

## El Premio Nobel de Química 2011

### Cristales de proporciones áureas

Cuando **Dan Shechtman** anotó el descubrimiento galardonado con el Premio Nobel de Química 2011 en su cuaderno de notas, colocó tres signos de interrogación a su lado. Los átomos del cristal que tenía delante mostraban una simetría prohibida. Era tan imposible como construir una pelota de fútbol - una esfera - usando sólo polígonos de seis lados. Desde entonces los mosaicos con misteriosos patrones y la proporción áurea, tan usada en el arte y en las matemáticas, han ayudado a los científicos a explicar la desconcertante observación de Shechtman.

“Eyn chaya kazo”, se dijo Dan Shechtman a sí mismo. “No hay ninguna criatura así”, en hebreo. Era la mañana del 8 de abril de 1982. El material que estaba estudiando, una mezcla de aluminio y manganeso, tenía un aspecto extraño y recurrió al microscopio electrónico con el fin de poder observarlo a nivel atómico. La imagen que se le mostró estaba fuera de toda lógica: vio círculos concéntricos, cada uno compuesto de diez puntos brillantes, con idéntica distancia entre ellos (figura 1)

Shechtman había enfriado rápidamente el brillante metal fundido y el brusco cambio de temperatura debería haber provocado un desordenamiento total de los átomos. Pero el patrón observado contaba una historia completamente diferente: los átomos se organizaron de una manera contraria a las leyes de la naturaleza. Shechtman cuenta y recuenta los puntos. Cuatro o seis puntos en los círculos habría sido posible, pero diez, de ninguna manera. Anotó en su cuaderno: 10 veces??

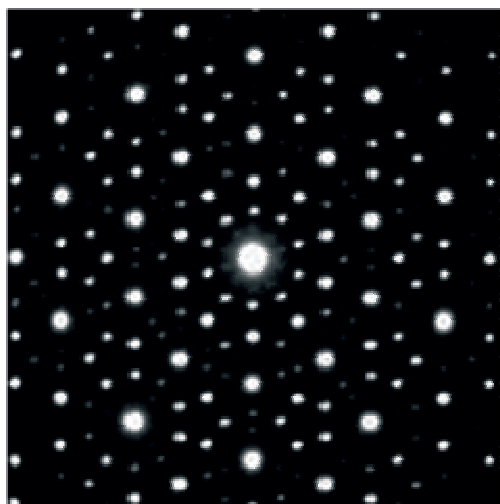


Figura 1. El patrón de difracción observado por Shechtman's era de orden diez: con un giro de  $36^\circ$  ( $360/10$ ) se obtenía una figura idéntica.

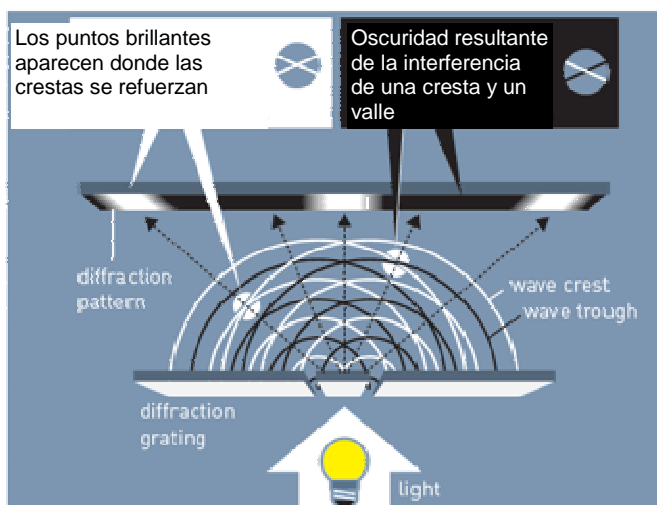


Figura 2. Luz pasando a través de una red de difracción. El resultado es la interferencia de las ondas para dar un patrón de interferencia.

### Crestas y valles

Con el fin de entender por qué Shechtman estaba tan sorprendido, recurramos a un clásico experimento de física. Se hace pasar luz a través de una red de difracción (figura 2). Al atravesar la red la luz es difractada de la misma forma que las olas del mar cuando encuentran en su camino una abertura en un dique.

Al otro lado de la red las ondas tienen forma circular e interfieren una con otras. Las crestas y los valles se refuerzan en unos puntos y se anulan en otros. Si se coloca una pantalla tras la red aparece un patrón de difracción formado por zonas oscuras y brillantes.

Un patrón de difracción (figura 1) era lo que Schechtman había obtenido aquella mañana de abril de 1982. Sin embargo, su experimento fue algo diferente: utilizaba electrones en lugar de luz, su red de difracción estaba constituida por los átomos del metal rápidamente enfriado y se llevó a cabo en tres dimensiones.

El patrón de difracción mostraba que los átomos dentro del metal estaban empaquetados formando un cristal ordenado. Esto, en sí, no era nada extraordinario. Casi todos los materiales sólidos, del hielo al oro, consisten en cristales ordenados. Sin embargo, el patrón de difracción con diez puntos brillantes dispuestos en un círculo era algo que nunca había visto antes, a pesar de su vasta experiencia con los microscopios electrónicos. Ningún cristal parecido estaba recogido en las Tablas Internacionales de Cristalografía (la principal guía de referencia cristalográfica). Por entonces estaba firmemente admitido que un patrón con diez puntos en un círculo era imposible, y la prueba de ello era tan simple como obvia.

### Un patrón contra toda lógica

Dentro de un cristal los átomos se ordenan según una secuencia que se repite con una simetría que depende de su composición química. En la figura 3a se observa que cada átomo está rodeado de tres átomos idénticos formando un patrón que se repite de simetría de orden tres. Si se gira la imagen  $120^\circ$  ( $360/3$ ) se obtiene una imagen indistinguible de la primera.

El mismo principio se aplica a las simetrías de orden cuatro (figura 3b) y de orden seis (figura 3c). La figura es indistinguible si se giran  $90^\circ$  ó  $60^\circ$  respectivamente.

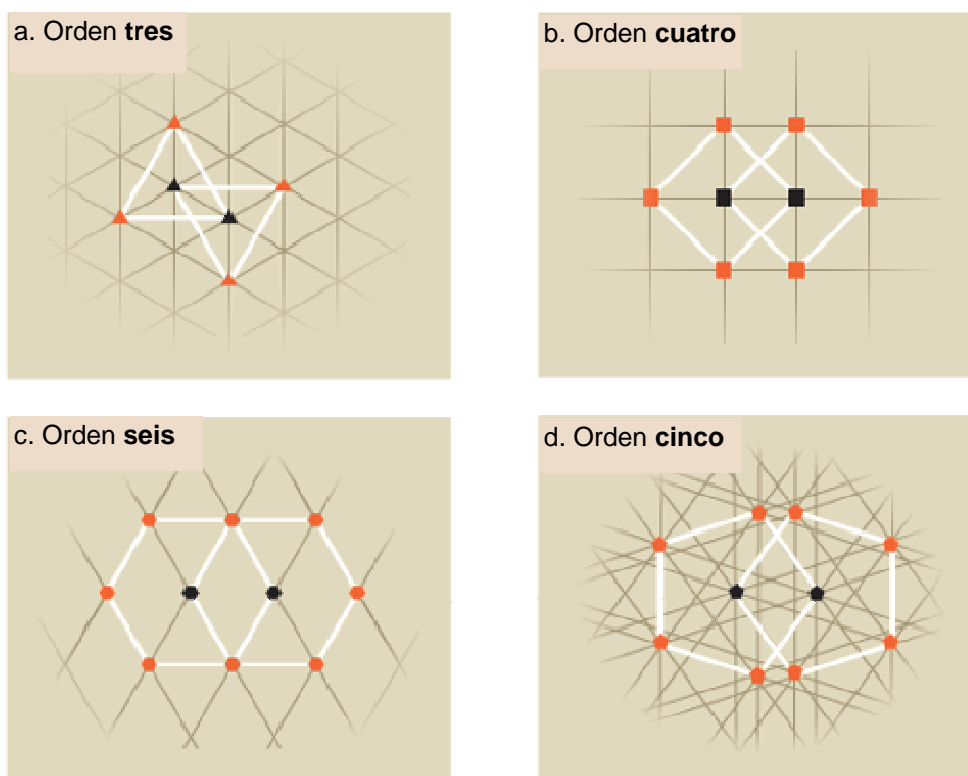


Figura 3. Diferentes tipos de simetría en cristales. El patrón mostrado en un cristal con orden cinco no es simétrico.

Sin embargo una simetría de orden cinco no es posible (figura 3d), ya que las distancias entre unos átomos son menores que entre otros. No hay patrón que se repita, lo cual proporcionaba la prueba para que los científicos consideraran que no era posible la existencia de simetrías de orden cinco. La misma consideración se aplica a las simetrías de orden siete.

Schechman, sin embargo, podía girar su patrón  $36^\circ$  ( $360/10$ ) y obtener una imagen idéntica (simétrica) a la primera. Estaba observando una simetría de orden diez, una simetría considerada imposible. No sorprende, por tanto, los tres signos de interrogación en su cuaderno de notas.

## En desacuerdo con el libro de texto

Dan Shechtman se asomó al pasillo en el que está situada su oficina en el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), deseando encontrar a alguien con quien poder compartir su descubrimiento. Pero el pasillo estaba vacío, así que volvió al microscopio para llevar a cabo algunos experimentos con el peculiar cristal. Entre otras cosas, una doble comprobación por si se hubiera obtenido un cristal gemelo: dos cristales embudidos cuya superposición podría dar lugar a patrones de difracción extraños. No pudo detectar ninguna signo de que estaba observando un cristal doble.

Además, giró el cristal en el microscopio electrónico para ver cuanto podía girar antes de que el patrón de difracción volviera a aparecer. Este experimento demostró que el propio cristal no tenía simetría de orden diez, como el patrón de difracción, sino una igualmente imposible simetría de orden cinco. Dan Shechtman concluyó que la comunidad científica debía estar equivocada en sus suposiciones.

Cuando Shechtman habló con los científicos acerca de su descubrimiento, se encontró con una total oposición. Algunos, incluso, lo ridiculizaron. La mayoría afirmaron que lo que había observado era, en realidad, un cristal doble. El jefe del laboratorio le dio un libro de texto de cristalografía y le sugirió que debería leerlo. Shechtman, por supuesto, conocía la teoría, pero confiaba en sus experimentos más que el libro de texto. La situación llevó finalmente a que su jefe le pidiera que se fuera del grupo de investigación. La situación, como el propio Shechtman recordó más tarde, se había vuelto demasiado embarazosa.

## La lucha contra el conocimiento establecido

Dan Shechtman había obtenido su doctorado en el Technion - Israel Institute of Technology y, en 1983, se las arregló para trabajar con Ilan Blech, un colega interesado en los peculiares resultados de su investigación. Juntos trataron de interpretar el patrón de difracción y traducirlo al modelo atómico de un cristal. Enviaron un artículo a la revista *Journal of Applied Physics*, en el verano de 1984, pero el artículo fue devuelto a vuelta de correo. El editor lo había rechazado inmediatamente.

Entonces Shechtman le preguntó a John Cahn, un físico de renombre del NIST, si podía echar un vistazo a sus datos. El investigador finalmente lo hizo y, a su vez, Cahn consultó con un cristalógrafo francés, Denis Gratias, con el fin de ver si Shechtman podría haber pasado algo por alto, pero de acuerdo con Gratias los experimentos de Shechtman eran fiables. Gratias habría procedido de la misma manera que Shechtman de haber llevado a cabo el experimento.

En noviembre de 1984, junto con Cahn, Blech y Gratias, Shechtman finalmente pudo publicar sus datos en *Physical Review Letters*. El artículo cayó como una bomba entre los cristalógrafos ya que cuestionaba el fundamento básico de su ciencia: que todos los cristales consisten en la repetición periódica de patrones.

## Quitando la venda de los ojos

El descubrimiento había llegado ahora a un público más amplio, y Dan Shechtman fue aún más criticado.

Al mismo tiempo cristalógrafos de todo el mundo tuvieron un momento de *déjà vu*. Muchos habían obtenido un patrón similar durante los análisis de difracción de otros materiales, pero habían interpretado los patrones como evidencia de cristales dobles. Empezaron a escarbar en los cajones de las viejas notas de laboratorio y muy pronto cristales con patrones imposibles comenzaron a aparecer con simetrías de orden ocho y doce.

Cuando Shechtman había publicado su descubrimiento no tenía idea una clara de lo que el cristal tendría en su interior. Es evidente que su simetría era de orden cinco, pero ¿cómo estaban empa-

quetados los átomos? La respuesta a esta pregunta vendría de un lugar inesperado: los juegos matemáticos con mosaicos.

### **La explicación estaba en los mosaicos**

A los matemáticos les gusta desafiarse a sí mismos con rompecabezas y problemas de lógica. Durante la década de 1960 comenzaron a preguntarse si era posible construir un mosaico con un número limitado de azulejos de forma que no existiera un patrón que se repitiera, formando lo que llamaron un mosaico no periódico. El primer intento con éxito fue registrado en 1966 por un matemático estadounidense, pero requirió más de 20 000 azulejos diferentes, lejos, por tanto, de lo que se pretendía. Como el número de personas que aceptaron el reto aumentó, el número de azulejos fue reduciéndose de forma constante.

Por último, en la década de 1970, un profesor británico de matemáticas, Roger Penrose, dió la solución más elegante a este problema. Él creó los mosaicos aperiódicos con sólo dos azulejos diferentes, por ejemplo, un rombo delgado y un rombo grueso (figura 4.1)

Los mosaicos de Penrose inspiraron a la comunidad científica de varias maneras diferentes. Entre otras cosas, sus resultados han sido utilizados para analizar los patrones medievales islámicos realizados con azulejos girih (Islamic Girih patterns) y hemos aprendido que los artistas árabes construían mosaicos aperiódicos con únicamente cinco azulejos ya en el siglo 13. Mosaicos de este tipo decoran el extraordinario palacio de la Alhambra en España, por ejemplo, y los portales y las bóvedas del santuario de Darb-i Imam en Irán.

El cristalógrafo Alan Mackay usó el mosaico de Penrose de forma distinta. Tenía curiosidad por comprobar si los átomos, que son los bloques con los que se forma la materia, podían formar patrones aperiódicos, como los mosaicos. Realizó un experimento en el que colocó círculos, que representaban átomos en las intersecciones de un mosaico de Penrose (figura 4.2). A continuación usó este modelo como una red de difracción para ver que tipo de patrón de difracción se obtenía. El resultado fue una simetría de orden diez: diez puntos brillantes formando un círculo.

La conexión entre el modelo de Mackay y el patrón de difracción de Shechtman fue establecida por los físicos Paul Steinhardt y Dov Levine. Antes de que el artículo de Shechtman apareciera en *Physical Review Letters*, el editor lo envió a otros científicos para su revisión. Durante este proceso, Steinhardt tuvo la oportunidad de leerlo. Él ya conocía el modelo de Mackay, y se dio cuenta de que la simetría teórica de orden diez de Mackay había adquirido vida real en el laboratorio de Shechtman, en el NIST.

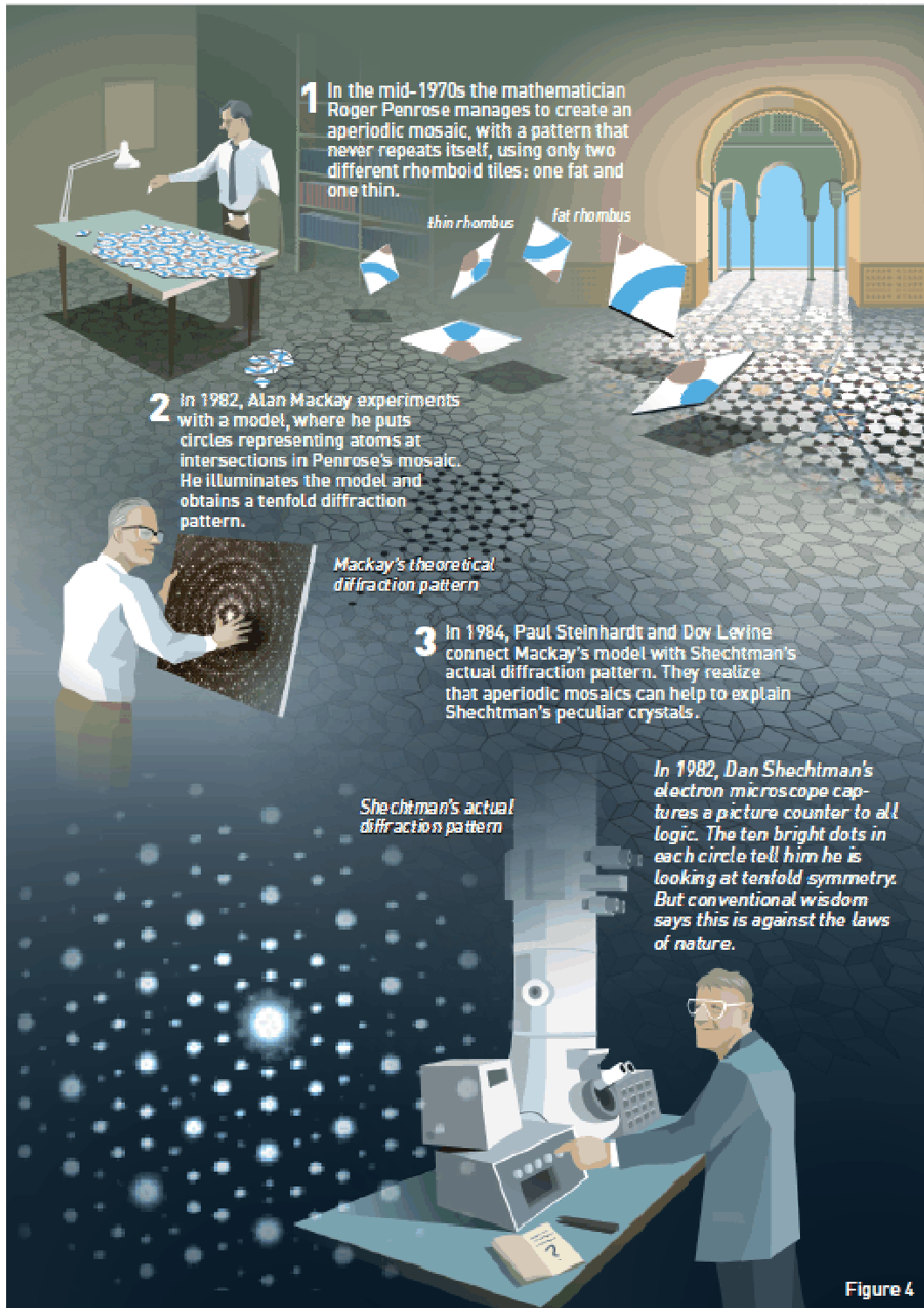
En la Nochebuena de 1984, sólo cinco semanas después de que el artículo Shechtman apareciera impreso, Steinhardt y Levine publicaron un artículo donde se describían por primera vez los cristales aperiódicos que a partir de este artículo serían conocidos con el nombre de cuasicristales.

### **La proporción áurea era la clave**

Un aspecto fascinante de los cuasicristales y de los mosaicos aperiódicos es que la llamada proporción áurea, conocida en matemáticas como la constante tau ( $\tau$ ), aparece una y otra vez. Por ejemplo, la relación entre el número de rombos delgados y gruesos en los mosaicos de Penrose es  $\tau$ . Asimismo la relación de las distancias entre los diferentes átomos en los cuasicristales, siempre está relacionada con  $\tau$ .

La constante  $\tau$  es descrita por una secuencia de números que en el s. XIII el matemático italiano Fibonacci propuso como solución a un problema planteado sobre la cría de conejos. En esta conocida secuencia cada número es la suma de los dos números precedentes: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144... etc. Si se divide uno de los números altos de la serie por el número que lo precede (por ejemplo, 144/89) se obtiene un número cercano a la proporción áurea.

La serie de Fibonacci y la proporción áurea son importantes cuando se trata de utilizar un patrón de difracción para describir los cuasicristales a nivel atómico. La serie de Fibonacci también puede explicar cómo el descubrimiento galardonado con el Premio Nobel de Química 2011 ha alterado la concepción de los químicos sobre la regularidad en los cristales.



## Regularidad sin repeticiones

Antes los químicos interpretaban la regularidad en los cristales como un patrón periódico y repetitivo. Sin embargo, la sucesión de Fibonacci también es regular, a pesar de que nunca se repite, ya que sigue una regla matemática. Las distancias interatómicas en un cuasicristal se correlacionan con la secuencia de Fibonacci, los átomos se colocan de una forma ordenada, y los químicos pueden predecir cómo es el interior de un cuasicristal. Sin embargo esta regularidad no es la misma que en un cristal periódico.

En 1992, esta situación llevó a la Unión Internacional de Cristalografía a modificar su definición de lo que es un cristal. Anteriormente un cristal se había definido como "*una sustancia en la que los átomos constituyentes, moléculas o iones se empaquetan en una forma ordenada, repitiendo una estructura tridimensional*". La nueva definición se convirtió en "*cualquier sólido que tiene un diagrama de difracción esencialmente discreto*". Esta definición es más amplia y permite incluir futuros descubrimientos de otros tipos de cristales.

## Cuasicristales en la naturaleza...

Desde su descubrimiento en 1982, cientos de cuasicristales han sido sintetizados en laboratorios de todo el mundo. Sin embargo no fue hasta el verano de 2009 cuando se descubrieron los primeros cuasicristales naturales. Fueron descubiertos en un nuevo tipo de mineral en el río Khatyrka, en Rusia oriental. El mineral en cuestión se compone de aluminio, cobre y hierro y muestra un patrón de difracción con simetría de orden diez. Se llama *icosahedrite*, derivado del icosaedro, un sólido geométrico cuyas caras son 20 triángulos equiláteros y en cuya geometría se puede encontrar varias veces el número áureo.

## ... y en acero de alta resistencia

Los cuasicristales también se han encontrado en una de las formas más duraderas de acero del mundo. Experimentando con mezclas de metales una empresa sueca logró crear un acero con unas características sorprendentemente buenas. Los análisis de su estructura atómica mostraron que consta de dos fases diferentes: cuasicristales de duro acero embebidos en una especie de acero suave. Los cuasicristales funcionan como una especie de armadura. Este acero se utiliza actualmente en productos tales como cuchillas de afeitar y agujas finas usadas específicamente para la cirugía ocular.

A pesar de ser muy duros los cuasicristales se fracturan con facilidad, como el cristal. Debido a su singular estructura atómica también son malos conductores del calor y la electricidad y tienen superficies anti-adherentes. Su poca capacidad para el transporte térmico puede hacerlos útiles como materiales termoeléctricos, que convierten el calor en electricidad. El objetivo principal del desarrollo de estos materiales es reutilizar el calor residual de automóviles y camiones, por ejemplo.

Hoy los científicos también experimentan con cuasicristales en los recubrimientos de superficies de las sartenes, los componentes de emisión de luz de bajo consumo (LED) y para el aislamiento térmico de los motores, entre otras cosas.

## Una lección importante para la ciencia

La historia de Dan Shechtman no es única. Una y otra vez en la historia de la ciencia, los investigadores se han visto obligados a luchar contra las "verdades" establecidas que, posteriormente, han demostrado no ser más que meras suposiciones. Uno de los críticos más feroces de Dan Shechtman y sus cuasicristales fue Linus Pauling, también Premio Nobel en dos ocasiones. Esto demuestra claramente que incluso nuestros más grandes científicos no son inmunes a quedar atrapados en las convenciones. Mantener una mente abierta y atreverse a cuestionar el conocimiento establecido debe ser, de hecho, el rasgo más importante del carácter de un científico.

## LINKS AND FURTHER READING

Additional information on this year's Prizes, including a scientific background article in English, may be found at the website of the Royal Swedish Academy of Sciences, <http://kva.se>, and at <http://nobelprize.org>. The latter also includes web-TV versions of the press conferences at which the awards were announced.

Information on exhibitions and activities related to the Nobel Prizes and the Prize in Economic Sciences may be found at [www.nobelmuseum.se](http://www.nobelmuseum.se).

### Websites

Shechtman, D., Technion – Israel Institute of Technology, <http://materials.technion.ac.il/shechtman.html>

Lifshitz, R., Introduction to quasicrystals, [www.tau.ac.il/~ronlif/quasicrystals.html](http://www.tau.ac.il/~ronlif/quasicrystals.html)

### Interviews and lectures (video and slide show)

Shechtman, D. (2010) Quasicrystals, a new form of matter, [www.youtube.com/watch?v=EZRTzOMHQ4s](http://www.youtube.com/watch?v=EZRTzOMHQ4s)

Senechal, M. (2011 ) Quasicrystals gifts to mathematics, [www.youtube.com/watch?v=pjao3H4z7-g&feature=relmfu](http://www.youtube.com/watch?v=pjao3H4z7-g&feature=relmfu)

Steurer, W. (2011 ) Fascinating quasicrystals, [www.youtube.com/watch?v=jM4AIipGOdk](http://www.youtube.com/watch?v=jM4AIipGOdk)

Steinhardt, P.J., What are quasicrystals?, [www.physics.princeton.edu/~steinh/QuasiIntro.ppt](http://www.physics.princeton.edu/~steinh/QuasiIntro.ppt)

### Popular science articles

Shtull-Trauring, A. (2011) Clear as crystal, *Haaretz*,

[www.haaretz.com/weekend/magazine/clear-as-crystal-1.353504](http://www.haaretz.com/weekend/magazine/clear-as-crystal-1.353504)

*Scientific American*, [www.scientificamerican.com](http://www.scientificamerican.com), search for quasicrystals.

### Books

Hargittai, B. and Hargittai, I. (2005) *Candid Science V: Conversations with Famous Scientists*, Imperial College Press, London.

### Original article

Shechtman, D., Blech, I., Gratias, D., and Cahn, J.W. (1984) Metallic phase with long-range orientational

order and no translational symmetry, *Phys. Rev. Lett.* 53(20):1951-1954.

The Laureate

*Dan Shechtman*

Israeli citizen. Born 1941 in Tel Aviv,

Israel. Ph.D. 1972 from Technion – Israel

Institute of Technology, Haifa, Israel.

Distinguished Professor, The Philip

Tobias Chair, Technion – Israel Institute of  
Technology, Haifa, Israel.

Science Editors: Sven Lidin, Lars Thelander, The Nobel Committee for Chemistry

Text by Ann Fernholm

Illustrations: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Editor: Ann Fernholm

©The Royal Swedish Academy of Sciences