



La formación de cristales de nieve

Sutiles procesos moleculares gobiernan el crecimiento de una amplia variedad de estructuras del hielo muy elaboradas

Kenneth G. Libbrecht

Lo mismo una bandeja de cubitos en el congelador que la superficie de un lago en crudo invierno, el hielo adquiere la forma de su recipiente. Pero cuando se trata de copos de nieve, la mera congelación del agua produce resultados completamente distintos: una impresionante diversidad de formas complejas que siguen ciertos patrones. No hay dos copos de nieve iguales. Basta contemplar un día de nevada para evocar las sensaciones que movieron a Henry David Thoreau a exclamar: “¡Cuán lleno del genio creativo está el aire donde se generan! No me admiraría más si cayesen estrellas del cielo para posarse sobre mi abrigo”.

El agua es una sustancia común, tanto que cabría suponer que ya lo sabemos todo del “genio creativo” de Thoreau, es decir, del modo en que los copos de nieve desarrollan sus estructuras complejas. La verdad es que nos hallamos lejos de explicar, siquiera en términos cualitativos, la formación de esas diminutas esculturas de hielo.

El crecimiento de los copos de nieve constituye un fenómeno altamente no lineal y fuera del equilibrio, en el que intervienen sutiles procesos de nanoescala que condicionan el desarrollo de patrones complejos en todas las escalas. La comprensión de este fenómeno requiere una síntesis de la dinámica molecular, la física de superficies, el crecimiento de inestabilidades, la formación de patrones y la mecánica estadística. Aunque caen en cantidades ingentes de las nubes invernales, los cristales de nieve esconden todavía numerosos misterios.

Una colección de cristales

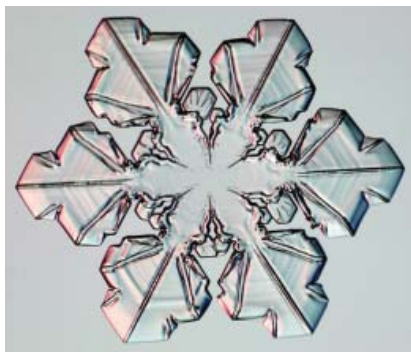
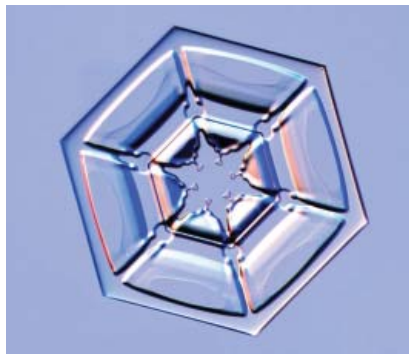
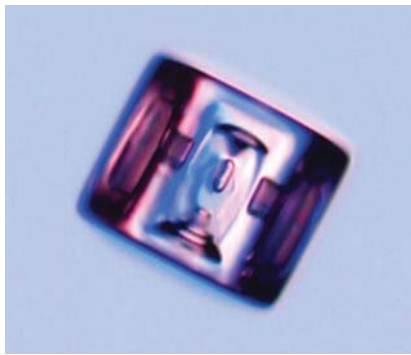
Los “cristales de nieve” corresponden a las estructuras que se forman cuando el vapor de agua de la atmósfera se condensa directamente en hielo, sin pasar por la fase líquida. La expresión “copo de nieve”, perteneciente al lenguaje meteorológico, designa tipos de precipitaciones invernales diversos, desde cristales de nieve sueltos has-

ta aglomerados de cristales que colisionan y se traban cayendo en forma de blandas bolitas.

La formación de cristales de nieve suele comenzar cuando el viento hace que una masa de aire caliente y húmedo choque con otra masa de aire distinta, con la generación consiguiente de un frente climático en la zona de contacto. La colisión provoca que la masa de aire caliente ascienda y se enfríe. Una vez que el aire esté lo suficientemente frío, una parte del vapor de agua que contiene se condensa en innumerables gotitas de agua. Cada gotita necesita un núcleo sobre el que condensarse; de ello se encargan las partículas de polvo del aire. Dada la eficacia de las esferas micrométrica para dispersar la luz, cuando se juntan en cuantía notable se crea una nube. Un banco de nubes de buen tamaño puede contener un millón de toneladas de agua en forma de gotitas en suspensión.

Si la nube recién constituida continúa enfriándose, el polvo desempeñará otra función en la formación de nieve. Cuando la temperatura desciende por debajo de cero grados Celsius, las gotículas acuosas no se congelan de inmediato, sino que permanecen líquidas en un estado subenfriado (se subenfrian hasta casi -40 grados antes de congelarse). El polvo proporciona una superficie sólida para comenzar la congelación, con lo que las gotitas de agua, repletas de polvo, comienzan a congelarse alrededor de -6 grados. Cada partícula de polvo es distinta; por tanto, cada gotita se congelará a una temperatura diferente. Se produce así una transición gradual entre el enfriamiento de la nube y la congelación de las gotículas.

Una vez que una gota se congela, comienza a crecer y a desarrollarse a la par que se va condensando en superficie el vapor de agua circundante. Por tanto, los cristales de nieve se forman, sobre todo, a partir de vapor de agua —no de agua líquida— que se solidifica directamente en una estructura cristalina. Las gotículas líquidas de la nube que permanecen sin congelar se evaporan poco a poco; de este modo, suministran al



aire el vapor de agua que nutre a sus “hermanas congeladas”.

Existe, pues, una transferencia neta de moléculas de agua desde las gotitas líquidas al vapor de agua y, por fin, a los cristales de nieve. Este es el método indirecto de congelación del agua líquida de una nube. Deben evaporarse alrededor de un millón de gotitas para suministrar el vapor de agua que requiere la formación de un cristal de nieve. Al ir creciendo, los cristales ganan peso hasta que la gravedad termina por sacarlos de las nubes.

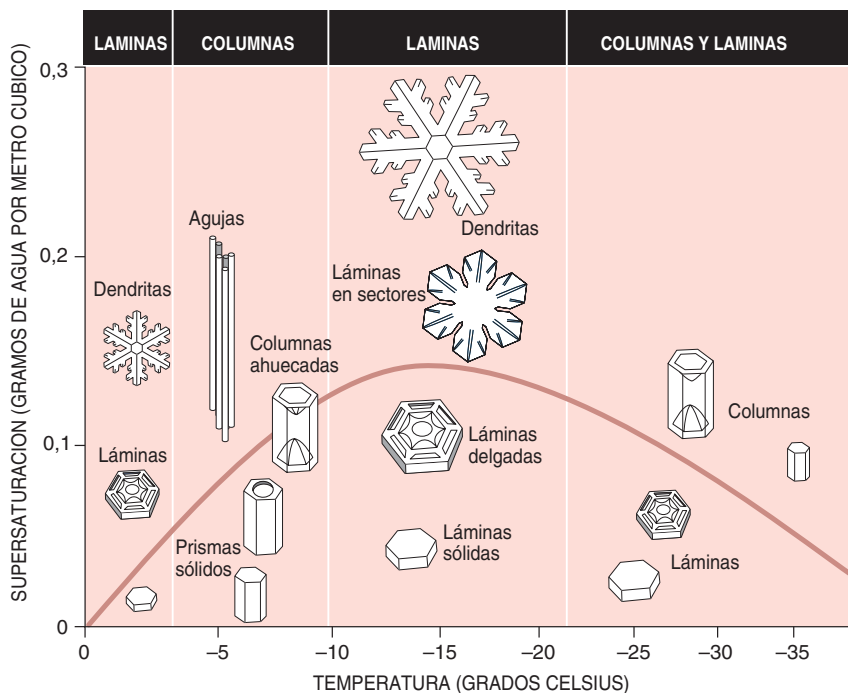
El ángulo entre los átomos de una molécula de agua impone que la red cristalina del hielo sea hexagonal, lo que resulta en una simetría de orden seis para los copos de nieve. Los cristales de nieve empiezan siendo pequeños prismas, pero llegan a crecer hasta unas décimas de milímetro

1. LOS CRISTALES DE NIEVE adoptan multitud de formas y tamaños (*por filas, de izquierda a derecha*): columnas con las caras ahuecadas debido a la pugna por el vapor de agua, láminas hexagonales, láminas estrelladas, láminas divididas en sectores, dendritas estrelladas, columnas huecas, agregaciones de agujas, columnas con casquetes y rosetas de balas con casquetes. Los prismas sencillos de menor tamaño pueden medir décimas de milímetro; las dendritas estrelladas mayores miden 10 milímetros de diámetro. Todos estos cristales de nieve fueron recogidos de nevadas naturales. La investigación en el laboratorio nos revela el modo en que la simple congelación del vapor de agua genera semejante variedad de formas.

(más o menos el tamaño del punto al final de esta frase). En función de los pormenores de su crecimiento, se convierten en finas columnas hexagonales con forma de lapicero, láminas hexagonales delgadas o cualquier estructura intermedia.

Cuanto mayores se hacen los cristales, mayor elaboración se advierte en las estructuras desarrolladas. Los cristales de nieve de forma columnar pueden convertirse en columnas

huecas con agujeros cónicos en sus extremos o pueden crecer en forma de finas agujas de milímetros de longitud. Las columnas robustas acostumbran agruparse en “rosetas de balas”, denominación que deben a la figura adquirida por las columnas individuales. Cerca del centro de ese cúmulo se produce una pugna por el vapor de agua que impide el crecimiento cristalino; de ahí que las columnas presenten una base puntiaguda.



2. LA ESTRUCTURA DE LOS CRISTALES DE NIEVE es sensible a la temperatura y a la humedad. Así lo muestra el diagrama morfológico (*arriba*) que Ukichiro Nakaya elaboró en los años treinta del siglo pasado. Aquí, la sobresaturación se refiere a un exceso de vapor de agua en el aire cuando la humedad está por encima del 100 por ciento. El diagrama muestra que, entre 0 y -3 grados, aparecen pequeñas láminas y estrellas. Entre -3 y -10 grados, los cristales forman agujas finas y columnas largas. Entre -10 y unos -22 grados, se generan láminas para sobresaturaciones bajas y grandes estructuras ramificadas para niveles superiores de vapor de agua; alrededor de -15 grados se observan formas grandes y fotogénicas. A temperaturas inferiores se crean pequeñas láminas o columnas, de nuevo, dependiendo de la humedad. La curva muestra la sobresaturación que se encontraría dentro de una nube densa. También se han desarrollado tablas de clasificación de cristales de nieve que contienen hasta 80 tipos. Una selección de esa tabla (*abajo*) expande alguno de los grupos del diagrama morfológico.

Pequeñas láminas pueden hacer brotar seis ramas primarias; se forman entonces cristales de nieve estrellados. Los especímenes de buen tamaño presentan un diámetro de entre 2 y 3 milímetros (más o menos el tamaño de esta “O” mayúscula). Los brazos de las láminas estrelladas ramificadas suelen presentarse decorados con crestas y otros patrones ornamentales. Las seis ramas principales de un cristal de nieve estrellado pueden también dar lugar a numerosas ramas laterales adicionales: se obtienen así estructuras dendríticas filiciformes que miden hasta 10 milímetros de diámetro. Las ramas laterales, separadas por ángulos múltiples de 60 grados, avanzan en paralelo a las hileras de ramas vecinas.

A veces ocurre que un cristal de nieve comienza a crecer en forma de columna, para cambiar luego a un crecimiento laminar; el resultado son dos cristales laminares unidos por una columna, a semejanza de dos ruedas encajadas en un eje. Estas formas un tanto exóticas se denominan “columnas con casquetes”. Adviértase que los ejemplos de simetría perfecta constituyen la excepción, no la regla, en los copos de nieve. Existen numerosos mecanismos que interrumpen el crecimiento perfecto de los cristales de nieve.

Cuando una gotita de una nube se congela inicialmente en un cristal de nieve naciente, mide un par escaso de micrómetros. Si se congela en un monocristal de hielo sin defectos, su forma inicial resulta completamente irrelevante en la determinación de la figura final. La elaborada morfología de un cristal de nieve individual surge con el tiempo, a medida que se va condensando en la superficie cristalina el vapor de agua y desarrollándose la estructura. Un cristal de nieve no se forma esculpiendo un bloque de hielo, sino mediante la adición selectiva de material. Para entender el abanico de formas y patrones que presentan los cristales de nieve debemos ahondar en la dinámica del crecimiento cristalino.

El diagrama morfológico

La simetría y la complejidad de los cristales de nieve viene debatiéndose desde hace siglos. Johannes Kepler, quien se percató de que los planetas orbitaban alrededor del Sol siguiendo

do trayectorias elípticas, aplicó el método científico al estudio de los cristales de hielo. En 1611, Kepler escribió *El copo de nieve de seis puntas*, un tratadito sobre las formas floreadas de los cristales de nieve. De la comparación de las flores con los copos de nieve, Kepler dedujo:

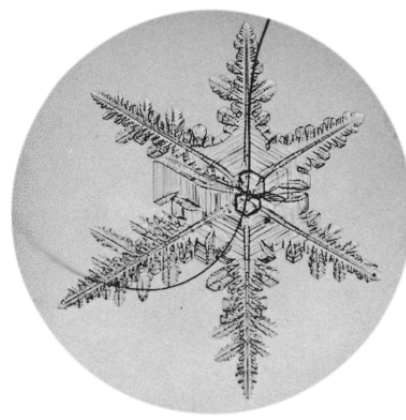
“Cada planta posee un principio de animación, pues cada individuo existe independiente y no hay razón para sorprenderse de que cada una porte una forma propia. Pero imaginar que cada estrellita de nieve posee un alma individual resulta absurdo; las formas de los copos de nieve no se deducen, en absoluto, de la operación del alma, que sería el caso de las plantas.”

Si reemplazamos “alma” por “la bioquímica de los organismos vivos”, Kepler estaba básicamente en lo cierto. No hay anteproyecto genético alguno que guíe el desarrollo de un cristal de nieve. Su crecimiento viene determinado por reglas físicas simples, mucho más simples que la química de los organismos; pese a tal sencillez, hacen emerger de manera espontánea patrones complejos. Kepler se dio cuenta de que la génesis de esas estructuras complejas a partir de precursores simples constituía una cuestión del mayor interés científico. En la investigación del fenómeno nos hallamos todavía.

El advenimiento de las técnicas de difracción de rayos X, en los años veinte del siglo pasado, arrojó luz sobre las estructuras cristalinas y estableció las bases de la cristalografía. No tardó en manifestarse la simetría hexagonal de la red cristalina del hielo. La estructura reticular permitió explicar la simetría hexagonal, aunque por sí sola no aclaraba la complejidad morfológica de los cristales.

Ukichiro Nakaya, de la Universidad de Hokkaido, aplicó las técnicas del siglo XX a esta cuestión en una destacable serie de trabajos experimentales realizada en los años treinta. Tras observar y documentar los distintos tipos de cristales de nieve naturales, Nakaya reparó en la necesidad de acometer experimentos en el laboratorio para investigar bajo qué condiciones aparecía cada tipo de cristal.

Nakaya desarrolló diversas técnicas para promover el crecimiento



3. LA BELLEZA DE LOS CRISTALES DE NIEVE se aprecia incluso a través de una lupa. Si buscamos imágenes detalladas, necesitamos un microscopio. En 1665, Robert Hooke usó su microscopio rudimentario (ofrecía un aumento poco mayor que una lupa) para esbozar la forma de los copos de nieve (*abajo*). Wilson A. Bentley, granjero de Vermont, reunió una impresionante colección de más de 5000 imágenes desde finales del siglo XIX hasta el decenio de los años veinte del siguiente. Aplicó una cámara al microscopio; siguió un meticuloso proceso de recorte a mano de los negativos para mejorar el contraste de fondo (*arriba a la izquierda*). Las publicaciones de Bentley ratificaban que no había dos copos de nieve iguales. En los años treinta, Nakaya desarrolló técnicas de imagen más avanzadas. E introdujo el desarrollo de copos de nieve en el laboratorio (*arriba a la derecha*). Anclaba el cristal mediante un pelo de conejo, puesto que las grasas del pelo promovían el crecimiento a partir de un único sitio de nucleación, en vez de una congelación uniforme a lo largo del filamento.

de cristales de nieve, uno por uno. Descubrió que la morfología de un cristal dependía de la temperatura y de la humedad del aire. Por debajo mismo de la congelación, a unos -2 grados, aparecían cristales laminares, muy finos. En condiciones más frías, alrededor de -5 grados, emergían unas esbeltas agujas. A -15 grados se formaban los cristales laminares más largos y finos; por debajo de los -25 grados, los cristales crecían en columnas enanas.

Para todas las temperaturas, Nakaya observó que surgían cristales prismáticos sencillos cuando la humedad era baja y lento el crecimiento; una humedad mayor, en cambio, daba lugar a un crecimiento más rápido y estructuras de mayor complejidad. Asimismo, trabajos posteriores han

demostrado que los cristales de tamaño reducido suelen presentar formas más simples, mientras que los más grandes entrañan mayor complejidad estructural.

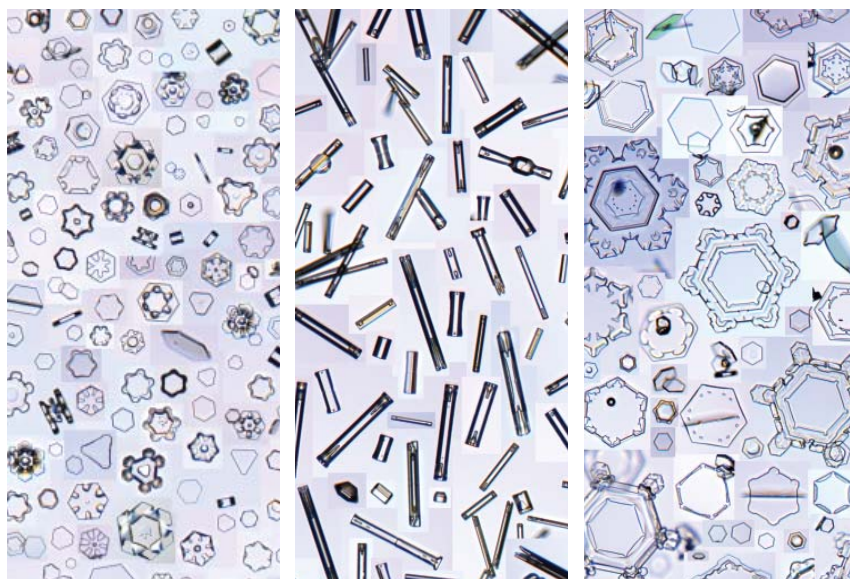
Nakaya sintetizó los resultados de todas sus investigaciones en el “diagrama morfológico de los cristales de nieve”, donde se representa la forma del cristal en función de la temperatura y la humedad. Setenta y cinco años después, seguimos sin conocer la razón de buena parte de las características que muestra el diagrama. En particular, la extraña dependencia de la morfología del cristal con la temperatura, que exhibe un comportamiento oscilante entre láminas y columnas en un intervalo de escasos grados, constituye un rompecabezas inexplicable.

4. LA DEPENDENCIA CON LA

TEMPERATURA de las formas de los cristales de nieve que muestra el diagrama morfológico cobra vida con nieve artificial. Todos estos cristales se formaron en el laboratorio al caer libremente en una atmósfera con un nivel intermedio de sobresaturación, a temperaturas variables. El panel de la izquierda muestra un montaje de cristales formados a -2 grados Celsius, el del medio a -5 grados y el de la derecha a -15 grados.

El diagrama morfológico sí da cuenta, en cambio, de dos de los rasgos principales de los cristales de nieve: por qué difieren tanto unos de otros y por qué las seis ramas de un cristal estrellado guardan estrecho parecido. La respuesta surge de una observación de Nakaya: el crecimiento muestra una sensibilidad exquisita ante la temperatura y la humedad.

Mientras se mueve por el interior de una nube, un cristal en desarrollo experimenta cambios continuos de temperatura y humedad. Cada variación en su entorno local altera la forma en que el cristal crece. El crecimiento puede ser planar o



columnar, facetado o ramificado, según las condiciones. Tan extrema sensibilidad ante la temperatura y la humedad determina que con variaciones nimias en el interior de la nube se originen cambios sustantivos en el tipo de crecimiento. Tras un recorrido interrumpido por numerosos giros y tropiezos, el cristal presenta una estructura final compleja.

Además, la ruta que toma cada copo de nieve constituye en sí mis-

ma un camino aleatorio, influido por los bucles y remolinos caóticos de la atmósfera. Es imposible que dos copos de nieve sigan exactamente el mismo camino a través de las nubes; por ese motivo, resulta improbable que demos con dos copos de nieve idénticos. La naturaleza, diríase, se divierte creando una variedad impresionante de formas cristalinas.

A pesar de que cada copo de nieve sigue un camino distinto, los seis brazos de un cristal estrellado viajan juntos. Sufren los mismos cambios ambientales al mismo tiempo. Por tanto, las ramas se desarrollan en sincronía porque comparten idéntico historial de crecimiento. El “genio creativo” de Thoreau, capaz de diseñar cristales de nieve en una innumerable cantidad de preciosos y simétricos patrones, se esconde en los vientos siempre cambiantes.

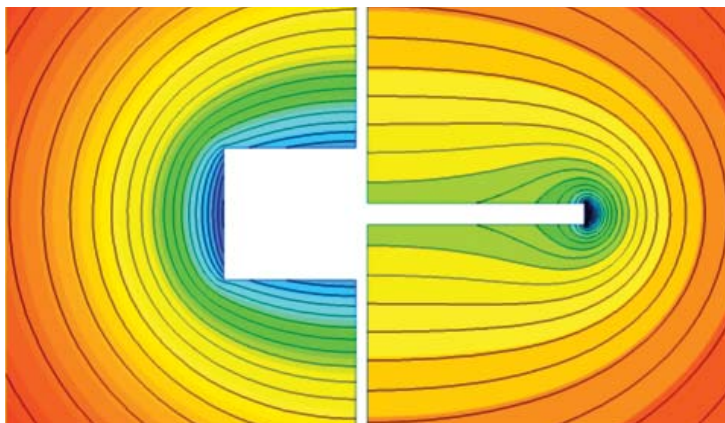
Ramificaciones

Más allá del diagrama morfológico, el avance en el conocimiento de los cristales de nieve se lo debemos a cristalógrafos y metalúrgicos. Unos y otros han venido cimentando en los últimos decenios la ciencia de materiales. La industria de los semiconductores impulsó la investigación cuando la obtención de cristales de gran tamaño —que requería la comprensión de la dinámica del crecimiento cristalino— se convirtió en una necesidad comercial.

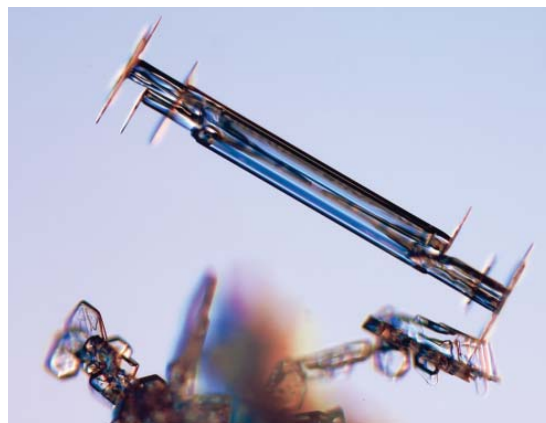
La formación de facetas (superficies cristalinas planas) constituye un fenómeno ubicuo en el crecien-



5. LOS CRISTALES DE NIEVE obtenidos en el laboratorio ofrecen la oportunidad de explorar los pormenores de la combinación de mecanismos de crecimiento y las distintas condiciones bajo las cuales operan. Dado que las cámaras de experimentación no proporcionan el mismo tiempo de caída libre que la atmósfera real, conviene hacer crecer los cristales en algún soporte. De acuerdo con cierta técnica, se desarrollan cristales de nieve en las puntas de finas agujas de hielo que brotan de un cable electrificado (*izquierda*). El campo eléctrico intenso atrae a las moléculas de agua del aire, lo que acelera el crecimiento de la aguja. Cuando eliminamos la carga eléctrica, el crecimiento del cristal vuelve a la normalidad. Mediante el control de la temperatura y la humedad se obtienen copos de nieve de diseño. Por ejemplo, en las puntas de una dendrita se hacen crecer columnas huecas y luego tapas laminares sobre cada columna; se obtiene así una suerte de candelabro (*derecha*). La secuencia de cambios de temperatura que produce dichas formas sería poco probable dentro de un banco de nubes natural.



6. MODELOS COMPUTACIONALES de la concentración de vapor de agua alrededor de los bordes de láminas de cristales de nieve gruesas (*izquierda*) y finas (*centro*) demuestran que hay menos vapor de agua disponible en torno a los bordes de láminas finas en crecimiento rápido. Las bandas coloreadas indican la concentración de vapor de agua, que aumenta del azul al rojo. Dichos modelos



sugieren un nuevo mecanismo de crecimiento, la “inestabilidad del filo de la navaja”, que amplifica pequeños cambios intrínsecos en el crecimiento cristalino. Esta inestabilidad acelera el crecimiento de láminas finas y explica la formación de columnas con casquetes, donde el cristal parece cambiar espontáneamente de un desarrollo columnar a otro laminar (*derecha*).

to cristalino. El facetado desarrolla una función primordial a la hora de guiar el crecimiento de los cristales de nieve. Una vez que se congela una gotita de la nube, el cristal en expansión desarrolla facetas, pues unas superficies cristalinas van acumulando material con mayor celeridad que otras. Las moléculas en condensación son atraídas hacia superficies redondeadas (rugosas a escala atómica), puesto que dichas zonas ofrecen mayor disponibilidad para establecer enlaces químicos. Las regiones planas (facetas superficiales) cuentan con menor densidad de enlaces químicos “colgantes”; constituyen, por tanto, sitios menos favorables para un enlace.

Tras un breve intervalo de desarrollo cristalino, se conservan sólo las superficies de las caras que crecen más despacio. El cristal adquiere, por fin, una estructura facetada, con independencia de su aspecto inicial. El enlace molecular en la red cristalina determina que las superficies experimentan un crecimiento lento y, por tanto, qué planos darán lugar a facetas. A través del facetado, la geometría de la molécula de agua se transfiere a la geometría del cristal.

Distintos cristales minerales presentan estructuras facetadas diferentes, en función de su entramado molecular peculiar. Cuando el facetado domina el crecimiento, se obtiene un cristal hexagonal con seis caras laterales, o facetas prismáticas, y dos

superficies (superior e inferior), o facetas basales. Se trata del patrón típico de los cristales de nieve de tamaño reducido o de crecimiento lento. Solemos percibir restos de esa tipología en el centro de cristales de mayor tamaño y complejidad, lo que revela una forma inicial sencilla.

Bajo ciertas condiciones, las moléculas de agua se adhieren a las superficies prismáticas con facilidad mayor que a las basales. Así se generan finas láminas de hielo. En otras circunstancias, las moléculas se adhieren a las facetas basales, promoviendo la aparición de columnas. En cualquier caso, el facetado constituye uno de los mecanismos principales de producción de formas y patrones.

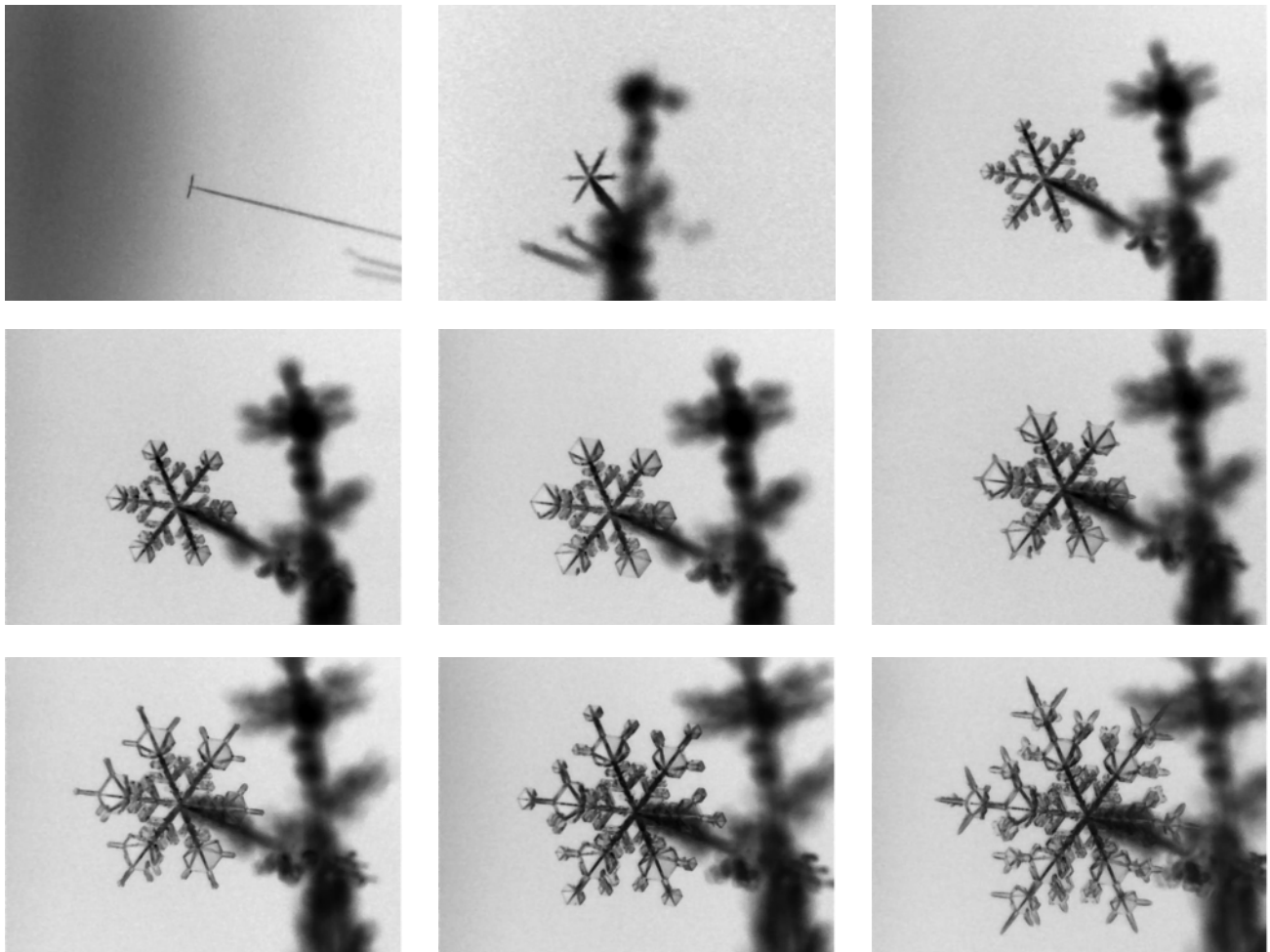
Sin embargo, el facetado no lo explica todo; si así fuera, los cristales de nieve constituirían simples prismas hexagonales, algo muy lejano de la verdad. Otros procesos adicionales intervienen en la formación de cristales de gran tamaño (medio milímetro de un extremo al otro) o de crecimiento rápido. En ese caso, el cristal puede hacer brotar ramas, en virtud de la inestabilidad de Mullins-Sekerka (o inestabilidad de ramificación). El proceso en cuestión explica la aparición espontánea de complejas estructuras floriformes en los cristales de nieve a partir sólo de la congelación de vapor de agua.

En su crecimiento, los cristales de nieve van usando el vapor de agua presente en su entorno cercano; se

necesita cierto tiempo para que otras moléculas se difundan a través del aire hasta llegar al cristal. Por tanto, el crecimiento de un cristal de nieve se encuentra limitado por la difusión.

Las diversas regiones del cristal pugnan por los recursos disponibles. Si una zona del cristal sobresale (pensamos en una de las puntas de una lámina hexagonal), las moléculas de agua se acumularán preferentemente allí, porque la distancia de difusión es menor. Con un aporte de material ligeramente mayor, ese vértice crecerá con celeridad mayor, lo que dará lugar a una punta más pronunciada. Se establece entonces una retroalimentación positiva que refuerza el efecto, y desde las seis puntas de un cristal de nieve hexagonal brotan ramas largas. Con el tiempo, numerosas ramas laterales emergen de protuberancias aleatorias o de puntas facetadas de los brazos principales.

Inestabilidades de este tipo constituyen la clave de la creación de patrones. La naturaleza se asemeja a una cadena de sistemas inestables, superpuestos. El Sol calienta el aire cerca del suelo. El aire caliente se eleva; esta inestabilidad convectiva da lugar al viento, las nubes y al resto de los meteoros. El viento resultante sopla sobre la superficie del océano, tornándola inestable, con la generación consiguiente de olas, y transporta humedad a la atmósfera.



7. OBTENCION DE UN CRISTAL DE NIEVE en el laboratorio. Esta serie de imágenes muestra el modo en que las estructuras de hielo alcanzan sus elaboradas formas. Inicialmente, la temperatura y la humedad se ajustaron para fomentar la ramificación. Después, las condiciones se cambiaron a otras que favorecían

el facetado y el crecimiento laminar. Mediante la alternancia de estos dos ambientes se remedaron los tumbos que da un copo de nieve al sufrir las variaciones climáticas locales que se producen en el interior de una nube. El cristal resultante muestra períodos alternantes de ramificación y crecimiento laminar.

Al llegar estas olas a las playas someras, pierden estabilidad y rompen.

El facetado y la ramificación constituyen dos fuerzas dominantes en el crecimiento de cristales de nieve. Operan en direcciones opuestas. El facetado corresponde a un proceso estabilizador que lleva a la creación de superficies planas y formas simples (sólo con el facetado, todos los cristales de nieve serían prismas hexagonales). La ramificación, en cambio, constituye un proceso inestable que convierte formas simples en complejas (la ramificación sola produciría cristales con riqueza estructural, sin simetría, como matorrales de hielo en miniatura). La acción constante y recíproca entre estas dos fuerzas esculpe las formas y los patrones de los cristales de nieve.

Inestabilidades

A pesar de que la ramificación y el facetado explican en buena medida el crecimiento de los cristales de nieve, no bastan para comprender la organización global del diagrama morfológico. A lo largo de decenios, se sostuvo que la tasa de crecimiento de las superficies prismáticas y basales dependía sólo de la temperatura. Si las superficies prismáticas acumulaban material con mayor prontitud que las superficies basales, el resultado eran láminas. Si ocurría lo contrario, se generaban columnas y agujas. Para que hubiese concordancia con el diagrama morfológico, los índices de crecimiento relativos deberían, sin embargo, cambiar drásticamente con la temperatura, al menos en dos órdenes de magnitud y en pocos grados.

He dedicado los últimos años al estudio de la formación de cristales de nieve, apoyado en mediciones precisas de las tasas de crecimiento bajo condiciones controladas. En esencia, se trata del mismo enfoque de Nakaya, con la salvedad de que ahora disponemos de técnicas del siglo XXI: interferometría láser, registro de datos digitales, control exquisito de la temperatura y otros avances que el japonés nunca hubiera imaginado.

Esperaba hallar una fuerte variación del crecimiento cristalino con la temperatura, en coherencia con el diagrama morfológico. Si las láminas finas y las columnas esbeltas crecían con una diferencia de sólo un par de grados, resultaba lógico inferir que las tasas de crecimiento de las facetas basales y de las prismáticas

divergirían unas de otras y cambiarían rápidamente con la temperatura.

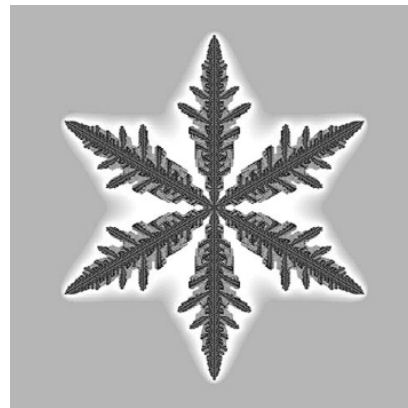
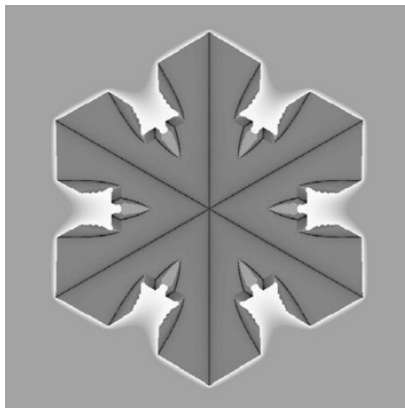
Pero los datos nos trajeron otra realidad. Había algunas diferencias entre facetas, pero no alcanzaban la magnitud esperada. Asimismo, las tasas de crecimiento cambiaban ligeramente con la temperatura, aunque no en cuantía suficiente para justificar los rasgos observados en el diagrama morfológico.

La situación se tornó más intrigante todavía cuando empecé a desarrollar modelos computacionales del crecimiento cristalino limitado por difusión, en concreto del crecimiento de láminas finas. Los principios de la inestabilidad de ramificación sugerían que la humedad debería ser máxima en la arista de una lámina, puesto que sobresale más en el aire que rodea el cristal. Las simulaciones indicaban, en cambio, que el rápido crecimiento de los bordes de la lámina tendía a vaciar el vapor de agua en esa zona, con lo que la humedad cerca del borde es menor que en otras regiones. Semejante resultado contra toda intuición daba a entender que la inestabilidad de ramificación no fomentaba el crecimiento de láminas finas, sino que conducía al crecimiento de bloques.

El diagrama morfológico seguía sin comprenderse. Según el modelo teórico, las tasas de crecimiento deberían cambiar en un factor de 100 o incluso 1000 en pocos grados de temperatura. Pero ello parecía contradecir las leyes de la dinámica del crecimiento cristalino. Y, en efecto, las mediciones mostraron que no había cambios tan rápidos. Se requería un elemento nuevo para dar cuenta de los cambios drásticos en la forma de los cristales con la temperatura.

Estoy convencido que la solución reside en la *cinética de adherencia dependiente de la estructura*. Parto de una hipótesis fundamental: la tasa de crecimiento intrínseca de una superficie facetada depende de su estructura. Una faceta superficial extremadamente estrecha, como la que existe justo en el borde de un cristal laminar fino, crecerá con mayor celeridad que otra faceta más ancha. Desconocemos la dinámica molecular subyacente.

Pudiera acontecer que las moléculas que se hallan en el borde de



8. MEDIANTE EL AUTOMATA CELULAR, un método de modelización computacional, matemáticos de la Universidad de Wisconsin en Madison y de la Universidad de California en San Diego han llevado a cabo simulaciones del crecimiento de los cristales de nieve. Estos copos “teóricos” suelen atenerse a las reglas de crecimiento de los cristales de nieve reales.

la lámina fina estén menos trabadas que las moléculas de una superficie más ancha, ya que cuentan con menor número de moléculas vecinas en que enlazarse. Ello causaría que el borde fuera más rugoso que la superficie, puesto que las moléculas de superficie tienen más libertad para presionar en torno. Una zona rugosa es más apta para la agregación molecular, con el potencial incremento de la tasa de desarrollo. No acabamos de entender la complejidad estructural de las superficies de hielo, lo que frustra cualquier intento de demostración o refutación de la hipótesis. Con todo, mantengo la necesidad de la existencia de ese u otro fenómeno similar para explicar los datos.

La cinética de adherencia dependiente de la estructura lleva a un nuevo patrón de crecimiento: *la inestabilidad del filo de la navaja*. Si la arista de un cristal laminar deviene un poco más fino, la cinética de adherencia dependiente de la estructura dicta que aumentará la tasa de crecimiento. Esta aceleración del crecimiento en el borde hará que éste se afile, lo que aumentará la tasa de crecimiento todavía más. Aquí se da de nuevo una retroalimentación positiva que potencia el crecimiento cristalino y promueve la formación de estructuras laminares finas. La inestabilidad continúa hasta que otros mecanismos detienen elafilamiento del borde.

La inestabilidad del filo de la navaja no sólo logra la concordancia

entre los datos de crecimiento cristalino, sino que explica también numerosos aspectos de los cristales de nieve naturales. Así, las primeras mediciones de Nakaya mostraron que los cristales estrellados de gran tamaño presentaban un grosor característico de alrededor de 0,01 milímetros (una décima parte del grosor de una hoja de papel), valor independiente del tamaño del cristal y de la complejidad de la ramificación. Tal comportamiento es el que cabría esperar de este tipo de inestabilidad. Y no parece fácil encontrar otra explicación.

Además, los cristales columnares con casquetes suelen mostrar una transición brusca entre la columna central y las dos láminas de los extremos. Este cambio de crecimiento, en apariencia instantáneo, produce a menudo cristales con láminas finas en los extremos de una columna central. Uno esperaría que la norma fuese una transición más gradual, que tendiese a producir láminas más gruesas sobre las columnas. Pero no es eso lo observado.

La inestabilidad del filo de la navaja explica también las columnas con casquete, puesto que las inestabilidades tienden a extender los cambios pequeños en las condiciones iniciales. Si el entorno local cambia en detrimento del columnar, la inestabilidad irrumpe para producir láminas finas. La inestabilidad amplifica el efecto de los cambios lentos en las condiciones externas, instando un

cambio brusco en el crecimiento, que pasa de columnar a laminar.

Esta amplificación constituye un efecto importante de la inestabilidad del filo de la navaja, puesto que reduce de un modo sustancial los cambios de crecimiento dependientes de la temperatura que se necesitan para explicar el diagrama morfológico. Desconocemos la naturaleza de los cambios operados, pero al menos ahora no tienen que ser tan drásticos. Pequeñas variaciones termodependientes en el crecimiento se amplifican para producir las morfologías que se observan en los cristales.

La existencia de la inestabilidad del filo de la navaja sugiere que la dinámica del crecimiento de nanocristales difiere de la dinámica de las estructuras de mayor tamaño. Este fenómeno puede resultar clave para la comprensión del comportamiento de nanodispositivos en el campo de los semiconductores o cualquier clase de fabricación nanométrica donde se exige autoensamblar estructuras complejas a partir de materiales en bruto. Se ignora el alcance de la ubicuidad de la inestabilidad, por no hablar de otras sorpresas que nos pudiera deparar la dinámica del crecimiento en la nanoescala.

La inestabilidad recién descubierta corresponde a una tercera fuerza mayor en la formación de las estructuras complejas de los cristales de nieve, del mismo rango de importancia que el facetado y la ramificación. Esa fuerza encauza la morfología a gran escala de la mayoría de los cristales. Además, proporciona un mecanismo de amplificación para explicar el diagrama morfológico. Sin la inestabilidad del filo de la navaja, los cristales de nieve serían más pequeños, más gruesos o en forma de bloque, y carecerían de sus preciosas características.

Investigaciones futuras

A pesar de que la idea de la inestabilidad del filo de la navaja resulta muy atractiva, no es más que una hipótesis sin comprobar. La comprensión del crecimiento cristalino requiere ulteriores mediciones y avances teóricos. Por botón de muestra, necesitamos ahondar en el conocimiento de la superficie de hielo para explicar la dinámica molecular responsable de la cinética de adherencia dependiente

de la estructura. A escala molecular, el hielo muestra fusión superficial dependiente de la temperatura, rugosidad superficial y otros fenómenos complejos. Los modelos de dinámica molecular se han abierto camino en la física de la superficie del hielo, pero nos hallamos muy lejos de poseer un conocimiento sistemático. El hielo sigue sorprendiéndonos con propiedades de superficie harto sutiles. El reto de entenderlas a escala molecular sigue en pie.

Habrà que refinar también los modelos informáticos del crecimiento cristalino. Se ha avanzado en la creación de modelos sobre la solidificación limitada por difusión. Se posee cierto dominio de la formación de patrones en esos sistemas. Mas hasta la fecha nadie ha sido capaz de desarrollar un modelo preciso del crecimiento limitado por difusión en presencia de un facetado fuerte. David Griffeath, de la Universidad de Wisconsin en Madison, y Janko Gravner, de la Universidad de California en San Diego, han llevado a cabo trabajos prometedores en este campo: mediante modelos de autómatas celulares tratan de emular el crecimiento limitado por difusión. En tales modelos, las reglas básicas del crecimiento cristalino se aplican de forma iterativa a los bloques de una red, para simular la formación de un cristal. Según parece, con esa técnica sencilla se evitan problemas computacionales inherentes a la resolución numérica de la ecuación de difusión. Los resultados iniciales reproducen buena parte de los aspectos del crecimiento de un cristal de nieve real.

Asimismo, debe mejorarse la precisión de las mediciones de las tasas de crecimiento cristalino y ampliar el rango de condiciones externas (temperatura, humedad, presión, etcétera). Por ejemplo, la reducción de la presión obliga a que las moléculas de agua se difundan con mayor celeridad, lo que restringe la ramificación de los cristales en desarrollo. Aún está por ver el impacto del cambio de presión en la inestabilidad del filo de la navaja.

En la actualidad estamos trabajando en nuevas técnicas que usan un crecimiento cristalino modificado eléctricamente para producir esbeltos cristales de hielo puntiagudos. Desarrollamos a continuación cristales laminares o columnares en la punta de esas agujas, bajo todo tipo de condiciones externas. Libres de corrientes de aire, estos cristales crecen más que los que se ven en la naturaleza. Hemos obtenido cristales de hasta 25 milímetros. También creamos copos de nieve de diseño, con patrones elegidos a voluntad. Grupos de la Universidad de Washington y de la estatal de Pennsylvania utilizan la levitación electrodinámica para obtener monocristales en entornos distintos.

Con datos experimentales de mayor precisión, nuevos modelos computacionales y la mejora constante en la comprensión de la dinámica molecular de la superficie del hielo, nos hallamos a un paso de contestar buena parte de las preguntas que formuló Kepler hace unos 400 años cuando se detuvo a pensar sobre las formas de los copos de nieve.

El autor

Kenneth G. Libbrecht dirige el departamento de física del Instituto de Tecnología de California. Se dedica al estudio de la actividad solar, las ondas gravitacionales y un sinfín de otros fenómenos. Su interés en el crecimiento cristalino le llevó a estudiar y fotografiar los cristales de nieve, sobre los que ha escrito varios libros.

©*American Scientist Magazine*.

Bibliografía complementaria

- SNOW CRYSTALS: NATURAL AND ARTIFICIAL. U. Nakaya. Harvard University Press; Cambridge, 1954.
- THE SIX-CORNERED SNOWFLAKE. J. Kepler. Clarendon Press; Oxford, 1966.
- EXPLAINING THE FORMATION OF THIN ICE CRYSTAL PLATES WITH STRUCTURE DEPENDENT ATTACHMENT KINETICS. K. G. Libbrecht en *Journal of Crystal Growth*, vol. 258; págs. 168-175; 2003.
- THE SNOWFLAKE: WINTER'S SECRET BEAUTY. K. G. Libbrecht. Voyageur Press; St. Paul, 2003.
- KEN LIBBRECHT'S FIELD GUIDE TO SNOWFLAKES. K. G. Libbrecht. Voyageur Press; St. Paul, 2006.