faint, illegible text, possibly a footer or page number, centered at the bottom of the page.

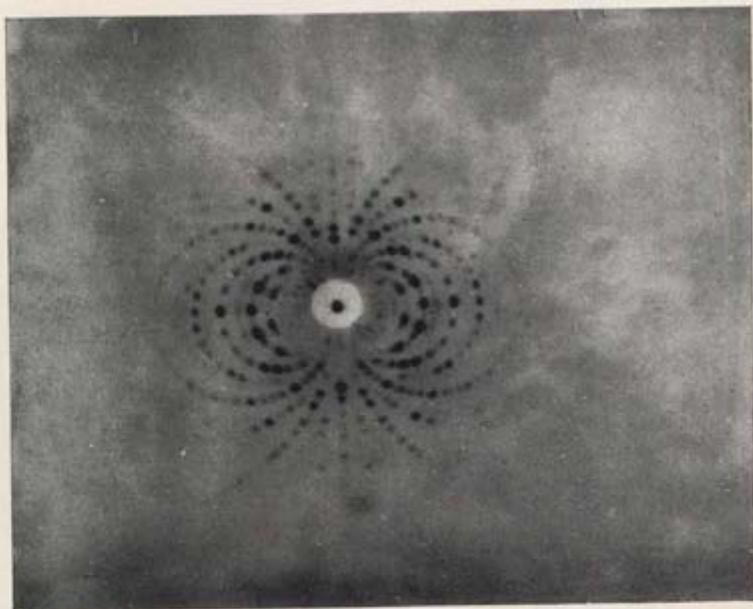


Fig. 1.—Lauediagrama de epsomita según la cara (010). Eje c horizontal.

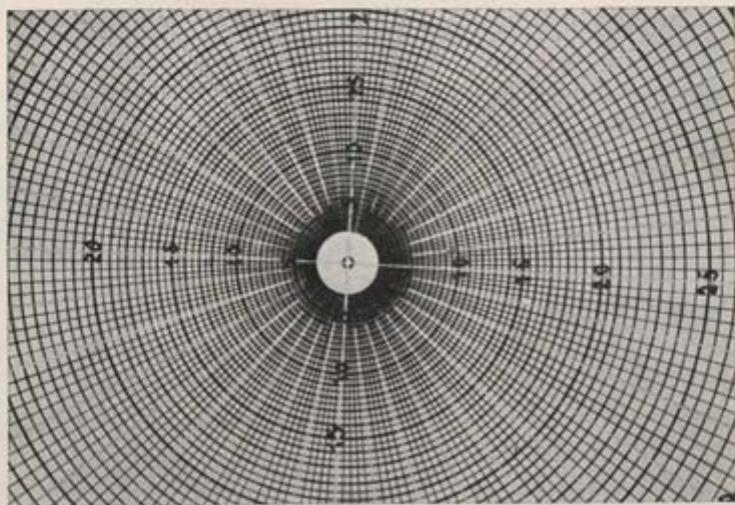
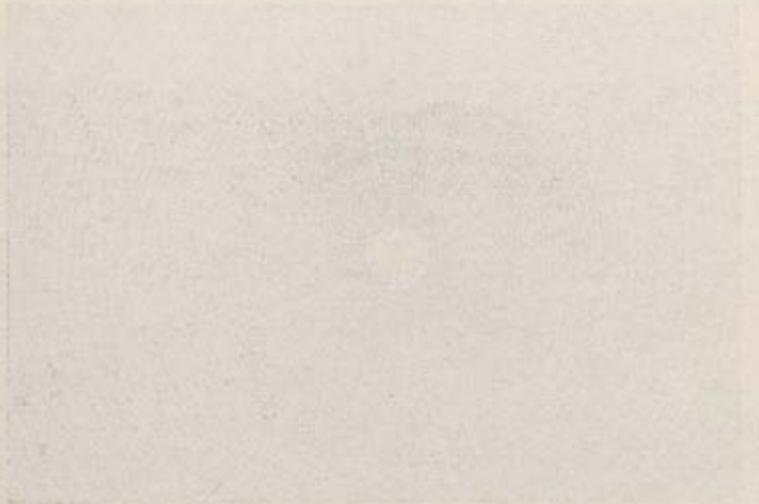
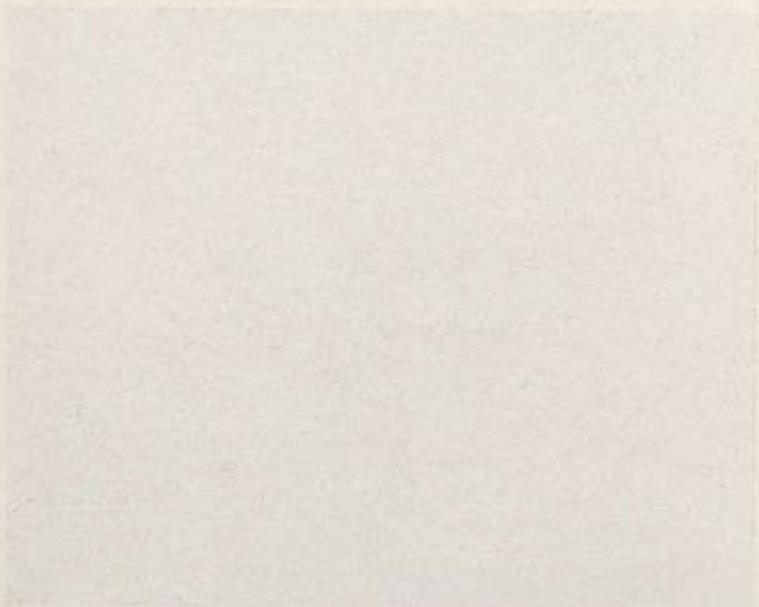


Fig. 2.—Transportador Schiebold-Rinne para la lectura de los lauediagramas.
Radio 4 cm.



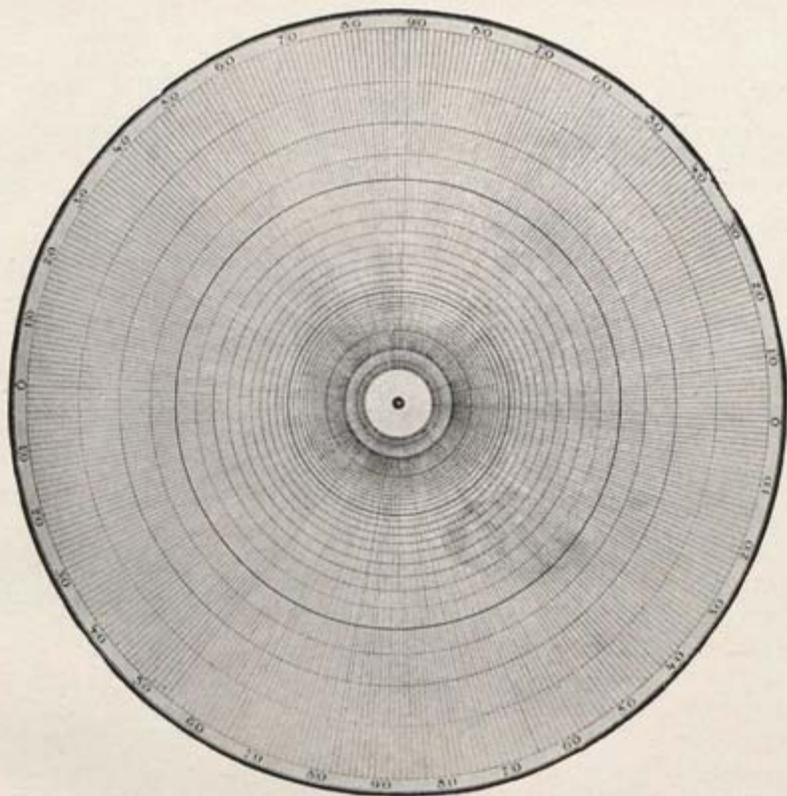


Fig. 1.—Transportador Rinne-Schiebold para proyecciones gnomónicas.

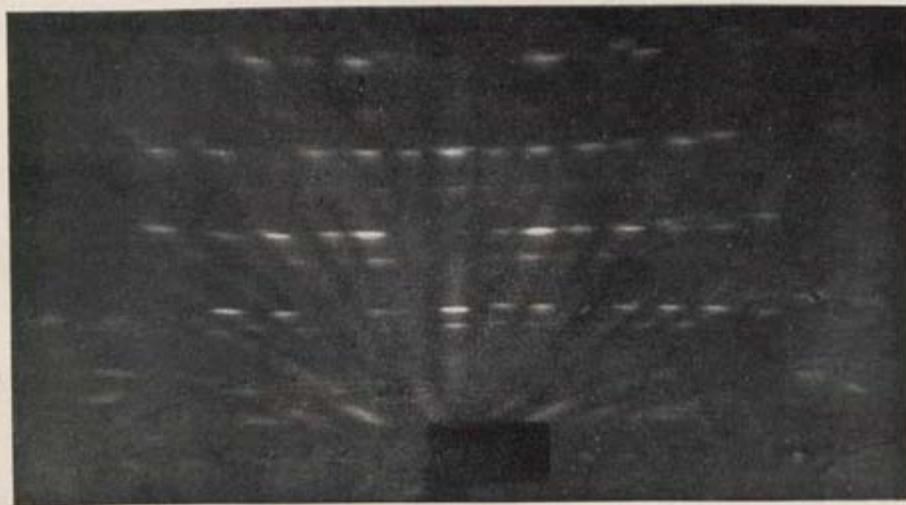
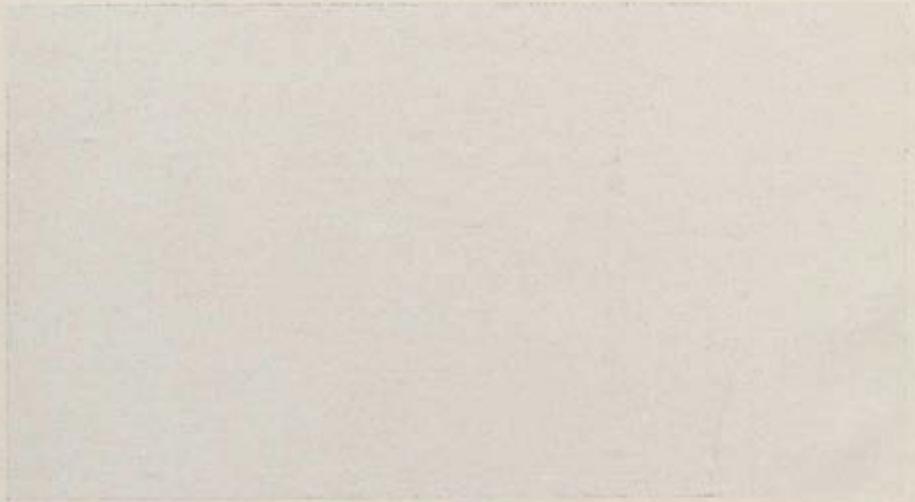
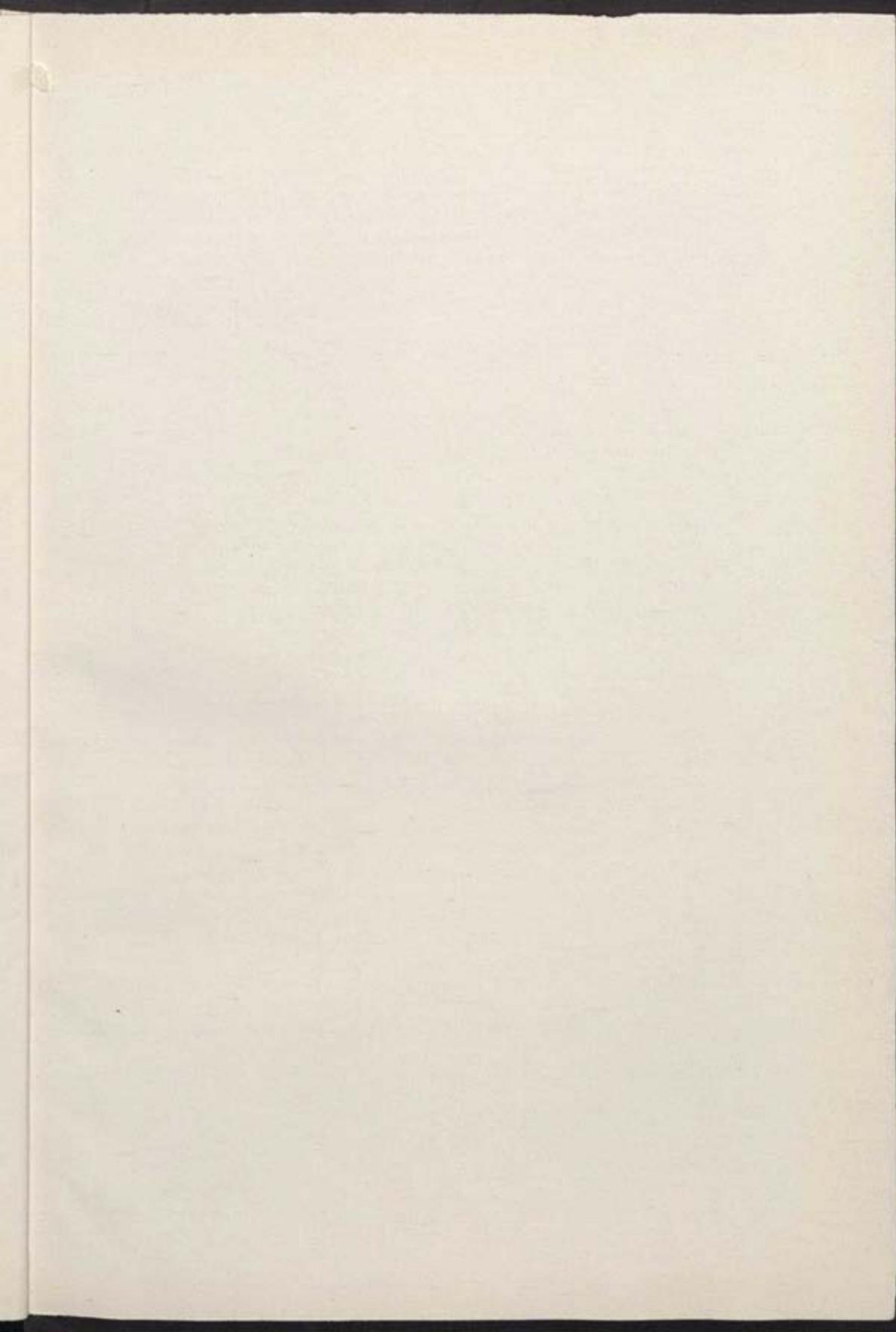
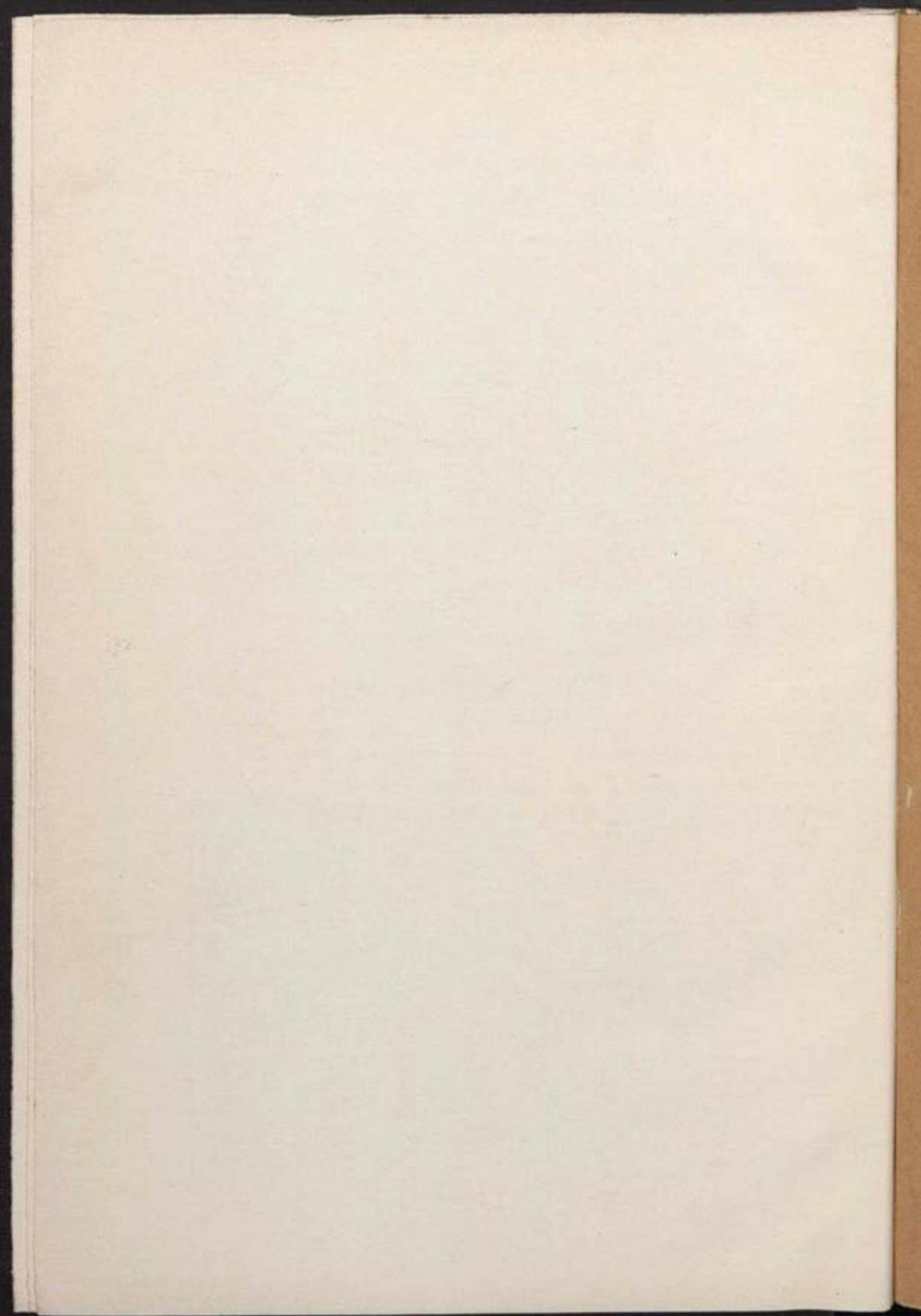


Fig. 2.—Fotograma de cristal oscilante sobre la cara (001). Eje de giro [010].







8. <i>Las calizas cristalinas del Guadarrama</i> , por Juan Carandell.....	2,00
9. <i>Estudio de los Glaciares de los Picos de Europa</i> , por Hugo Obermaier.	2,50
10. <i>Estratigrafía de la Sierra de Levante de Mallorca (Región de Felanitx)</i> , por Bartolomé Darder.....	1,50
11. <i>Guadarrama</i> , por C. Bernaldo de Quirós y Juan Carandell.....	2,50
12. <i>Monografía geológica del Valle del Lozoya</i> , por Lucas Fernández Navarro	3,50
13. <i>Las tierras negras del extremo Sur de España y sus yacimientos paleolíticos</i> , por Eduardo Hernández-Pacheco.— <i>Las tierras negras de Marruecos</i> , por Juan Dantín.....	2,00
14. <i>Contribución al estudio del Glaciarismo cuaternario de la Sierra de Gredos</i> , por Hugo Obermaier, en colaboración con Juan Carandell.	2,50
15. <i>Boqueteo geográfico-geológico de los Montes de Toledo</i> , por Joaquín Gómez de Llarena.....	2,50
16. <i>Litoquímica de la Sierra Kalpak-Kazansky (Rusia)</i> , por J. Piña de Rubies.....	1,50
17. <i>Los Glaciares cuaternarios de Sierra Nevada</i> , por Hugo Obermaier, en colaboración con Juan Carandell.....	3,50
18. <i>Datos topológicos del Cuaternario de Castilla la Nueva</i> , por L. Fernández Navarro y J. Gómez de Llarena.....	1,50
19. <i>Los Glaciares cuaternarios de la Sierra del Guadarrama</i> , por Hugo Obermaier y J. Carandell.....	3,00
20. <i>Evolución morfológica de la Bahía de Santander</i> , por J. Dantín Cereceda.....	1,50
21. <i>Geología y Paleontología de Alicante</i> , por Daniel J. de Cisneros.....	3,00
22. <i>El Glaciarismo cuaternario en los Montes ibéricos</i> , por J. Carandell y J. Gómez de Llarena.....	3,00
23. <i>Observaciones geológicas en la isla de Gomera (Canarias)</i> , por Lucas Fernández Navarro.....	3,00
24. <i>Los Aragonitos de España</i> , por P. Castro Barea.....	4,50
25. <i>El Mioceno marino de Muro (Mallorca)</i> , por F. Gómez Llucca	4,50
26. <i>La Faune des marnes aptiennes et albiennes de la région d'Andraitx (Majorque)</i> , par Paul Fallot.....	3,50
27. <i>La Sierra de Altomira y sus relaciones con la submeseta del Tajo</i> , por José Royo Gómez	2,50
28. <i>Echinides fósiles de la provincia de Santander</i> , par J. Lambert.....	2,00
29. <i>El Jurásico de la provincia de Tarragona</i> , por J. R. Bataller.....	5,50
30. <i>La fauna de los estratos de Pygope Aspasia Menegh. del Liásico medio del Rincón de Egea en el NW. de la provincia de Murcia</i> , por Daniel Jiménez de Cisneros.....	3,50
31. <i>Guía geológica de los alrededores de Toledo</i> , por Joaquín Gómez de Llarena.....	4,00
32. <i>Ammonites nouvelles des Îles Baléares</i> , par P. Fallot y H. Termier....	4,50
33. <i>Fauna caloviense del mineral de hierro de Parrion</i> , por F. Roman....	2,00

	<u>Pesetas</u>
34. <i>Estudio geológico de los alrededores de Sineu y del Puig de Sant Onofre (Región central de Mallorca)</i> , por Bartolomé Darder Pericás	4,00
35. <i>El meteorito de Olivenza (Badajoz)</i> , por Lucas Fernández Navarro . . .	2,50
36. <i>Los cinco ríos principales de España y sus terrazas</i> , por Eduardo Hernández-Pacheco	6,00
37. <i>Los modernos métodos roentgenográficos aplicados en la determinación de la estructura cristalina de la Epsomita</i> , por Gabriel Martín Cardoso	7,00

Comisión de investigaciones paleontológicas y prehistóricas.

Publica dos series de Memorias, una *paleontológica* y otra *prehistórica*, en numeración común; las de la *serie paleontológica* son las siguientes:

	<u>Pesetas</u>
1. ^a (Mem. núm. 5). <i>Geología y Paleontología del Mioceno de Palencia</i> , por Eduardo Hernández-Pacheco, con la colaboración de Juan Dantín	15,00
2. ^a (Mem. núm. 6). <i>La mandíbula Neandertaloide de Bañolas</i> , por E. Hernández-Pacheco y Hugo Obermaier	3,00
3. ^a (Mem. núm. 21). <i>Paleogeografía de los mamíferos cuaternarios de Europa y Norte de Africa</i> , por Ismael del Pan	4,00
4. ^a (Mem. núm. 28). <i>La llanura de la Mancha y sus mamíferos fósiles</i> , por Eduardo Hernández-Pacheco	3,00
5. ^a (Mem. núm. 30). <i>El Mioceno continental ibérico y su fauna malacológica</i> , por José Royo Gómez	10,00
6. ^a (Mem. núm. 33). <i>Algunos dientes de Lofiodontidos descubiertos en España</i> , por F. Roman	1,50
7. ^a (Mem. núm. 35). <i>Teoría del glaciario cuaternario por desplazamientos polares</i> , por el Conde de la Vega del Sella	5,00
8. ^a (Mem. núm. 36). <i>Los Numulítidos de España</i> , por Federico Gómez Lluca	30,00
9. ^a (Mem. núm. 37). <i>Fisiografía, geología y paleontología del territorio de Valladolid</i> , por Francisco Hernández-Pacheco	15,00