

La Cristalografía y sus aportaciones a la ciencia y la técnica

A lo largo del siglo XVIII hubo una corriente general de sistematización de las Ciencias de la Naturaleza. Se realizaron grandes clasificaciones naturales de los reinos animal y vegetal. Los nombres de Linneo, Buffon, Cuvier, etc. quedarán para siempre ligados a ellas y sus criterios de clasificación; con las naturales modificaciones impuestas por los descubrimientos que siguieron, persisten hasta nuestros días.

Pero un tercer reino, el mineral, se resistía a los esfuerzos de numerosos científicos. La ausencia de criterios racionales de clasificación, frenaba todos los intentos. El concepto de género, de especie, tan claros en Botánica y Zoología, no era tan manifiesto en los Minerales. Las características de éstos, tales como: color, dureza, densidad, sabor, etc., incluso las formas poliédricas que a veces exhiben, ninguna era concluyente. Así cada autor escogía la que mejor se acomodaba a su fin.

Por estas razones la mineralogía seguía presentando un cuadro tan poco científico, como en los tiempos de Agrícola. Dominada por el empirismo, no era sino un desordenado conjunto de datos y técnicas.

De entre los numerosos criterios ensayados, para su ordenación, había dos que parecían los más prometedores: la composición química y las formas geométricas cristalinas, que espontáneamente presentan gran número de sustancias minerales.

Desgraciadamente, el desarrollo que entonces presentaba la química, era insuficiente para dilucidar muchos de los problemas que surgían del estudio de los minerales. Por esta razón, el carácter cristalino de los mismos, con sus formas geométricas definidas, va a polarizar la atención de algunos naturalistas, y sus trabajos, darán lugar al nacimiento de una nueva ciencia —la Cristalografía—, esto es: descripción de los cristales, y que como vemos está estrechamente ligada a la Mineralogía.

Las primeras observaciones cristalográficas, presididas por un carácter



científico, fueron realizados en el siglo XVII por Stensen o Stenon. Al estudiar los cortes efectuados en cristales de cuarzo, nota que aunque las dimensiones de las caras se modifiquen, los ángulos que forman su intersección, permanecen inalterables en su valor.

Años más tarde, en pleno siglo XVIII, Romé de L'Isle, generalizó estos resultados a numerosas especies minerales. Comprueba su validez en todas ellas y enuncia la ley de la constancia de los ángulos diedros, como una característica de la especie cristalina.

Con esta ley podemos decir que nace la Cristalografía como verdadera Ciencia, pero, al mismo tiempo, el descubrimiento de L'Isle ofrece al mineralogista y al químico, un método simple de identificación de cuerpos cristalinos, método que aun hoy día, bien que con técnicas e instrumentos mucho más refinados, sigue siendo de gran valor.

Ahora bien, la manifiesta regularidad de la materia cristalina, sus características de simetría y anisotropía, exigían una explicación racional. A este fin Haüy comienza una serie de estudios sobre las formas geométricas y las propiedades físicas de los cristales. Fruto de sus observaciones, es la ley de racionalidad de los parámetros de las caras; y la aparición de una ingeniosa hipótesis que justificará, a partir de la naturaleza interna de los cristales, todas sus propiedades conocidas. Los supone contruídos por acumulación compacta y siguiendo las leyes de la simetría, de partículas elementales, —moléculas integrantes las llamó—, que daban lugar a todo el edificio cristalino.

Pese a los numerosos defectos que presenta esta teoría, merece la pena detenerse brevemente a considerar dos de sus aspectos básicos.

En primer lugar la hipótesis de Haüy, rompe con la idea, muy común en su época, de la continuidad de la materia. En muchos aspectos, el concepto de molécula integrante vuelve a actualizar la vieja hipótesis atomista, olvidada durante siglos.

En segundo lugar, consideremos la intuición genial de Haüy, en cuanto a la forma que atribuye a esta molécula. Efectivamente la supuesta por él; coincide en muchos casos, con la que la ciencia actual concede a la celdilla elemental, esto es: aquella parte mínima de sustancia cristalina que por sola repetición, da lugar a todo el cristal.

Gracias a estos trabajos, la Cristalografía que en un principio nace de una necesidad de la Mineralogía, se separa de ésta para constituir una nueva ciencia pura, sin el carácter técnico que la Mineralogía ha conservado.

Cuando Haüy intenta la sistemática mineral, a base de los nuevos criterios cristalográficos, se produce una fuerte reacción, entre los naturalistas partidarios de los criterios químicos.

De esta oposición, presidida por Berzelius y su discípulo Mitcherlich, van a partir una serie de experiencias, trabajos, etc. para favorecer su posición, que en resumen, resultan en extremo beneficiosos para la Ciencia.

El fenómeno del Isomorfismo, descubierto por Mitcherlich, plantea una seria dificultad para la teoría de Haüy, que suponía una especie cristalina para cada sustancia química. Haüy argumenta entonces que esas sustancias químicas isomorfas, presentan químicamente un extraordinario parecido. A su vez arguye con otro fenómeno, el Polimorfismo; concretamente con el caso Calcita-Aragonito, ambas, especies cristalinas distintas, pero de idéntica composición química: CO_3Ca . Y no solamente distintas en forma de cristalización, sino en otras propiedades físicas como densidad, dureza, índice de refracción, etc. El análisis químico no es capaz de distinguir ambas sustancias, puesto que no tiene en cuenta, uno de los aspectos esenciales de la sustancia cristalina, la ordenación de sus elementos constituyentes, según una matriz en el espacio.

Paralelamente a los descubrimientos cristalográficos, la química se desarrolla y Dalton enuncia la ley de las proporciones múltiples, que permite a Berzelius la formulación ponderal. Sus trabajos junto a los de Avogadro y Ampere, este último basándose en los resultados obtenidos por la Cristalografía, sobre la estructura de la materia, ponen de manifiesto, unos bajo el aspecto ponderal, los otros según el carácter espacial, un fenómeno o mejor una característica esencial de la materia, su discontinuidad.

Por una parte el aspecto ponderal de la materia conduce, a la concepción de una discontinuidad en la forma de corpúsculos o átomos de masa. El aspecto espacial, lleva a la consideración de una característica esencial de la materia cristalina: su periodicidad en el espacio.

Este concepto de la repetición periódica, se desarrolla años más tarde (1848-1850) con los trabajos de Bravais, que introducen el concepto de «malla» y «red espacial». Gracias a sus estudios, la ley de la racionalidad de Haüy, sufre una nueva formulación más precisa, en la de los planos reticulares densos. Además, se clasifican los poliedros posibles como formas cristalinas, en grupos y subgrupos de simetría. Por último se refina la hipótesis estructural de Haüy, enunciándose la hipótesis de la estructura periódica, según una ley reticular en el espacio, definiéndose las catorce redes paralelepédicas fundamentales.

Gracias a estos estudios teóricos, el cristalógrafo tiene a su disposición un cuerpo de doctrina, que le permite la explicación racional de numerosas propiedades físicas de los cristales, y que como veremos más adelante, ofrecen las más variadas posibilidades a la Técnica.

Malus descubre en el 1818 la polarización cromática y define los ra-

yos polarizados, enriqueciendo de este modo los conocimientos de la Óptica. Poco después Nicol construye con Espato de Islandia, los prismas de polarización que llevan su nombre.

Gracias a estos descubrimientos se hace posible, la introducción en la cristalografía de un valiosísimo auxiliar, el microscopio polarizante, que permite el estudio de cristales, minerales y rocas en láminas delgadas.

A pesar de la solemne condenación, formulada por Comptes, de la microscopía —una de las diez ciencias consideradas por él como inútiles—, su empleo en la materia sólida fue y sigue siendo extraordinariamente fructífero. El concepto de sustancia cristalina, se extendió enormemente, ya que mediante el microscopio, se pudo comprobar la cristalinidad de numerosísimas sustancias que en un principio se habían supuesto amorfas, dado el mínimo tamaño que adquieren los cristallitos que las forman.

Mediante el microscopio polarizante se comienza el estudio de las rocas, exponentes del quimismo de la tierra y de la dinámica de los procesos geológicos. La metalurgia recibe un nuevo impulso, al iniciarse el estudio de manera más sistemática y profunda, de las fundiciones y aleaciones de los metales, lo que permitió una notable mejora en sus propiedades técnicas.

Des Cloizeaux, realiza el estudio óptico cristalográfico de 468 sustancias cristalinas, comenzando la revisión que más tarde completarían Groth (1908) y Federov (1920). Demuestra que en las series isomorfas se modifican las propiedades ópticas, en función de la composición química. Descubrimiento que supone una valiosa aportación al análisis químico, por métodos puramente físicos.

Otro descubrimiento de este genial investigador, es la dependencia de ciertos fenómenos ópticos frente al calor, citemos por ejemplo la modificación del ángulo de los ejes ópticos, en los cuerpos biáxicos, descubriendo la modificación permanente de la Ortosa a partir de los 700° C.

Aquellos minerales que por acción del calor sufren una modificación permanente, se denominan «Termómetros geológicos» puesto que nos informan de las condiciones de temperatura, a las cuales tuvo lugar la consolidación, de la roca en que se encuentran. Este descubrimiento de Des Cloizeaux supone un paso fundamental para una nueva ciencia geológica, la Geoquímica.

El análisis del fenómeno físico de la polarización rotatoria de la luz, lleva a la hipótesis de su dependencia, con la asimetría del medio en las formas hemiédricas. Pasteur (1860) pone de manifiesto, que de los dos tipos de meroedría, una solamente es compatible con esta actividad óptica del cristal. Igualmente, en una serie de trabajos demuestra que la simetría de los poliedros cristalinos, se liga íntimamente con la simetría



de la repartición de la materia en su interior. Su memoria en la que deduce de la asimetría cristalina, la asimetría molecular, abre en efecto un inmenso campo a la Química, especialmente la Orgánica, permitiendo el desarrollo de la estereoquímica y el posterior concepto del carbono tetraédrico.

Pero otro descubrimiento de Pasteur, parece aún más tentador en sus posibilidades: los compuestos que manifiestan esta actividad óptica, no se consiguen directamente por síntesis, sino por la elaboración de los organismos vivos. A este respecto Pasteur dice: «La asimetría molecular establece una profunda línea de demarcación entre los productos orgánicos naturales y los artificiales. En el momento de su formación, una vez que los átomos elementales que deberán constituir la molécula están presentes, y en el momento en que se va a producir su combinación, una secreta influencia agrupa asimétricamente los átomos que se agitan, para dar lugar a una combinación vital. Esto es a mi parecer, un hecho fundamental que toca a las más ocultas condiciones de la creación y de la vida» (1). Más adelante veremos como la situación de los grupos activos en el interior de las moléculas en los ácidos nucleicos de los cromosomas y la asimetría molecular, parecen jugar un papel fundamental en el código genético de los mismos.

Los estudios sobre la simetría, parte fundamental de la cristalografía, prontamente desbordaron los límites de esta ciencia y se extendieron a los de la física pura. Así Curie, desarrolla una teoría sobre la simetría de los fenómenos físicos. Teoría abstracta que entra de lleno en los fundamentos de nuestro Universo, puesto que establece las reglas que delimitan la relación: causa-efecto, efecto-causa.

Precisamente esta hipótesis básica, ha sufrido este mismo verano serias críticas, como resultado de las experiencias del Prof. Franzini de la Columbia University. Al analizar 1.441 fotografías del proceso de destrucción de mesones-eta, en la cámara de niebla, encontró que en el 53 % de las fotografías, el pión positivo, producto de la destrucción del mesón-eta, tenía aparentemente más energía que su simétrico negativo. Sin embargo un estudio mucho más exhaustivo realizado en la Organización Europea de Investigación Nuclear, sobre 10.665 fotografías no ha puesto de manifiesto diferencias significativas en la energía de los piones positivos y negativos. Resultado que confirma una vez más la teoría de Curie.

Dentro del estricto campo cristalográfico, la aportación de este científico es fundamental, en lo referente al fenómeno de la piezoelectricidad, una de las propiedades físicas de los cristales que poseen un eje polar, con

(1) (Citado por M. Longchambon, pág. 38. Bull. Soc. Franç. Miner. Crist. (1954) LXXVII.

más interesantes aplicaciones prácticas. No olvidemos tampoco su teoría sobre el crecimiento de los cristales. Aplicando los resultados de la teoría capilar de Gauss para los líquidos, es el primer intento serio, para desenmarañar un complejo fenómeno, que aun después de los trabajos recientes de Burton, Cabrera y Franck, sigue sin estar totalmente esclarecido.

Pese a todos los éxitos que jalonan la historia de la Cristalografía durante el pasado siglo, al comienzo del actual, parece una ciencia muerta, incapaz de ofrecer nuevas conquistas al pensamiento humano.

En su aportación más pura, sólo nos muestra la hipótesis reticular de Bravais, ligada a la materia en estado sólido. Pero un experimento genial va a demostrar de manera incontrastable, no sólo la realidad de esta abstracción de Bravais, sino la naturaleza de una misteriosa radiación descubierta por el físico alemán Roentgen, y que por su índole desconocida fue bautizada con el nombre de Radiación X.

Como tal radiación se sospechaba en ella una naturaleza electromagnética ondulatoria, semejante a la de la luz. Todos los intentos para confirmar su naturaleza ondulatoria mediante fenómenos de difracción, habían fracasado. Sin embargo la intuición del Prof von Laüe, rompió el punto muerto a que se había llegado. Apoyándose en la hipótesis reticular de la estructura de los cristales, decidió emplear uno de blanda, como red de difracción para los rayos X. El experimento fue realizado bajo su dirección, por Friederich y Knipping, con resultado positivo. De esta manera quedan definitivamente demostradas la naturaleza ondulatoria de los Rayos X y la estructura reticular interna de los cristales.

Los hechos que se han derivado de esta experiencia, la hacen merecedora del calificativo de una de las más geniales y fructíferas.

Efectivamente, gracias a los progresos de la Química, se había conseguido por métodos ponderales, medir la masa atómica. Ahora y mediante la difracción de los rayos X, se consigue una medida de los parámetros espaciales y se determina el radio iónico y atómico en los cristales.

Antes de cumplirse el año del experimento de von Laüe, Bragg determina la primera estructura, la del ClNa. Gracias a los trabajos teóricos de Bravais, Schönflies y tantos otros cristalógrafos, se consigue desvelar el misterio de la estructura íntima de la materia cristalina, se sitúan aquellos hipotéticos átomos, con sus dimensiones reales, en las no menos hipotéticas moléculas integrantes, conocidas sus dimensiones verdaderas y su auténtica forma.

Vemos pues que se abre a la Cristalografía un campo inmenso. Aquella ciencia que nació para introducir orden en el caos de la Mineralogía, ahora es una compañera inseparable de la Física y Química, esencial



para el estudio del átomo, de su volumen, valencia, afinidad, de sus combinaciones y de las propiedades de los compuestos que de ellas se derivan.

Son tan amplias las posibilidades que se ofrecen a esta ciencia, a partir de esta fecha que para algunos autores, —Lonsdale por ejemplo—, la Cristalografía se inicia con el experimento de von Laüe.

Y ciertamente que la difracción de los Rayos X, ensancha los límites de la Cristalografía, pues si la cualidad esencial del sólido cristalino, es la repetición periódica de sus elementos constitutivos, según un retículo elemental, el concepto de cristal, —como cuerpo sólido homogéneo y anisótropo, de aspecto poliédrico, objeto natural de estudio para esta Ciencia—, queda englobado en el mucho más extenso del estado cristalino, del que el cristal sólo es un caso límite. Efectivamente, sustancias tan alejadas del concepto clásico de cristal, tales como el caucho, las proteínas y la seda, se han revelado de naturaleza cristalina y actualmente se estudian por métodos cristalográficos. Es más, puede afirmarse que el estudio de la materia en estado sólido, ha venido a ser objeto de la Cristalografía, o por lo menos en gran parte, pues de ella son los criterios que se emplean y los métodos que se utilizan.

Si examinamos la labor realizada y el acumulo de conocimientos adquiridos sobre el estado cristalino, durante estos últimos cincuenta años, nos asombramos de la riqueza de datos reunidos: miles de estructuras, tanto de minerales como de compuestos inorgánicos y orgánicos, han sido determinadas, con el natural beneficio de una mejor comprensión de sus propiedades, tantas veces utilísimas en la práctica. Recordemos a este respecto que la determinación de la estructura de la penicilina, fue el punto de partida para su síntesis por Hopkins.

Pero examinemos brevemente, los éxitos logrados por la Cristalografía, en colaboración con otras Ciencias y las posibilidades técnicas que los conocimientos adquiridos pueden ofrecer.

Si recordamos que los métodos clásicos de la química, eran muy poco eficaces en los compuestos insolubles y frente a los fenómenos de isomorfismo y polimorfismo, la posibilidad de determinar la estructura, despeja incógnitas que parecían muy difíciles de resolver. Las aleaciones metálicas, toda la química de los silicatos, se han podido estudiar, gracias a los métodos cristalográficos que desentrañaron sus complejas estructuras. Las reacciones en estado sólido, su dinamismo, en función de la presión y temperatura, han dejado de ser zona prohibida, permitiéndose la síntesis de nuevos compuestos, muchos de los cuales ofrecen interesantes propiedades técnicas.

Los estudios en sistemas heterogéneos, sólido-gas, sólido-líquido, se

han visto favorecidos, localizándose las zonas catalíticamente activas y esclareciéndose muchos fenómenos de adsorción. Así, los fenómenos de cambio iónico que presentan sustancias naturales, arcillas, ceolitas—, bien de síntesis, —resinas cambiadoras—, y que tan interesantes aplicaciones ofrecen en procesos de desalificación de aguas y aislamiento y beneficio de elementos muy afines, por tanto difíciles de separar por los métodos clásicos, —lantánidos y actínidos—, etc.

Si revisamos el campo de la Física, encontramos una aportación aun más extensa.

Desde los comienzos de la Cristalografía, su estudio enriqueció continuamente a la Física, los trabajos teóricos sobre la elasticidad de Cauchy, los fenómenos de polarización cromática y rotatoria, descubiertos por Malus, Arago y Biot. Los fenómenos de piezoelectricidad y la teoría de Curie, sobre la simetría de los fenómenos físicos, ya constituye de por sí una aportación inestimable, más aún, si consideramos que la teoría de Voigt, proporciona a la Física un auxilio matemático de tan gran interés, como el cálculo tensorial. Al independizar el análisis matemático de un fenómeno físico, del sistema de coordenadas de referencia, hace factible las bases del cálculo de la teoría de la relatividad.

A partir del descubrimiento de la difracción de los rayos X por los cristales, se suceden los éxitos y las aportaciones a la Física. Los Braggs padre e hijo, descubren la ley que lleva su nombre de la reflexión selectiva de los rayos X, la cual, pone de manifiesto la estructura atómica de los cristales y al mismo tiempo, la naturaleza de la envolvente electrónica del átomo.

La inmediata determinación de las primeras estructuras no sólo abre un inmenso campo a la investigación, sino que es empleada en las más variadas direcciones. Deybe las utiliza para calcular calores específicos. Born para medir las fuerzas de atracción y repulsión entre átomos y los coeficientes de elasticidad, Madelung para estimar la energía de cohesión.

Pero en medio de tantos éxitos, se observan a veces fallos inexplicables. La mecánica clásica no es aplicable en los dominios recién conquistados, y es necesario formular una nueva mecánica. De Broglie plantea toda la moderna mecánica ondulatoria, sobre la dualidad corpúsculo-onda. Tres años más tarde en el 1927, un experimento puramente cristalográfico, demuestra de forma definitiva la existencia de una onda asociada, al electrón acelerado en un tubo de rayos catódicos. Haciendo incidir un haz de estos rayos, sobre una finísima hoja de aluminio, se obtiene un diagrama de difracción de electrones, en todo semejante al producido por los rayos X, según el método de Debye-Scherrer. Este experimento aparte su valor teórico, muestra la posibilidad de construir micros-

copios electrónicos, instrumento que pocos años después, llega a ser una realidad.

Con el tiempo la existencia de una onda asociada a otras partículas materiales, protones, neutrones y átomos, se demuestra por el mismo procedimiento de difracción sobre los planes de un cristal.

La mecánica ondulatoria sigue dando sus frutos, y permite el análisis de las complejas bandas de absorción y emisión de cristales, confirmando el que los electrones de valencia y los responsables de la conductividad, no pertenecen a un átomo determinado, sino al conjunto del edificio cristalino. El detenido estudio del comportamiento de estos electrones, se va a traducir en una mejor comprensión, de los fenómenos eléctricos y magnéticos que presentan ciertos cristales. Así, es posible hasta determinar la distancia mínima, a que han de estar los átomos con momento magnético, para que el cristal resultante presente ferromagnetismo. El análisis de la estructura atómica pone de manifiesto el antiferromagnetismo y el ferrimagnetismo.

El examen cuidadoso de los fenómenos de conductividad eléctrica, ha dado lugar a todo un capítulo de insospechadas posibilidades técnicas, como es el de los semiconductores.

Vemos en fin, que el conocimiento de la estructura interna, se traduce en una mejor comprensión de los fenómenos físicos a ella ligados. La existencia de irregularidades estructurales, presentes en toda clase de cristales, ofrece un nuevo campo de investigación, por las curiosas propiedades que estos «defectos» pueden dar lugar.

Así no sólo la conductividad sino la dureza, plasticidad, elasticidad, color, etc. se muestran fuertemente condicionadas a la presencia o ausencia en el cristal en cuestión, de posiciones vacantes en la red, átomos extraños, planos de deslizamiento, dislocaciones o cualquier otra irregularidad. Su estudio, ha rendido una serie de resultados de gran interés técnico para la moderna electrónica y metalurgia.

Las ciencias biológicas también encuentran poderosos auxiliares en las técnicas cristalográficas. No sólo los productos elaborados por los organismos vivos sino las propias materias que los constituyen, presentan estructura cristalina. Así las proteínas, han demostrado poseer estructuras en hélice, y con refinamientos en las técnicas de difracción de rayos X, ha sido posible determinar las estructuras de los ácidos nucleicos, portadores del código genético. Estos trabajos le han merecido a su realizador (Lonsdale) el Premio Nóbel. Citemos de pasada el curiosísimo fenómeno de los virus cristalizables. Seres vivos que adoptan, en determinadas condiciones, la fija y aparentemente estática estructura cristalina.

Incluso a la medicina ha llegado con interesantes aportaciones la Cris-

talografía. En ella tanto el analista clínico como el patólogo encuentran poderosos auxiliares, bien en la determinación de la textura y proceso de crecimiento, de ciertos agregados cristalinos nocivos para el organismo humano, —cálculos hepáticos y de riñón—, como ciertas enfermedades profesionales. Citemos a este respecto, los trabajos de Clark y Reynolds, para determinar cuantitativamente por difracción de rayos X, la concentración de cuarzo en el polvo de las minas, agente productor de la silicosis.

Hasta en la Cosmogonía han penetrado los conceptos cristalográficos. Desde la hipótesis de un Universo puramente cristalográfico propuesta por Bernal hasta el concepto de Isotropía del Universo de Einstein.

Pero si dirigimos nuestra atención a las aplicaciones que en el mundo de la técnica, han dado lugar los estudios realizados en la Cristalografía, nos sorprende el número de útiles conquistas nacidas de una ciencia pura, tan alejada aparentemente del sentido de lo práctico.

El conocimiento de los fenómenos eléctricos y magnéticos de la sustancia cristalina, se ha traducido en una verdadera revolución de la Electrotecnia y la Electrónica.

Los trabajos sobre la conductividad ha dado lugar a la aparición de toda una serie de diodos, transistores, etc., etc. diminutos que sustituyen con ventaja a las mucho más voluminosas y frágiles válvulas clásicas. Fotocélulas sensibles a la más variada gama de radiaciones. Toda una nueva electrónica basada en circuitos moleculares, que prácticamente desprovistos de inercia y con un mínimo tamaño, aparte el reducido consumo de energía, son capaces de integrarse en los más complicados circuitos. Ellos han hecho posibles los equipos electrónicos que actualmente se emplean en la exploración del espacio.

Fenómenos tales como la piezoelectricidad y seignettoelectricidad, han abierto a la técnica el mundo de los ultrasonidos, empleados en tan variados campos como la medicina y la navegación marítima. Los seignettoeléctricos han encontrado una extensa gama de aplicaciones en los sistemas de grabación y reproducción del sonido. Constituyen también parte fundamental de la «memoria» de algunos modernos cerebros electrónicos.

Los ferromagnéticos tienen actualmente un amplio uso en los equipos de grabación del sonido y la imagen.

En cuanto a las propiedades ópticas, su estudio nos ha provisto de técnicas analíticas de tan frecuente uso, como la Polarimetría. El descubrimiento de nuevas sustancias polarizadoras, ha generalizado los equipos de visión estereoscópica, tanto para vista fija como para el cinematógrafo.

Los fenómenos de centelleo han permitido, la construcción de contadores de radiaciones a cristal de gran sensibilidad.

No olvidemos que los métodos de difracción de rayos X, especialmente el método de polvo, se utiliza cada día más como método analítico, a veces insustituible, como es el caso de los productos metalúrgicos y cerámicos.

Recientemente se han empleado cristales de rubí sintético, con impurezas de átomos de cromo, que debidamente excitados, emiten un potente haz de luz coherente y monocromática. Estos equipos denominados Laser, prometen interesantes aplicaciones que van desde la cirugía (operaciones de desprendimiento de retina, extirpación de tumores) a los sistemas de comunicación a grandes distancias.

Pero donde la Cristalografía y sus técnicas, han producido más avances prácticos, ha sido quizás en la metalurgia y la cerámica.

Dado que los materiales y productos bases de estas industrias eran en muchos casos, difíciles de analizar, por los métodos químicos clásicos y ya que sus más interesantes propiedades técnicas, tienen su origen precisamente en las características estructurales, es lógico que los métodos cristalográficos diseñados para el estudio de fases sólidas, microscopía, difracción de rayos X, dilatometría y análisis térmico diferencial, etc., sean los auxiliares de más frecuente uso. De aquí que la aparición de materiales de las más variadas características: aleaciones especiales, refractarios, dieléctricos, etc., haya sido el resultado natural de la aplicación de los nuevos conocimientos obtenidos, en el estudio de la reactividad del estado sólido.

Citemos por último que los trabajos de nucleación y crecimiento de cristales, han tenido una repercusión inmediata en estas ramas de la técnica. Las estructuras esferulíticas, por ejemplo, confieren una resistencia y elasticidad a materiales cerámicos, vidrios y esmaltes, muy superior a las que normalmente poseían estos productos.

Señalemos a título curioso que los estudios sobre nucleación han permitido aplicaciones tan sorprendentes, como la de producción artificial de lluvia, mediante la siembra con cristales de yoduro sódico de las nubes.

Para terminar yo quisiera referir una vieja anécdota de Franklin.

Cuando este hombre de tan variadas facultades iniciaba sus famosos experimentos con la electricidad, alguien le preguntó: «¿Y para qué sirve la electricidad?». Nuestro sabio contestó con otra pregunta: «¿Y para qué sirve un recién nacido?».

Si nos referimos al objeto de esta lección, la Cristalografía, hemos seguido a lo largo de ella, su vida, desde su nacimiento, como un niño llorón por supuesto inútil, hasta su transformación en una especie de genio benéfico, cargado de regalos para nuestra pobre Humanidad, casi siempre en busca de lo útil y desconfiada por sistema, de todo lo que no le ofrezca una inmediata solución de sus necesidades.

He dicho.