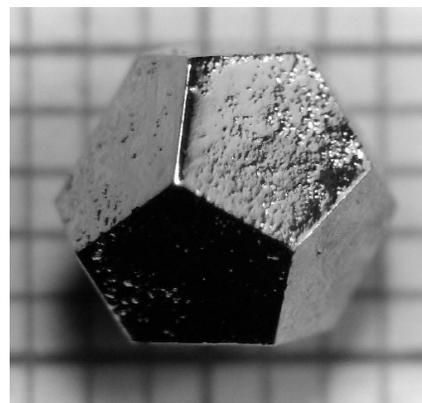


El premio NOBEL de QUÍMICA de 2011

Los cuasicristales: un premio Nobel a la perseverancia



Cuasicristal de Ho-Mg-Zn preparado por investigadores de la Universidad de Iowa (EEUU) y de Suiza, que muestra caras pentagonales, no comunes en los cristales periódicos tradicionales. (Fuente: *Phys.Rev B*, 1999, 59. 308. © (1999) The American Physical Society. Usada con permiso).

El premio Nobel en Química fue otorgado al Dr. Dan Shechtman por el descubrimiento de los cuasicristales. Los cuasicristales son un tipo de cristales que violan algunos principios formulados por la ciencia moderna de la cristalografía, especialmente debido a su aperiodicidad. Dan Shechtman demostró que esta forma de materia es cristalina pero es diferente de los cristales comunes. El descubrimiento de los cuasicristales fue inesperado y recibió duras críticas. Sin embargo, resultados experimentales confirmaron definitivamente la hipótesis de Shechtman. Los cuasicristales han sido estudiados extensamente y sus propiedades únicas han sido aplicadas satisfactoriamente en diferentes escenarios.

Alonso José Argüelles Delgado *

En estos tiempos es muy difícil que un único experimento haga temblar las bases de una disciplina científica sólida y madura. Esto no solo se debe a la improbabilidad de realizar dicho descubrimiento, sino también a la tenacidad extrema que requiere el investigador para no abandonar una idea a la que toda la comunidad científica se opone. Sin embargo, eso es lo que ha ocurrido con el doctor israelí Dan Shechtman, descubridor de los cuasicristales, cuyos esfuerzos de investigación fueron reconocidos en este año con un merecido premio Nobel de Química.

La cristalografía es una rama de la ciencia que estudia el arreglo espacial de los átomos en un sólido. En los inicios de esta disciplina, los cristales se estudiaban en base a su geometría. La aplicación de los rayos X al estudio de cristales, por técnicas como la difracción de rayos X, se debe a los logros de Max von Laue de 1912, los cuales se considera que marcan el inicio de la cristalografía moderna. Estos experimentos, que le valieron a Laue el premio Nobel de Física de 1914, demostraron que los átomos en un material sólido se encuentran ordenados y que los rayos X tienen una naturaleza ondulatoria,

por lo cual se difractan al interactuar con materia. El estudio de cientos de miles de cristales por difracción de rayos X permitió definirlos como sólidos compuestos de átomos distribuidos en un arreglo periódico en tres dimensiones.¹ En esa época, se consideraba que todos los cristales tenían átomos situados de forma ordenada, periódica y con simetría rotacional permitida (con ejes de rotación de orden 2, 3, 4 o 6). Este modelo, además de ser lógico, también es intuitivo: ¿quién iba a imaginar un cristal aperiódico!

El trabajo del Dr. Dan Shechtman demostró que los conceptos sobre los cristales no eran consistentes con todos los casos y debían ser revisados. El descubrimiento principal se remonta a la mañana del 8 de abril de 1982.^{2,3} Shechtman era doctor investigador del instituto israelí de tecnología, Technion, en el área de ingeniería de los materiales, pero se encontraba disfrutando de dos años sabáticos en la universidad de Johns Hopkins (ahora National Institute of Standards and Technology,

* Alonso Argüelles es estudiante de la especialidad de Química en la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la PUCP. (e-mail: arguelles.alonso@pucp.pe)

- 1 Cullity, B.D. y Stock, S.R. *Elements of X-Ray Diffraction*. 3ª ed. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 2001.
- 2 Instituto israelí de tecnología Technion. *Prof. Dan Shechtman 2011 Nobel Prize Chemistry Interview with ATS*. (📄 Acceso 15, -03-2012).
- 3 Universidad de Uppsala (Suecia). *The Discovery of Quasicrystals - Dan Shechtman*. (📄 Acceso 15, -03-2012).

NIST) de Estados Unidos. Aquel día se encontraba estudiando aleaciones de óxidos de aluminio y manganeso con un microscopio electrónico de transmisión. Entonces, descubrió que uno de esos cristales tenía simetría de rotación de décimo orden. Para entender el concepto de la simetría de rotación, podemos ver el ejemplo de un cuadrado. Esta figura tiene simetría de rotación de cuarto orden, lo cual significa que puede ser rotado cuatro veces, y luego de cada una de las rotaciones se obtendrá una imagen igual a la inicial (véase la Figura 1). El hecho de encontrar un cristal con simetría de rotación de décimo orden confrontaba los conceptos fundamentales de la cristalografía, pues esa simetría está prohibida para un cristal.

Veamos este aspecto con más detalle. Imaginemos que queremos llenar un espacio bidimensional, como una hoja, con cuadrados. Lograr esto es muy fácil y el resultado es un arreglo periódico y ordenado de cuadrados, tal como se ve en la figura 2b. Lo mismo se puede lograr con triángulos y hexágonos, los cuales implican rotación de simetría de tercer y sexto orden, respectivamente (véase figuras 2 a y c).

En cambio, si se trata de hacer lo mismo con un pentágono se notará rápidamente que es imposible (Figura 3). En otras palabras, no se puede rellenar todo el espacio de manera periódica con objetos con simetría de rotación de quinto orden. Para que un poliedro regular pueda lograr esto su ángulo interior debe ser un factor de 360° . Los pentágonos regulares, al tener un ángulo interno de 108° , no cumplen con esta condición.

Esta restricción se puede ampliar al espacio tridimensional. De esta manera, como los cristales eran por definición periódicos, estos no podían tener simetría de rotación diferente a 2, 3, 4 y 6. Sin embargo, no se había considerado que se pudiera llenar el espacio tridimensional con arreglos aperiódicos de manera similar a la ocupación del espacio bidimensional con arreglos como el de la figura 4a, conocido desde hace muchos años e incluso utilizado en decoración cerámica de suelos (figura 4b).

El descubrimiento fue tan controversial que Shechtman tuvo muchos opositores. Así, fue apartado de su grupo de investigación y fue menospreciado por el ilustre Linus Pauling (Premio Nobel de Química en 1954), quién afirmó que “no existe tal cosa como cuasicristales, solo cuasi-científicos”.⁴ De hecho, su primer artículo al respecto tardó dos años en ser publicado. Sin embargo, con gran tenacidad y profesionalismo continuó con sus investigaciones. Sus resultados fueron tan

Figura 1. Ejemplo de ejes de rotación de orden 2 y 4. Un eje de rotación de orden n implica que si cualquier figura se gira alrededor de ese eje un ángulo de $(360^\circ/n)$, la figura quedará inalterada y será indistinguible de la posición inicial. Los ejes dibujados implican rotaciones de 90° (orden 4) y 180° (orden 2).

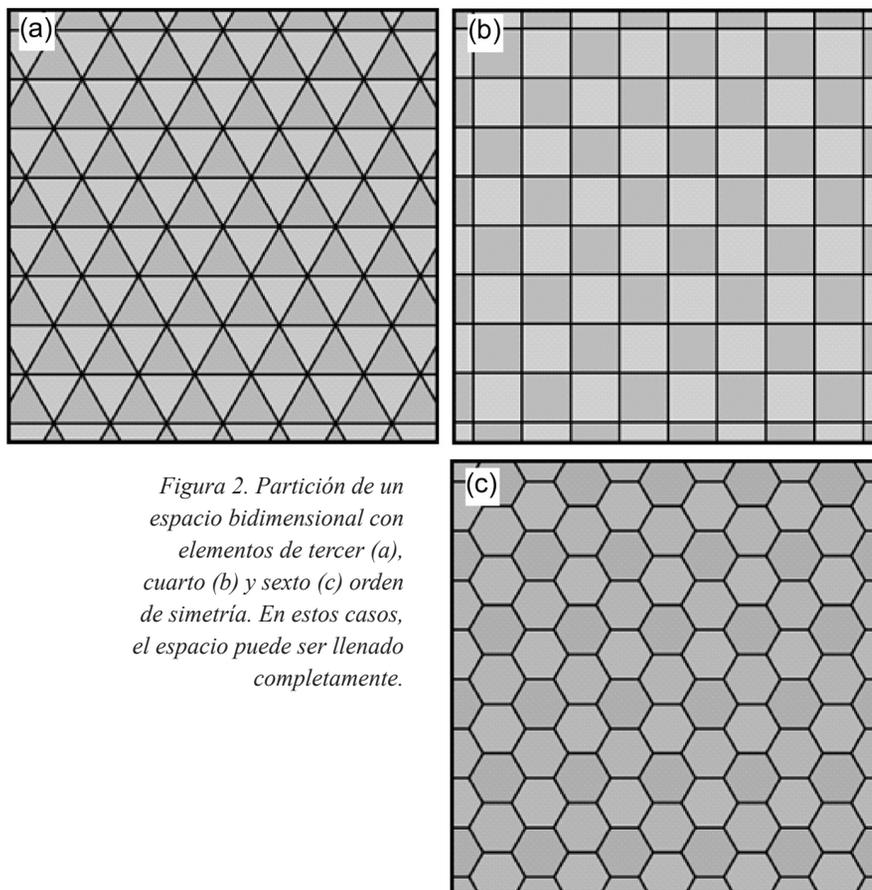
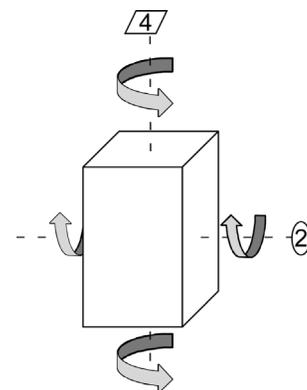
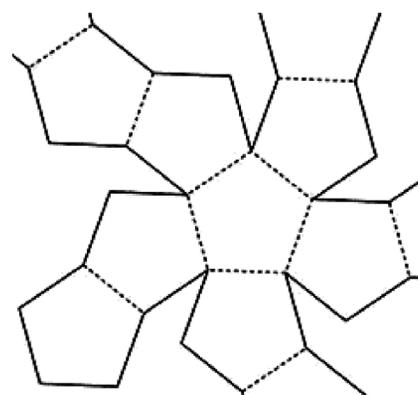


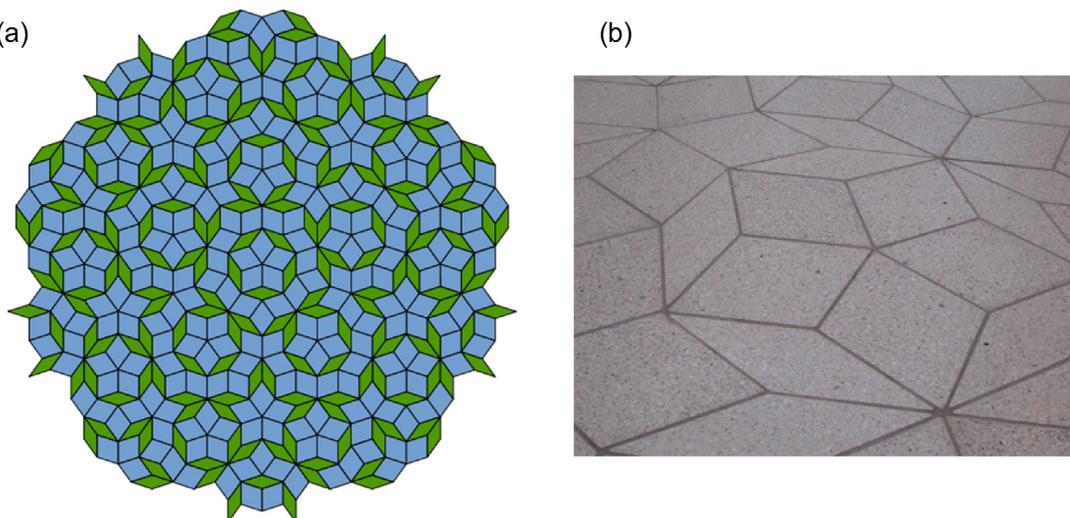
Figura 2. Partición de un espacio bidimensional con elementos de tercer (a), cuarto (b) y sexto (c) orden de simetría. En estos casos, el espacio puede ser llenado completamente.

Figura 3. Los pentágonos regulares no pueden cubrir completamente un plano.



4. Lannin, P.; Ek, V. *Ridiculed crystal work wins Nobel for Israeli*. Agencia Reuters, 2011. (Acceso 17-07-2012).

Figura 4. (a) Teseleación de Penrose. Esta disposición aperiódica de dos elementos con forma de rombo permite llenar completamente el espacio bidimensional. La baldosa del suelo del departamento de Química de la universidad de Western Australia presenta esta teseleación (b).



contundentes que obtuvieron el apoyo de la comunidad científica, forzaron la modificación de la definición de los cristales para que incluya a los cristales aperiódicos (cuasicristales) y lo hicieron merecedor del Nobel.

Desde el descubrimiento de Dan Shechtman, cientos de cuasicristales han sido reportados. Incluso se ha descubierto uno natural, de composición $\text{Al}_{63}\text{Cu}_{24}\text{Fe}_{13}$.⁵ El cuasicristal natural se denomina icosaedrita, por ser un cuasicristal icosaédrico centrado en las caras. Este raro mineral se encuentra en muestras de roca del río Khatyrka en Rusia, es gris oscuro, opaco con brillo metálico, frágil y presenta simetría tridimensional icosaédrica, la cual está prohibida para cristales periódicos. En la figura 5 se puede observar el patrón de difracción de este

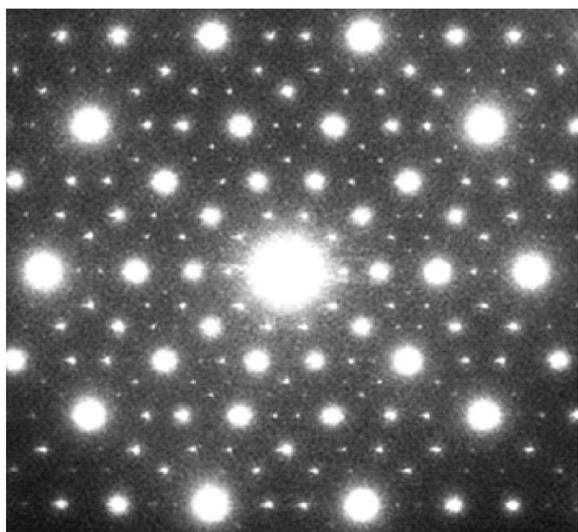


Figura 5. Patrón de difracción de electrones de la icosaedrita que muestra una simetría rotacional de quinto orden. (reproducido con permiso de Bindi, I. y col, *Am. Miner.* 2011, 96, 928–931).

5 Bindi, I. y col. *Am. Miner.* 2011, 96, 928–931. (☒)

mineral obtenido en un microscopio de transmisión electrónica (TEM) que muestra la simetría de orden cinco.

Los cuasicristales tienen propiedades muy interesantes, razón por lo cual se están explorando diferentes aplicaciones de los mismos. Los cuasicristales intermetálicos son materiales duros y frágiles con propiedades de transporte térmico y electrónico inusuales y energías de superficie muy bajas. La ausencia del transporte colectivo (aquel reforzado por fonones y ondas Bloch), debido a la aperiodicidad de los cuasicristales, les otorga propiedades más cercanas a los vidrios que a los cristales normales.⁶ Así, la conductividad térmica de cuasicristales que contienen más de 70% atómico de aluminio es dos órdenes de magnitud menor que el del óxido de aluminio. Además, la baja energía de superficie explica su bajo coeficiente de fricción y su resistencia a la adhesión y corrosión.

Las propiedades de los cuasicristales son variadas e incluyen las siguientes: bajo coeficiente de fricción, alta dureza, alta fragilidad, alta resistencia a la corrosión, superplasticidad a altas temperaturas, baja conductividad térmica, propiedades magnéticas únicas, etc. La fragilidad es un inconveniente, pero este se puede solucionar si se utilizan capas de cuasicristales como recubrimientos que pueden ser preparados por medio de técnicas estándares como atomización y plasmarrociado.⁷ Por ejemplo, se utilizan recubrimientos cuasicristalinos (de 10 μm a 1 mm de espesor) de aleaciones basadas en una combinación de Al, Fe y Cu para proteger sartenes y ollas.⁸ En este caso se aprovechan las propiedades de no adherencia, dureza, resistencia a la corrosión y baja conductividad térmica. Otro ejemplo es la aplicación de cuasicristales en aleaciones con fines quirúrgicos (Figura 6). En particular, la aleación Nanoflex™ de Sand-

6. Lidin, S.: “*Scientific Background on the Nobel Prize in Chemistry 2011: The discovery of quasicrystals*”. The Royal Swedish Academy of Sciences. 2011. (☒)

7. Lutz, D. *The industrial physicist*. 1996, 2 (4), 26-31.

8. Jazbec, S. *The Properties and Applications of Quasicrystals*. University of Ljubljana. 2009. (☒ acceso mayo 2012)



Figura 6. Agujas quirúrgicas de Sandvik Steel, hechas con la aleación Nanoflex™ de la compañía Sandvik Steel. (© Sandvick)

explorando aplicaciones en recubrimientos aislantes de piezas de automóviles y aviones, materiales quirúrgicos, biomateriales, turbinas, motores de misiles, material adsorbente, equipos electrónicos y equipos de almacenamiento de hidrógeno, entre otras.

En conclusión, el esfuerzo de Dan Shechtman ha revolucionado varias ramas de la ciencia como la cristalografía y la ciencia de los materiales, y ha permitido el desarrollo de materiales cuasicristalinos, de propiedades únicas. Su descubrimiento, así como su perseverante personalidad, han marcado la historia. Sus obras sociales, múltiples conferencias y entrega total a la educación y al desarrollo lo califican como un digno laureado.



Si le interesa seguir leyendo sobre cuasicristales, le recomendamos el artículo de C. Landauero, en la página 34 de este número.

vik Steel contiene cuasicristales que le otorgan gran dureza y resistencia.⁹ Por otro lado, Akihisa Inoue y colaboradores han desarrollado técnicas que aprovechan las características de cuasicristales para obtener aleaciones de aluminio muy duras, aproximadamente tres veces más fuertes que las aleaciones convencionales de aluminio de alta dureza.¹⁰ Además, se están

9. Sandvik Materials Technology. The Nobel Prize in Chemistry 2011 is linked to Sandvik's research. Press release, 2011. (📄 acceso julio 2012)
10. Kimura, H. y Inoue, A.: "Bulk amorphous, nanocrystalline and nanoquasicrystalline aluminium alloys" en Cantor, B.; Grant, P.; Assender, H. (eds.): "Aerospace Materials", Taylor & Francis. 2001. (📄)

Bibliografía esencial:

📄 The Nobel Prize in Chemistry 2011 en la página web oficial de la Fundación Nobel. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2011/

Steuer, W. y Deloudi, S., *Crystallography of Quasicrystals: concepts, methods and structures*, Springer Verlag: Heidelberg, 2009.

📄 Web recomendable con mucha información sobre cuasicristales. Contiene amplia bibliografía aunque está solo actualizada hasta 2005. http://mcs.open.ac.uk/ugg2/quasi_intro.shtml

Artículo clave del ganador del Nobel:

Shechtman, D.; Blech, I.; Gratias, D.; Cahn, J. W. "Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry". *Phys. Rev. Lett.* **1984**, 53 (20), 1951–1953.