

# Chihuahua, Tierra de Cristales 2014, Año Internacional de la Cristalografía

## Chihuahua, Land of Crystals 2014, International Year of Crystallography

MARÍA ELENA MONTERO-CABRERA<sup>1</sup>, LUIS E. FUENTES-COBAS<sup>1</sup>, MARÍA ELENA FUENTES-MONTERO<sup>2,3</sup>

### Resumen

Se presenta la definición de cristal, su diferencia respecto del vidrio, y la historia del descubrimiento de la difracción de rayos X, cuyo centenario ha motivado la declaración del año 2014 como Año Internacional de la Cristalografía. Se muestran los experimentos de Max von Laue, así como de William H. y William L. Bragg y se explican mediante la analogía con la difracción de la luz visible. Se exhiben las estructuras cristalinas de numerosos materiales importantes para el ser humano, su evolución y su desarrollo. Se exponen qué son los monocristales y los policristales, así como las diferentes estructuras cristalinas del carbono. Se explica cómo el progreso de la cristalografía, junto con la mecánica cuántica, han conducido a la tecnología moderna de la computación y las comunicaciones, comenzando desde el diodo semiconductor y el transistor hasta los modernos microprocesadores. Se describen la ferroelectricidad y la superconductividad y sus aplicaciones. Por último, se divulgan ejemplos del desarrollo moderno de la nanotecnología. Se explica cómo un monocristal nace y crece a partir de un nanocristal, para terminar con la demostración de que Chihuahua es Tierra de Cristales por la presencia de la Cueva de los Cristales Gigantes en Naica.

**Palabras clave:** Naica, cristalografía, estructura cristalina, selenita.

### Abstract

It is presented the definition of a crystal, the differences with glass, and the history of the discovery of the X-ray diffraction, whose centenary has led to the declaration of 2014 as the International Year of Crystallography. The experiments of Max von Laue, as well as of William H. and William L. Bragg are described and explained using an analogy with the diffraction of visible light. The crystal structures of several important materials for human kind, their evolution and development are exhibited. The questions of what are single crystals and what are polycrystals are answered, as well as the different crystal structures of carbon atoms can form. The process of how Crystallography, along with quantum mechanics have led to the modern technology of computing and communications is detailed starting from semiconductor diodes and transistors up to the advent of modern microprocessors. The ferroelectric and superconductor materials are described, and their applications. Finally, examples of modern development due to nanotechnology are disclosed. The explanation of how a single crystal is born and grows from a nanocrystal is provided, finishing with the demonstration that Chihuahua is a land of crystals because of the presence of the Giant Crystals Cave at Naica.

**Keywords:** Naica, crystallography, crystal structure, selenite.

### Introducción

Un chihuahuense visita el Museo Smithsonian de Historia Natural de Washington DC y se enorgullece de encontrar en la exposición un objeto que proviene de Chihuahua. ¿Qué objeto es éste? Una muestra de cristales gigantes de yeso (Figura 1, izquierda). Pero eso no es lo único que le asombra. Aparece expuesto un fragmento muy grande de un meteorito (Figura 1, derecha). ¿Dónde cayó este objeto? En el Valle de Allende, Chihuahua, en febrero de 1969.

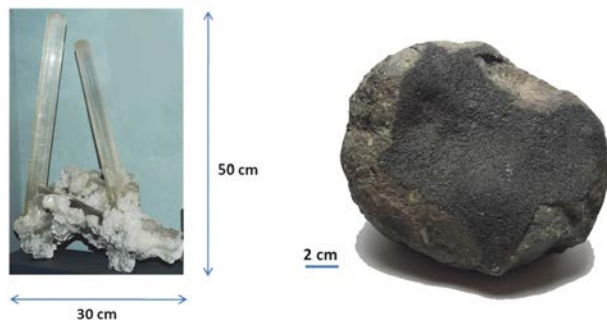
<sup>1</sup> Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua, Chih. México, C.P. 31109, Tel. 52(614) 439-1100.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Químicas, Campus Universitario II, Apdo. Postal 1542-C. Tel. (614) 236-6000. Chihuahua, Chih., México

<sup>3</sup> Dirección electrónica del autor de correspondencia: mfuentes@uach.mx.

El "Meteorito Allende" es el más estudiado en la historia y es del tipo "condrito carbonáceo", formado mayoritariamente por silicatos, óxidos y sulfatos. También contiene agua y compuestos orgánicos. A la vista del chihuahuense, estos objetos son parte de la rica historia minera del estado de Chihuahua. En la historia de México, hasta el día de hoy, las minas de Chihuahua han sido importantes en la producción de plata y oro. Actualmente lo son también en plomo y zinc.

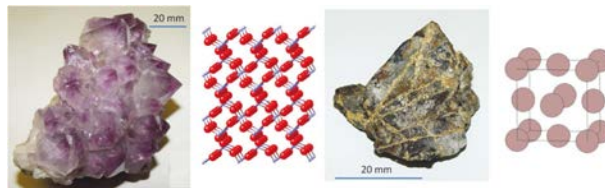
**Figura 1.** Izquierda: imagen de una muestra de cristales gigantes de yeso, extraída de la Cueva de las Espadas, en Naica, Chihuahua (Museo Smithsonian de Historia Natural, Washington, Estados Unidos). Derecha: imagen de un fragmento del Meteorito de Allende, que cayó en 1969 en Chihuahua (Raab, 2005).



En el lenguaje común del párrafo anterior hemos hablado de minerales, cristales, vidrios... Pero... el cristal y el vidrio ¿no son equivalentes? Bueno, el caso es que *el cristal y el vidrio no son lo mismo*.

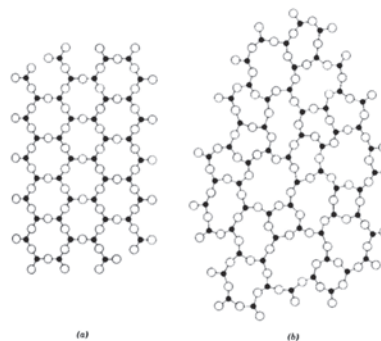
Para la física, la química y la ciencia en general, un *cristal es un arreglo o estructura periódica de átomos*, iones o moléculas, generalmente en las tres dimensiones espaciales. La palabra *cristal* tiene su origen en la palabra griega *κρύσταλλος* (crystallos), que es la variedad de cuarzo que conocemos como cristal de roca (Figura 2). Los elementos que componen las estructuras cristalinas se repiten cuando se observan a lo largo de una dirección o se realiza alguna rotación (Figura 2). Cuando los cristales se pueden identificar por separado a simple vista o con una lupa se les llama *monocristales*. Los materiales cristalinos más abundantes en nuestro entorno son *policristales*, es decir, uniones de cristallitos muy pequeños orientados en todas direcciones.

**Figura 2.** Izquierda: imagen de monocristales de cuarzo (cristal de roca), y estructura cristalina del alfa-cuarzo, dióxido de silicio-SiO<sub>2</sub> puro a temperatura ambiente. Derecha: muestra de roca con oro nativo policristalino y estructura cristalina del oro. Museo de Mineralogía de la Universidad Autónoma de Chihuahua.



La confusión entre las palabras *vidrio* y *cristal* se origina en Murano, Italia, donde ya en el siglo XV se producía un vidrio incoloro de gran calidad, parecido al cristal de roca, y se le llamaba *cristallo*. La estructura del vidrio es aperiódica o *amorfa* (Figura 3), aunque conserva la regularidad dentro de la unidad de SiO<sub>2</sub>.

**Figura 3.** Contraste entre el esquema bidimensional de la estructura periódica de un cristal de óxido de aluminio (alúmina, corindón, rubí, zafiro) y la estructura aperiódica o «amorfa» del óxido de aluminio amorfo. Los átomos de oxígeno se representan como círculos claros y los de aluminio como puntos negros. Obsérvese como el entorno de los «átomos» es prácticamente igual en ambas estructuras, pero el corindón es periódico, posee «orden de largo alcance», mientras que el óxido amorfo sólo posee «orden de corto alcance».



## La estructura cristalina. 2014, Año Internacional de la Cristalografía

La primera descripción registrada de la periodicidad de los elementos cristalinos la realizó un destacado científico del Renacimiento: el matemático y astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630). Kepler observó que los cristales de nieve son siempre de seis esquinas, nunca de cinco o de siete. Estas

observaciones las escribió en el tratado «El Copo de Nieve de Seis Esquinas» (Kepler, 1611). Desde el tratado de Kepler hasta la primera década del siglo XX se hicieron aportes muy importantes a la descripción del ordenamiento y la simetría en la estructura cristalina. Así, se tenían elementos indirectos para pensar que los cristales eran arreglos tridimensionales ordenados con periodicidad cercana a  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0.0000001 \text{ mm}$ . Pero los hallazgos decisivos se realizaron a partir del descubrimiento por Laue, en 1912, de la Difracción de rayos X.

Los rayos X fueron descubiertos por Roentgen en 1895. La humanidad quedó cautivada por este descubrimiento de modo que el primer Premio Nobel de Física fue para Roentgen. Nadie sabía qué eran esos rayos, por eso se les llamó *rayos «x»*.

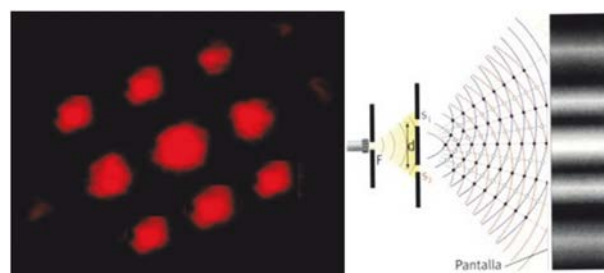
Diecisiete años después, se descubrió la difracción de rayos X, simultáneamente con la estructura electromagnética de los rayos X. El experimento de Laue fue un momento histórico para la ciencia: por primera vez en la historia, el hombre pudo ver la maravillosa arquitectura de la materia a escala atómica. El salto fue de poder observar (con los mejores microscopios de la época) objetos del orden de la centésima de milímetro a observar y medir objetos de la millonésima parte de un milímetro. Además, en ese mismo experimento, Laue y sus ayudantes descifraron el misterio de los rayos X: demostraron que se trataba de ondas electromagnéticas nanométricas (hoy día los rayos X se siguen llamando «X», a pesar de que se les quitó el halo de misticismo que los rodeaba).

¿Con qué contó Laue para su descubrimiento? Con sus fieles asistentes Friedrich y Knipping, un generador de rayos X y un cristal de sulfato de cobre. Ellos hicieron incidir un haz de rayos X sobre su cristal, de modo que la placa fotográfica colocada detrás quedó estampada con un patrón de manchas bien definidas. ¡Obtuvieron difracción de rayos X: los rayos X eran ondas de  $1 \text{ \AA}$  y el cristal era una red periódica de átomos!

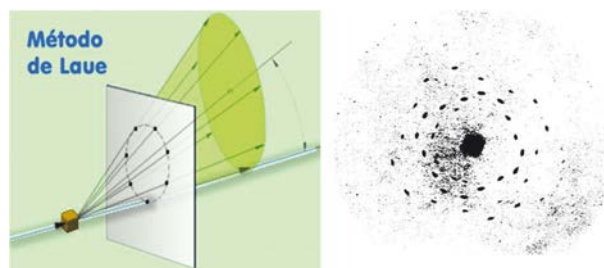
Laue comprobó que los rayos X descubiertos en 1895 tenían la misma naturaleza de la luz visible. Las ondas de luz visible, al superponerse después de atravesar una rejilla, pueden reforzar la intensidad o brillantéz en la imagen que producen en una pantalla,

o pueden anularla, produciendo franjas. Este fenómeno obedece a la naturaleza ondulatoria de la luz visible y a la periodicidad de las rendijas en la rejilla (esto es, al carácter periódico tridimensional de los cristales) (Figura 4). En 1914 Laue recibió el Premio Nobel de Física por su descubrimiento. Conmemorando el centenario de este acontecimiento, la UNESCO y la ONU declararon al actual 2014 Año Internacional de la Cristalografía.

**Figura 4.** Difracción en luz visible: un puntero láser produce un haz de luz que atraviesa un pañuelo y el haz se divide en muchos haces. A la derecha aparece el esquema simplificado del fenómeno de difracción en una red. Esquema extraído de Fisicanet, [http://www.fisicanet.com.ar/fisica/ondas/ap11\\_luz.php](http://www.fisicanet.com.ar/fisica/ondas/ap11_luz.php).



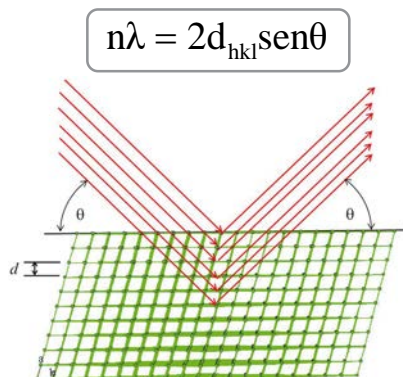
**Figura 5.** Esquema de medición y patrón de difracción de rayos X sobre un monocristal de sulfuro de cinc (Laue, 1915).



Muy poco después del descubrimiento de Laue (en 1914, hace exactamente 100 años), William H. Bragg (1862-1942) y William L. Bragg (1890-1971), padre e hijo, aplicaron la analogía (que hemos usado aquí) de la difracción de rayos X con la difracción de luz visible para explicar la difracción en cristales y descifraron las estructuras de algunos cristales importantes. Como resultado, enunciaron la famosa Ley de Bragg: los rayos X en un cristal se difractan cuando un múltiplo de la longitud de onda de los mismos se corresponde con la distancia entre los planos que forman los átomos en la estructura regular de los cristales.

El trabajo de los Bragg sobre difracción de rayos X por los cristales les hizo merecer el Premio Nobel de Física de 1915, mientras que la revolución iniciada por Laue y los Bragg llevó a la humanidad a un Siglo XX gobernado por los descubrimientos en Cristalografía.

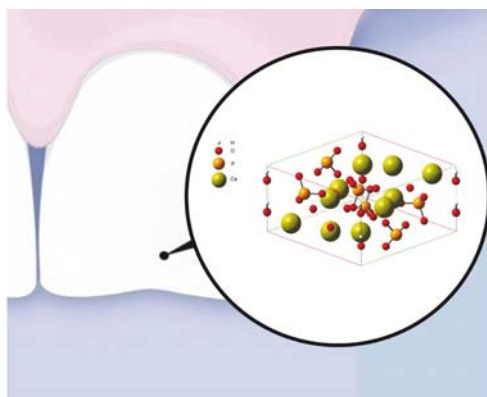
Figura 6. Ley de Bragg.



## La maravillosa estructura de los cristales

Muchos materiales de nuestro cuerpo y de nuestro entorno son cristalinos. Sus apariencias son sumamente variadas e insospechadas. La primera referencia es el cuerpo humano: los huesos y los dientes contienen el calcio y el fósforo en el compuesto cristalino *hidroxiapatita*  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ . Su estructura cristalina tiene la apariencia de la Figura 7.

Figura 7. Estructura cristalina de la hidroxiapatita de los dientes (Menendez-Proupín, 2011).



Otros materiales comunes cristalinos, con sus estructuras, son los siguientes:

Hierro (Figura 8) y sal común o cloruro de sodio (Figura 9).

Figura 8. Meteorito metálico de hierro-níquel pulido, de estructura ferrítica, con detalle microscópico que muestra líneas características de su crecimiento sin gravedad, y estructura *cúbica centrada* de la ferrita. Museo de Mineralogía de la Universidad Autónoma de Chihuahua.

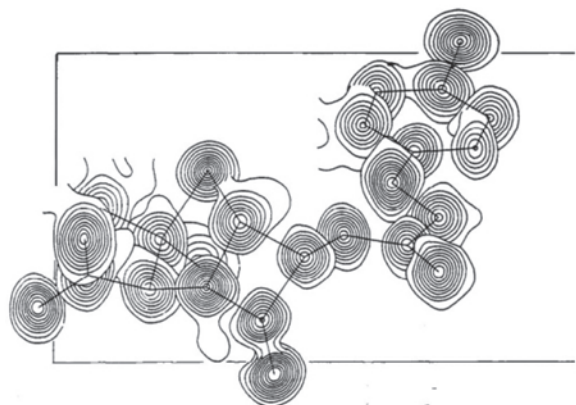


Figura 9. Cristales de halita, cloruro de sodio mineral, con su estructura cristalina tal como la determinó L.W. Bragg en 1913 (Bragg, 1913), del tipo *cúbica centrada* en las caras. La simetría de esta estructura es similar a la del oro, plomo, aluminio, níquel, plata y platino. Museo de Mineralogía y Geología de la Universidad de Harvard, EUA.



Cabe destacar que las estructuras cristalinas han permitido describir y después reproducir con calidad en la industria farmacéutica muchos medicamentos. En la era moderna se exige el conocimiento de la estructura cristalina de los fármacos para que sean aprobados por las autoridades de Salud Pública. Una pionera en este campo fue la cristalógrafa inglesa Dorothy C. Hodgkin, quien ganó el premio Nobel de Química en 1964 por sus aportes en la cristalografía de importantes fármacos modernos (Figura 10).

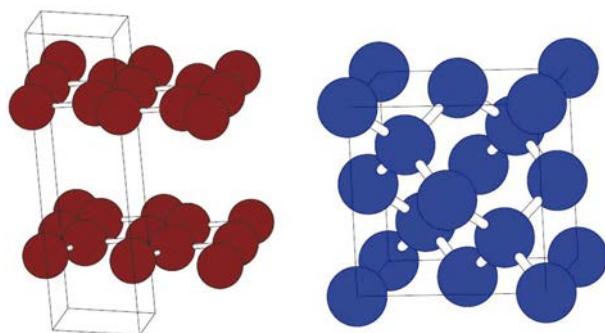
**Figura 10.** Estructura de la bromofenoximetilpenicilina, determinada y presentada por Dorothy Hodgkin (Hodgkin, 1964).



## El carbono en sus diferentes estructuras.

El carbono es un elemento químico maravilloso, que es capaz de cambiar mucho sus propiedades en dependencia de su estructura cristalina. Frecuentemente sus átomos se unen entre sí mediante *enlaces* muy fuertes, llamados *covalentes*. Algunas veces estos átomos se unen «todos con todos», con una simetría que forma tetraedros. Esta estructura tiene simetría cúbica y forma el diamante (Figura 11). Otras veces el carbono forma planos donde los átomos están enlazados fuertemente, formando hexágonos planos, pero los planos entre sí tienen un enlace débil. Este es el caso del grafito, en el cual los planos se deslizan fácilmente unos sobre otros. El carbono puro forma otras fases que veremos más adelante.

**Figura 11.** Izquierda: estructura del grafito, de simetría hexagonal; derecha: estructura del diamante, de simetría cúbica.



## La importancia de los cristales en el desarrollo del ser humano

La interacción de los antecesores del hombre moderno con los instrumentos de trabajo determinó su desarrollo y, consecuentemente, la aparición del *homo sapiens* hace 200000 años. La pre-historia comienza en la llamada Edad de Piedra, hace más de dos millones de años. Los instrumentos que desarrolló el hombre para su supervivencia comienzan con el uso de las piedras, en particular con las llamadas sílex y pedernal, que son policristales de silicio. A finales del Neolítico, ya conociendo las cerámicas, aprendió primero a dar forma a los metales y después aprendió a extraer y fundir los metales que se hallan en el ambiente, inventó la *metalurgia*.

La elaboración del hierro aparece en los alrededores del 2500 a.C. La siderurgia constituyó la etapa decisiva para el posterior desarrollo de la sociedad. Lo mismo se puede decir del perfeccionamiento de la cerámica, el concreto y otros materiales policristalinos.

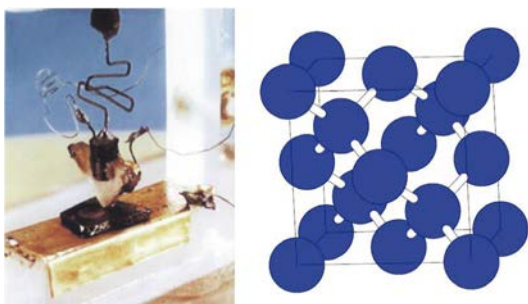
Los materiales cerámicos son materiales *policristalinos* originalmente fabricados sobre la base de silicatos (compuestos de óxido de silicio de diferentes grados de complejidad) preparados con altas temperaturas. El proceso moderno, que se realiza a altas presiones y con casi todo tipo de óxidos, se llama *sinterización*.

## La importancia de los cristales en la sociedad moderna

Vamos a saltar... ¡al siglo XX! Y del siglo XX, nos ubicamos en el entorno de la II Guerra Mundial. Al principio del siglo se descubrieron en avalancha los rayos X, la radiactividad, la estructura atómica, la difracción de rayos X, se formuló la *mecánica cuántica*, la física nuclear. Sobre los hombros de esta estructura, se estudiaron y formularon nuevas propiedades de los materiales. Se descubrió el comportamiento *semiconductor* de materiales como el silicio y el germanio puros. Ambos elementos cristalizan de manera idéntica al carbono en el diamante. Sobre la base de la cristalografía y la mecánica cuántica se propuso el modelo de los «electrones y huecos» para caracterizar la conducción

en los semiconductores. Lo que inicialmente parecía un ejercicio académico de *crecer monocristales* de germanio se convirtió en la sustitución de los llamados «diodos y triodos al vacío» por el primer *transistor* (Brattain, 1960). Shockley, Bardeen y Brattain recibieron el Premio Nobel de Física de 1956 por la invención del transistor (Figura 12).

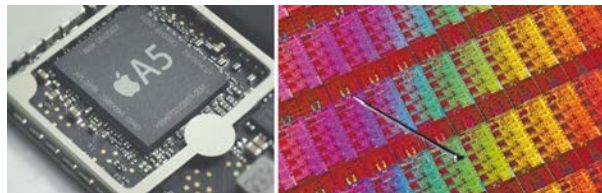
**Figura 12.** De izquierda a derecha: imagen del primer transistor de contacto (AT&T Bell Labs/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc.) y estructura cristalina del germanio y el silicio.



La era del transistor y los semiconductores cambió drásticamente, al paso de pocos años, la vida cotidiana. Comenzó a invadir la electrónica moderna, primero a través de los aparatos de radio. Texas Instruments sacó el primer transistor comercial en 1954, y la aparición de los radios portátiles a transistores en los Estados Unidos la hizo la entonces desconocida firma japonesa Sony, en 1955. Después llegaron las computadoras, ya con mayor desarrollo de los circuitos llamados *integrados*, que son sobre la base de silicio y de otros semiconductores de compuestos químicos con características semejantes. La aparición de diodos luminiscentes siguió introduciendo posibilidades, que son las que han dado lugar al fax, la fotocopiadora y los escáneres. La miniaturización de los circuitos semiconductores en *láminas delgadas monocristalinas* posibilitó el desarrollo de microprocesadores, computadoras personales y teléfonos celulares. Hoy en día se están fabricando circuitos nanométricos por todas las grandes compañías de microprocesadores (Figura 13).

Las propiedades de los cristales aprovechadas en la tecnología moderna no se limitan a los semiconductores. La piezoelectricidad, ferroelectricidad, superconductividad, el supermagnetismo, son propiedades ampliamente utilizadas.

**Figura 13.** Izquierda: microprocesador Apple; derecha: oblea de microprocesadores Intel Haswell, con un alfiler para comparar el tamaño.



Una familia de materiales que tienen un enorme impacto en la tecnología y en la vida cotidiana son los ferro-piezoelectricos cerámicos. Pondremos como ejemplo el llamado PZT, o titanato-zirconato de plomo. La polarización eléctrica proporcionada por la estructura cristalina tipo *perovskita* de la cerámica PZT permite producir señales eléctricas cuando el material se comprime. Alternativamente, si el material se polariza, se produce una deformación de la pastilla. Con las propiedades piezoelectricas de la PZT se producen los generadores y detectores de ultrasonido. El ultrasonido se emplea en la geología, la pesca, el diagnóstico médico (sonografía, ultrasonido Doppler, ultrasonido terapéutico, manómetro digital de tensión arterial, etc). Con las propiedades ferroelectricas se fabrican memorias para las computadoras.

En México colaboran varios grupos en las investigaciones de ferro-piezoelectricos. Un ejemplo es la búsqueda de materiales que combinan la *ferroelectricidad con magnetismo*. Un grupo de investigadores de CIMAV y la Universidad Autónoma de Chihuahua tiene una participación destacada en este tema (Reyes, 2007). En estas *perovskitas*, por ejemplo el  $BiFeO_3$ , el átomo «central» de hierro no se encuentra exactamente en el centro del cubo y esto genera un dipolo eléctrico (Figura 14).

Hablando de cerámicas, podemos resaltar otras propiedades que se aplican en diferentes campos. Mencionaremos los ejemplos de aislamiento térmico excepcional y superconductividad de «alta temperatura», con las cerámicas llamadas *YBCO*. Los ladrillos refractarios de dióxido de silicio resisten temperaturas superiores a los 1650 °C y se les emplea como material para las paredes de los hornos para fundición del acero.

**Figura 14.** De izquierda a derecha: manómetro digital de tensión arterial, cerámicas PZT comerciales y estructura cristalina tipo perovskita de las PZT, mostrando el desplazamiento relativo de átomo central de titanio o zirconio asociado a una polarización eléctrica.



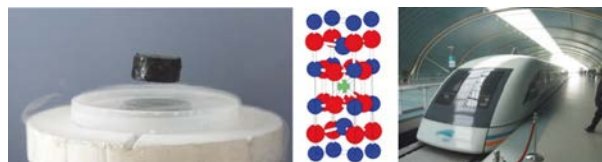
## Trenes que viajan a 430 km/h

La superconductividad es un fenómeno que amerita mención. Consiste en que a temperaturas bajas (cercas a  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o menores), hay materiales que no ofrecen resistencia al paso de la electricidad. Para mantener estas cerámicas a esas temperaturas se suele utilizar nitrógeno líquido. La temperatura del nitrógeno líquido ( $-195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) no es considerada extremadamente baja en laboratorios de física. Para los especialistas, «extremadamente baja» es una temperatura del orden de  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  (unos pocos Kelvin). A las cerámicas *YBCO* se les llama «superconductores de alta temperatura».

Para muchos, es familiar advertir que un cargador de teléfono celular se calienta cuando está en uso. Eso se debe a la resistencia al paso de la electricidad que ofrecen incluso los mejores conductores (no superconductores) de la electricidad, como son el cobre y el aluminio. Los superconductores no ofrecen resistencia, y no es la única propiedad extraordinaria que tienen. Tampoco permiten la existencia de campo magnético en el interior del material (efecto Meissner). Estas extraordinarias propiedades permiten aplicaciones técnicas importantes: el uso de superconductores permite la fabricación de los tomógrafos de resonancia magnética que se emplean en medicina, pues los campos magnéticos que hay que generar son muy altos para que sean capaces de orientar a los núcleos de los átomos en los que se fundamenta la resonancia magnética. El efecto Meissner produce la llamada «levitación», que puede permitir la construcción de dispositivos sin fricción. De hecho, ya se ha puesto en práctica comercial en los trenes *Maglev* (del inglés *magnetic levitation*), en la línea *Transrapid* del aeropuerto de Shanghai, que cubre una trayectoria de 30 km en siete minutos.

El superconductor que se usa en los electroimanes de los tomógrafos, de los grandes aceleradores de partículas, etc., no es de «alta temperatura» sino de «baja temperatura» (temperatura del helio líquido,  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Esto actualmente se debe a que los superconductores de «baja temperatura» son aleaciones metálicas, que son más dúctiles y pueden formar enrollados. El dispositivo más trascendente en el uso de la superconductividad hasta el momento es el *Gran Colisionador de Hadrones* (en inglés *LHC*), que logró en 2013 el éxito al producir y detectar el *Boson de Higgs* (CERN, 2014). En el experimento *ALICE* del *LHC* participan científicos mexicanos pertenecientes a instituciones nacionales como el Centro de Estudios Avanzados (CINVESTAV), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y la Universidad Autónoma de Sinaloa, además de mexicanos trabajando en el extranjero (Figuras 15 y 16).

**Figura 15.** De izquierda a derecha: cerámica superconductora *YBCO* levitando sobre un campo magnético, estructura cristalina del *YBCO* y tren *Transrapid* de Shanghai, que funciona usando la levitación.



**Figura 16.** De izquierda a derecha: túnel del *LHC*, que muestra los haces de protones en direcciones contrarias, confinados, acelerados y dirigidos por 9300 electroimanes superconductores. Al centro se muestra el logo del *LHC*, que muestra las líneas de campo magnético. A la derecha: experimento *ALICE* en el *LHC*, donde se utilizan *cuadрупolos magnéticos superconductores*.



## De monocristales a nanocristales

Las propiedades estructurales de los cristales se estudian a máxima profundidad a través de la difracción de rayos X en monocristales, aplicando el Método de Laue (Laue, 1915) y sus derivados.

Algunas de las propiedades prácticas, como la que permite hacer los circuitos semiconductores, también se manifiestan en monocristales, o en láminas delgadas monocristalinas. Pero la utilidad de los cristales igualmente se manifiesta en cristales muy pequeños, las llamadas nanopartículas, o en otros sistemas en los que alguna de las dimensiones es nanométrica. En un nanómetro ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) «caben» unos pocos átomos. Las propiedades de los cristales de esas dimensiones son muy especiales.

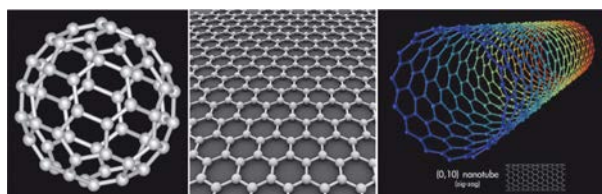
En la primera parte hablamos de las dos variedades más conocidas del carbono, que son el diamante y el grafito. Pues el carbono de los tiempos modernos tiene al menos tres variantes más que se clasifican como nanométricas: los *fullerenos*, los *nanotubos de carbono* y el *grafeno* (Figura 17).

Harry Kroto, James Heath, Sean O'Brien, Robert Curl y Richard Smalley, descubrieron el *fullereno*  $C_{60}$  y otros fullerenos en 1985. El experimento consistió en hacer incidir un rayo láser sobre un trozo de grafito. Los enlaces del carbono en el *fullereno* son muy estables, y el más famoso, el  $C_{60}$ , tiene una configuración de 20 hexágonos y 12 pentágonos (Vega Project, 2014). El nombre se propuso en honor de Fuller, el inventor de los domos geodésicos con esa misma configuración. El fullereno es la única estructura de carbono puro que se puede disolver en ciertos solventes, como el tolueno. Harry Kroto, Robert Curl y Richard Smalley recibieron el Premio Nobel de Química de 1996 por el descubrimiento del fullereno.

El *grafeno* es, esencialmente, *una sola capa* de la estructura del grafito. Tiene propiedades muy interesantes, pues el enlace entre los átomos de carbono es covalente y muy fuerte, que es parte de lo que le confiere esas propiedades. El *grafeno* es un material que tiene dimensiones subnanométricas en el espesor, y tiene extensión significativa en las otras dos dimensiones espaciales. El grafeno es transparente, flexible, elástico, tiene dureza mayor al acero, es ligero y reacciona químicamente. Todas estas propiedades ofrecen una perspectiva práctica muy grande. Los *nanotubos de carbono* (NC) son capas de grafeno envueltas formando tubos. Los NC pueden ser de una o varias capas. Los NC también son reactivos. Tienen la característica de ser de

dimensiones nanométricas en el diámetro, y sin embargo pueden alcanzar una longitud de 0.1 mm, de modo que son estructuras unidimensionales perfectas.

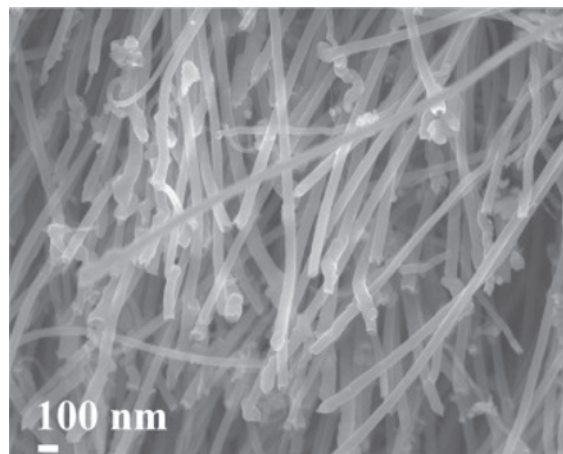
**Figura 17.** De izquierda a derecha: esquemas de las estructuras de *fullereno*  $C_{60}$ , *grafeno* y *nanotubo de carbono* (CNT).



La aparición de los fullerenos, los nanotubos y el grafeno abrió la época de la *nanotecnología*. Las nanopartículas pueden fabricarse de muchos materiales y, una vez fabricadas, se pueden hacer interactuar con el medio de manera interesante y útil. Para explicar estas características de una forma menos abstracta podemos mencionar algunas aplicaciones.

Los nanotubos de carbono se integran a aleaciones de aluminio con el objetivo de mejorar su rigidez y resistencia (Pérez-Bustamante, 2013). Para el aluminio reforzado con nanotubos se prevén aplicaciones diversas, por ejemplo, en la producción de rines para llantas, y en redes eléctricas (Figura 18).

**Figura 18.** Imagen al microscopio electrónico de nanotubos de carbono.



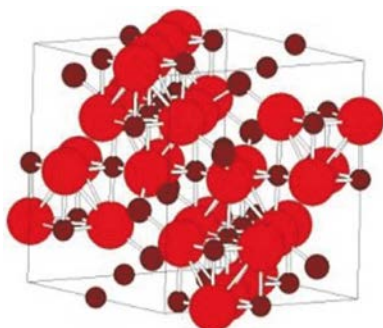


Mencionamos dos aplicaciones de nanocristales previstas para el futuro cercano en medicina.

Nano partículas de óxido de cerio dopado con 10% de Europio (Avran, 2014) son consideradas como una opción terapéutica para el tratamiento de trastornos neurodegenerativos y de la retina. La estructura de este óxido mixto varía entre cúbica y tetragonal, según el nivel del dopaje con europio.

Otro caso sorprendente es el uso de nanopartículas con propiedades magnéticas que posibilitan tratamientos novedosos y efectivos, en desarrollo, a pacientes con cáncer. Se colocan nanopartículas de magnetita (Figura 19) en el tejido afectado y mediante un campo magnético se pone a oscilar a estas nano-partículas. La vibración genera un calentamiento local que puede llegar a destruir el tejido canceroso. En CIMAV se participa en un proyecto conjunto para caracterizar las propiedades de las nanopartículas de magnetita (López-Maldonado, 2013), en colaboración con la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y el Instituto de Magnetismo Aplicado de la Universidad Complutense de Madrid, España.

**Figura 19.** Izquierda: estructura del óxido de cerio-10 % de europio. Derecha: estructura «*espinela*» de la magnetita.



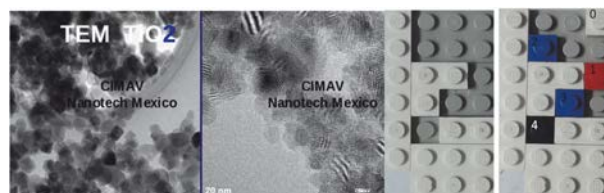
## Los cristales de Naica.

El crecimiento de *monocristales*, a partir de sus átomos o moléculas componentes en estado líquido, en solución o desde el gas comienza por la *nucleación*, que es la formación de un *nanocristal* de la sustancia. El proceso pasa inicialmente por un estado semejante al de la formación de las gotas de agua en una nube. Si se cumplen las condiciones de *cambio de fase* (solidificación o precipitación del

sólido), se unen *casualmente* las moléculas en sus choques. Hay un *tamaño crítico* de moléculas unidas a partir del cual el núcleo es relativamente estable. Después ocurre el proceso de crecimiento, de una manera parecida a jugar con un *Lego*.

Las condiciones propicias de precipitación dependen de la temperatura de la solución. Cuando una solución se enfría, en general tiende a precipitar la sustancia disuelta. En soluciones muy concentradas tienden a formarse muchos núcleos, tanto en las paredes como en el propio volumen del líquido. Se dice que hay mucha *nucleación*. En ciertas condiciones existe una especie de equilibrio, en que se forman núcleos al mismo ritmo en que éstos se redisuelven.

**Figura 20.** Izquierda: nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , semejantes a núcleos de cristalización. Derecha: superficie-Lego de un «cristal» con los defectos que representan los sitios donde se pueden adherir nuevas moléculas para el crecimiento. Los sitios vacíos de la izquierda tienen el número de paredes libres que aparecen en los sitios ocupados en colores a la derecha. Cuando un sitio tiene más paredes, mayor es la probabilidad de que una molécula adherida permanezca en el sitio.

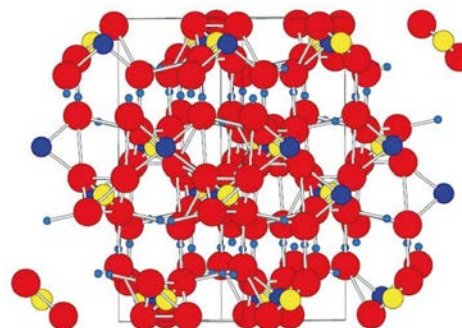


Para que crezcan monocristales grandes son necesarias las condiciones de temperatura y presión muy cercanas al equilibrio. Así no se forman más núcleos, sino que crece el núcleo que ya existe. Estas son las condiciones en que deben haber crecido las gemas y los grandes monocristales en la naturaleza, como algunos que se han mostrado en este texto.

## Los cristales son de México porque Naica está en Chihuahua

Los cristales más espectaculares, los mayores del mundo, están en la mina de Naica, en el estado de Chihuahua (Figura 21). Agua con sulfato de calcio en saturación cercana al equilibrio, temperatura alrededor de 56 °C, acuífero estable, pocos movimientos de la corteza terrestre, todo eso durante aproximadamente un millón de años, fueron las condiciones necesarias para la formación de estos

**Figura 21.** Arriba: fotografía panorámica de la Cueva de los cristales gigantes de Naica, donde se pueden apreciar sus dimensiones al compararla con la persona presente en el escenario. Abajo: estructura cristalina del yeso o selenita,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , donde se pueden apreciar los planos donde abundan los pequeños átomos de hidrógeno.



cristales (García-Ruíz, 2007). Los cristales gigantes de Naica llegan a 11 ~ 12 metros de longitud, un metro de diámetro y un peso de varias toneladas. Estos parámetros hacen maravillosa y excepcional la Cueva de los Cristales Gigantes.

La Cueva de los Cristales Gigantes se encuentra a 290 metros debajo de la superficie, está localizada cerca de una fractura y sus paredes están cubiertas por una costra de calcita y celestita con cantidades menores de óxidos de hierro, montmorillonita, clorita e illita. Los cristales gigantes de selenita, largos, parecidos a vigas, crecen a partir de estos grupos de cristales en forma de bloques directamente del suelo. Algunas vigas atraviesan la cueva de pared a pared, llamando la atención del espectador más apático.

Los cristales gigantes de Naica en Chihuahua tardaron más de un millón de años para formarse y tienen más de un millón de referencias en Internet. Por esto, por la minería y la industria chihuahuenses, se vale decir que Chihuahua es *Tierra de Cristales*.

## Referencias

AVRAM, D., C. Rotaru, B. Cojocar, M. Sanchez-Dominiguez, M. Florea and C. Tiseanu. 2014. Heavily impregnated ceria nanoparticles with europium oxide: Spectroscopic evidences for homogenous solid solutions and intrinsic structure of  $\text{Eu}^{3+}$ -oxygen environments. *J Mater Sci*, 49: 2117-2126.

BRATTAIN, W.H., J. Bardeen, W. Shockley, G. Ashton, M. Issott, R. Bullough, R. Newman, J. Wakefield, B. Claussen and P. Holmes. 1960. Historical development of concepts basic to the understanding of semiconductors. *The Institution of Electrical Engineers, Paper 3072E*: 266-267.

BRAGG, W. 1913. The structure of some crystals as indicated by their diffraction of x-rays. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 89: 248-277.

CERN The large hadron collider (lhc). <http://home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider>.

GARCÍA-RUÍZ, J.M., R. Villasuso, C. Ayora Ibañez, A. Canals y F. Ojalora. 2007. Formación de megacristales naturales de yeso en Naica, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59: 63-70.

HODGKIN, D.C. 1964. The x-ray analysis of complicated molecules. *Nobel lectures*, 1964.

KEPLER, J. Tratado «El copo de nieve de seis esquinas». 1611. [http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/archivos\\_01/strena-seu-de-nive-sexangula.pdf](http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/archivos_01/strena-seu-de-nive-sexangula.pdf)

LAUE, M.V. 1915. Concerning the detection of x-ray interferences. *Nobel lectures* 1915.


LOPEZ-MALDONADO, K., P. de la Presa, E. Flores-Tavizon, J. Farias-Mancilla, J. Matutes-Aquino, A. Hernando-Grande and J. Elizalde-Galindo. 2013. Magnetic susceptibility studies of the spin-glass and verwey transitions in magnetite nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, 113: 17E132.

MENÉNDEZ-PROUPIN, E., S. Cervantes-Rodríguez, R. Osorio-Pulgar, M. Franco-Cisterna, H. Camacho-Montes and M.E. Fuentes. 2011. Computer simulation of elastic constants of hydroxyapatite and fluorapatite. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 4: 1011-1020.

PÉREZ-BUSTAMANTE, R., F. Pérez-Bustamante, I. Estrada-Guel, L. Licea-Jiménez, M. Miki-Yoshida and R. Martínez-Sánchez. 2013. Effect of milling time and cnt concentration on hardness of CNT/Al2024 composites produced by mechanical alloying. *Materials Characterization*, 75: 13-19.

RAAB, H. 2005. Wikipedia.

REYES, A., C. de la Vega, M.E. Fuentes, L. Fuentes. 2007. BiFeO<sub>3</sub>: Synchrotron radiation structure refinement and magnetoelectric geometry. *Journal of the European Ceramic Society*, 27: 3709-3711.

VEGA SCIENCE TRUST - SIR HARRY KROTO. <http://vega.org.uk/about/internal/1>. 

Este artículo es citado así:

Montero-Cabrera, M.E., L. E. Fuentes-Cobas, M. E. Fuentes-Montero. 2014: Chihuahua, Tierra de Cristales. 2014, Año Internacional de la Cristalografía. *TECNOCENCIA Chihuahua* 8(3): 142-151.

## Resumen curricular del autor y coautores

**MARÍA ELENA MONTERO CABRERA.** Terminó la Licenciatura en Física en la Universidad de la Habana en 1972. Se hizo Doctor en Ciencias Físico-Matemáticas en Física Nuclear y de las Partículas Elementales, en el Instituto Unificado de Investigaciones Nucleares, Dubna, Rusia, en junio 1987. Trabajó de 1973 hasta 1986 en la Facultad de Física de la Universidad de La Habana, y desde 1986 hasta 2000 en el Instituto Superior de Ciencias y Tecnología Nucleares, en La Habana, Cuba. Es ciudadana mexicana por naturalización desde 2002. Es Investigadora Titular "C" del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) S.C., Departamento de Medio Ambiente y Energía, donde trabaja desde 1998. Fue presidenta de la Sociedad Cubana de Física desde 1994 hasta 1999. Es miembro de las Conferencias Pugwash sobre Ciencias y Asuntos Mundiales, a las que confirieron el Premio Nobel de la Paz de 1995. Directora de 10 tesis concluidas de doctorado, 14 de licenciatura y 21 de maestría. Premio Chihuahua 2012, del Instituto Chihuahuense de la Cultura, Área Tecnología, por el trabajo titulado "Sistema de toma de decisiones para el análisis en casos de cáncer en la ciudad de Chihuahua". Premio compartido por varios profesores e investigadores del CIMAV y la Universidad Autónoma de Chihuahua. Autora de más de 100 artículos en revistas y congresos nacionales e internacionales. Es miembro del SNI, nivel II. Realiza investigaciones sobre radiactividad ambiental y aplicaciones de la radiación sincrotrónica en el estudio de materiales avanzados y minerales. Es directora del Proyecto "Influencia del Ambiente sobre los Cristales Gigantes de Naica".

**MARÍA ELENA FUENTES-MONTERO.** Terminó su licenciatura en 1995, año en que le fue otorgado el título de Licenciada en Física por la Facultad de Física de la Universidad de la Habana, Cuba. Realizó su maestría en la misma institución en el tema de Neurociencias, obteniendo el grado de Maestro en Ciencias en 1997. Realizó su doctorado en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), obteniendo el grado de Doctor en Ciencia de Materiales en el año 2002. Desde 2003 trabaja en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) y posee la categoría de Académico titular C. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde ese mismo año y actualmente posee el reconocimiento de Nivel II. Ha dirigido 3 tesis de Licenciatura, 3 de Maestría y 1 de doctorado. Es coautora de alrededor de 40 artículos científicos, más de 50 trabajos en congresos, y 5 libros o capítulos de libros. Es evaluadora de proyectos de investigación del CONACYT (Fondos institucionales, mixtos y sectoriales).

**LUIS E. FUENTES COBAS.** Doctor en Física por la Universidad de la Habana, 1982. En Cuba (1970-1996) fue Investigador y Profesor Titular, Jefe del Depto. de Física General de la Universidad de la Habana, Secretario de la Comisión Nacional para Grados Científicos y Vicepresidente de la Comisión Nacional para la Enseñanza de la Física. Fue Jefe de la Sección Física del Estado Sólido de la Sociedad Cubana de Física. En México (1997-presente), es Investigador Titular "D" del Centro de Investigación en Materiales Avanzados - CIMAV. Lidera investigaciones experimentales y teóricas sobre la relación estructura - propiedades en materiales funcionales ecológicos. Dirige proyectos CONACYT vinculados con experimentos en los sincrotrones de Stanford (USA) y Elettra (Italia). Es autor de 150 publicaciones científicas y director de 40 tesis de posgrado. Sus trabajos incluyen artículos de portada en revistas especializadas de alto impacto, el texto actual de Electromagnetismo para Físicos en la Universidad de la Habana, libros y capítulos en Reverté, Springer y Elsevier. Es coordinador de la página <http://mpod.cimav.edu.mx> asociada a la base de datos internacional Material Properties Open Database y del Proyecto de Educación Científica "Materials World Modules-México" <http://mwm.cimav.edu.mx>. Ha recibido premios científicos en Rusia (Premio por Investigaciones Aplicadas del Instituto Unificado de Investigaciones Nucleares "Dubna" 1983) y en Cuba (Destacado Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba 1997). Es Premio Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación Chihuahua 2012.