

La pequeña historia de los copos de nieve

ÉTIENNE GHYS

1

La pequeña historia de los copos de nieve

Étienne Ghys

Título original: *La petite histoire des flocons de neige*

© 2021, Étienne Ghys

© Odile Jacob

DE ESTA EDICIÓN:

© Traducción: Andrés Navas

© Editorial Universidad de Santiago de Chile, 2024

Av. Víctor Jara 3453, Estación Central

Santiago de Chile

Tel.: +56 2 2718 0080

www.editorialusach.cl

I.S.B.N. edición impresa: 978-956-303-689-3

I.S.B.N. edición digital: 978-956-303-690-9

Director editorial: Galo Ghigliotto G.

Edición: Daniella Gutiérrez G.

Traducción: Andrés Navas

Diseño y diagramación: Daniela Escobar C. y Andrea Meza V.

Primera edición, octubre 2024

Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida en manera alguna ni por ningún medio, ya sea eléctrico, químico o mecánico, óptico, de grabación o de fotocopia, sin permiso previo de la editorial.

Impreso en Chile

A mis dos adorables nietas,
Anna y Noémie

**EL INSTITUTO DE
FRANCIA** en París, bajo
la nieve.



La Academia de Ciencias de Francia tiene como sede el Palacio Conti, en París. Agrupa a 280 miembros: matemáticos, informáticos, físicos, astrónomos, químicos y biólogos, quienes se reúnen regularmente para discutir sobre ciencia y aconsejar al gobierno sobre todos los asuntos que involucran ciencia y sociedad. Además, cada año, la Academia otorga un gran número de premios para incentivar a los investigadores.

También una vez por año, los premios de la fundación «La Main à la Pâte» son entregados en los mismos salones donde habitualmente trabajan los académicos. Ese día, los premiados no son los investigadores, sino un curso de escuela o liceo que ha desarrollado un proyecto científico interesante. Es un verdadero placer ver que decenas de niños corren por esos pasillos haciendo un poco más de ruido que el habitual.

En febrero de 2017 andaba detrás de una idea. Había aceptado dar una pequeña conferencia de matemáticas para estudiantes de una escuela primaria y dudaba: ¿de qué voy a hablarles? Como era invierno, decidí contarles la pequeña historia de los copos de nieve. Aprendí muchísimo preparando mi exposición, mucho más de lo necesario. El tema me gustó y me produjo ganas de saber aún más.

PREFACIO

La charla estaba programada en París, específicamente, en la Academia de Ciencias, en un palacio magnífico que está justo frente al Museo de Louvre. La sala es utilizada a menudo por científicos —muy serios y no muy jóvenes— para discutir sobre el progreso de la ciencia. Pero ese día, de manera excepcional, serían los niños quienes tomarían asiento en esos sillones verdes.

Le propuse a mi nieta Ana —que para esa fecha tenía siete años— que me acompañara a París desde Lyon, donde yo vivo. En la mañana,

mientras subíamos al tren, comenzó a nevar. Cuando llegamos, París estaba cubierto por un manto blanco. ¡Qué alegría fue hablar a los niños de los copos mientras caía la nieve!

Después de esta experiencia, quise entender aún mejor los copos de nieve. Me hice algunas preguntas, algunas de las cuales aún no he logrado responder. Tuve la oportunidad de dictar otras conferencias frente a públicos distintos, jóvenes y no tanto, y me fui maravillando cada vez más con los copos. Es esta sensación la que me gustaría compartir con ustedes.

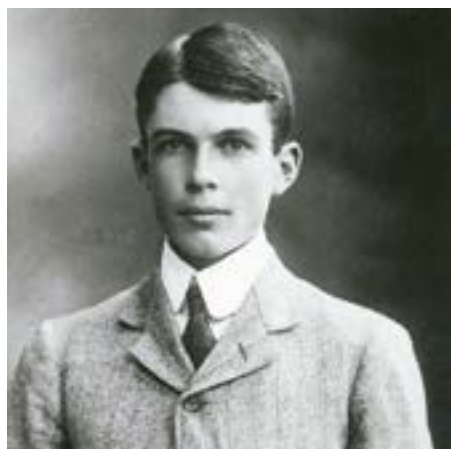
Estos son los retratos de algunos personajes que encontraremos en este libro. Ellos vivieron en periodos muy diferentes, a lo largo de más de cinco siglos y en países también muy diferentes, pero una cosa los une: el amor por la nieve.

Estoy seguro de que notarás algo: apenas hay dos mujeres... ¿No es esto chocante? Desde siempre, los hombres han tenido un lugar dominante en la ciencia, y esto es injusto, pues no significa en absoluto que las mujeres sean menos capaces de hacer ciencia.

Algunas han hecho descubrimientos brillantes, pero durante mucho tiempo fueron desplazadas de la actividad. Desearía que este libro incentive a las niñas a mirar la nieve y que, en un futuro no muy lejano, esta colección de imágenes se complete con retratos de muchas mujeres científicas. ¡Unamos fuerzas para esto!









UN REMORDIMIENTO DEL AUTOR

Al contar la historia de los copos de nieve a través de los personajes que los han estudiado, podría dar a entender que la ciencia progresa gracias a genios que surgen cada cierto tiempo. Es verdad que algunos grandes sabios, como aquellos que encontraremos, tuvieron ideas extraordinarias que nadie tuvo antes. Sin embargo, ellos no hubiesen existido sin esa multitud de científicos anónimos que, lamentablemente, hemos olvidado. La ciencia es, ante todo, una actividad colectiva en la que cada uno se apoya en los trabajos de los demás, por muy modestos que estos sean. Probablemente, los genios experimentaron un gran placer al hacer sus grandes descubrimientos, pero los otros estudiosos, incluso

los más desconocidos, también tuvieron experiencias muy intensas con sus logros. Además, no hay que olvidar el rol de los profesores, sin los cuales el conocimiento no podría ser transmitido de generación en generación.

Hay muchas maneras de amar la ciencia. Se puede sentir placer al hacer descubrimientos: eso es lo que hacen los científicos. Pero se la puede querer también desde una posición de espectador y admirar el trabajo que han hecho las otras personas, de la misma forma en que se puede disfrutar la música sin ser músico. Esto también es una fuente de satisfacción. A fin de cuentas, ¿no es también la ciencia una parte integrante de la cultura?



EL CAMPEÓN: un
«enorme» copo de
nieve. Mide un poco
más de un centímetro.
Tan pequeño, tan
complejo, tan bello...

OLAF MÅNSSON:
EL HOMBRE DEL NORTE (1490-1557)



Olaf Månsson, una de las primeras personas que dibujó un copo de nieve, nació en 1490 en Suecia, por lo que se comprende que tuvo la oportunidad de ver caer la nieve.

Es difícil imaginar cómo era el mundo hace más de quinientos años. Casi no había comunicación entre los distintos países; ¡ciertamente nada de televisores, teléfonos portátiles o internet! De hecho, en 1490, Cristóbal Colón aún no viajaba a América. En Europa se ignoraba completamente la existencia de ese continente, y poco se sabía de África o del Extremo Oriente. Las personas vivían en la ignorancia del mundo que las rodeaba. Debemos decir, además, que la mayor parte de los hombres y mujeres vivían en una gran miseria. La esperanza de vida no superaba los 30 años. Hoy en día, muchos de estos problemas (pero

no todos, lamentablemente) han sido resueltos, en gran medida, gracias a la ciencia.

Olaf Månsson nació en una familia rica, gracias a lo cual aprendió a leer y escribir en latín, que era llamada «lengua franca», la lengua que usaban todas las personas que sabían escribir para comunicarse con extranjeros, algo así como el inglés hoy. En las familias ricas, era habitual «latinizar» su nombre. Månsson significa «hijo de Mån», y «Mån» proviene del latín magnus, que significa «grande». Por ello, firmaba orgullosamente sus textos como «Olaus Magnus».

Månsson ofició de arzobispo católico de Upsala, una ciudad que se ubica al norte de la capital, Estocolmo, que ya poseía una universidad. Olaf amaba su país, pero fue forzado a abandonarlo

por razones religiosas. Este era un periodo muy violento de la historia de Europa: la religión protestante penetraba en los países del norte y reemplazaba al catolicismo. No era una época de mucha tolerancia: los católicos debían convertirse al protestantismo o... huir. Olaf, entonces, dejó su país para refugiarse en Italia.

¡Italia y sus veranos maravillosos! El clima mediterráneo es dulce y agradable. No hay necesidad de usar grandes abrigos en invierno: en Roma, casi nunca se ve nieve. Cuando el arzobispo exiliado describía allí su país de origen, todo el mundo despotricaba contra ese clima horrible. Peor aún, todo el mundo pensaba que los pueblos del norte eran bárbaros sin cultura alguna.



EL MURO DE HIELO.

El famoso muro de la serie estadounidense Juego de Tronos protege el mundo civilizado de los salvajes del norte.



¡Ya viene el invierno!

Olaf Månsson no solo sabía leer y escribir; también sabía dibujar. Decidió, entonces, escribir un libro para explicar que la gente del norte era tan interesante como los romanos. Su obra es como un libro de cómics, una verdadera maravilla.

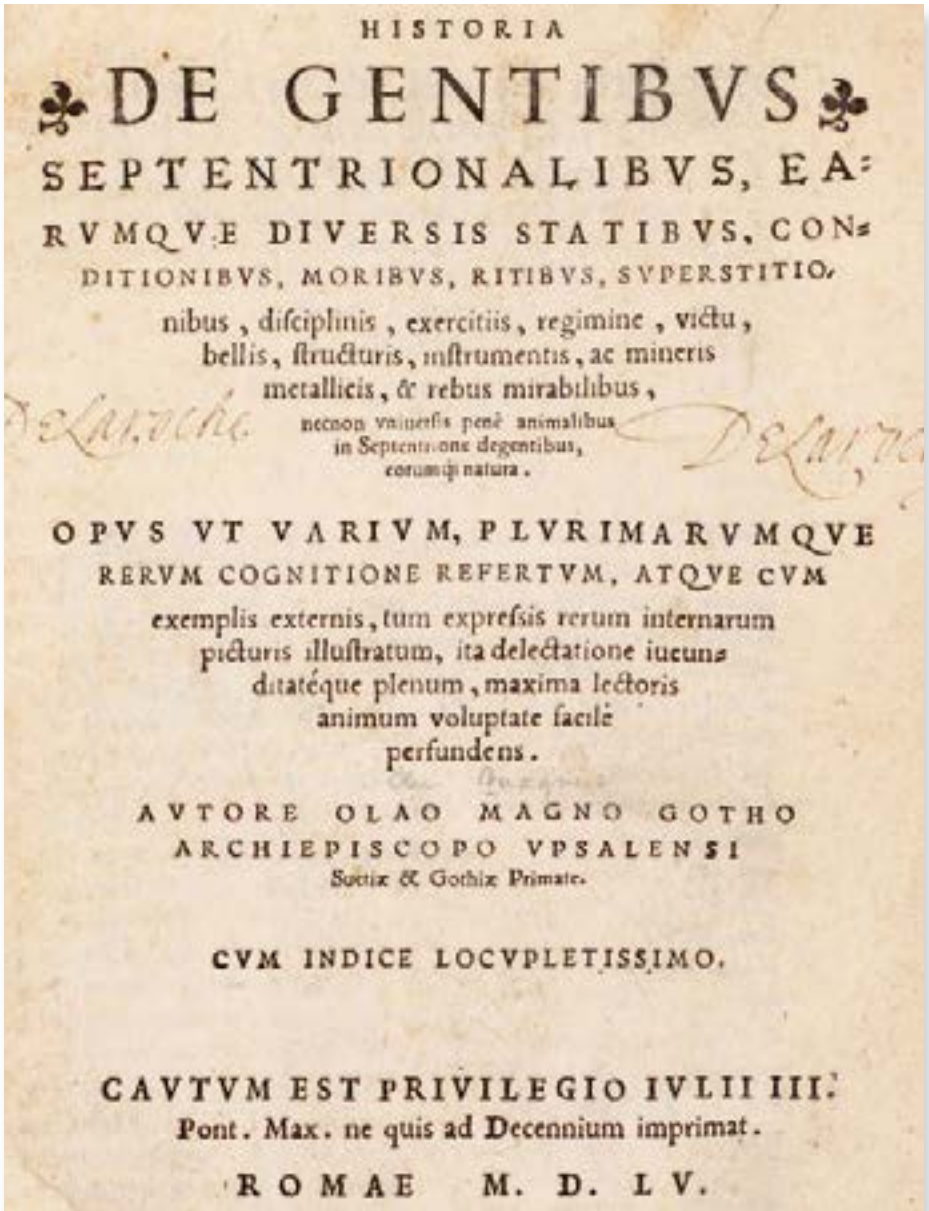
El título, obviamente en latín, es: Historia de *Gentibus Septentrionalibus*, que fue traducido como: Descripción de los países del Norte.

Allí se narra casi todo lo que tiene que ver con el norte.

La carátula misma anuncia que serán descritos

«los diversos preceptos y disciplinas, los cultos religiosos, la forma de vivir, las guerras, los edificios y las herramientas, las minas y los metales que se encuentran en las montañas, las cosas maravillosas y todos los animales que se encuentran en el Norte y su naturaleza».

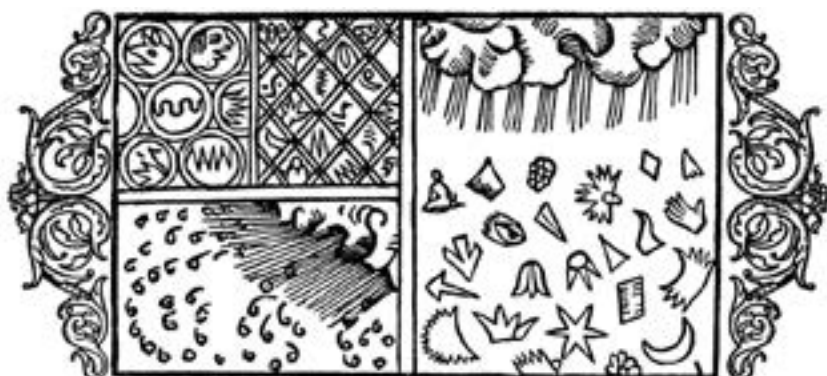
Contiene, además, centenas de reproducciones de grabados en madera. Allí es posible admirar los primeros dibujos de copos de nieve.



PIE DE FOTO Esto es un texto simulado



PIE DE FOTO Esto es un texto simulado



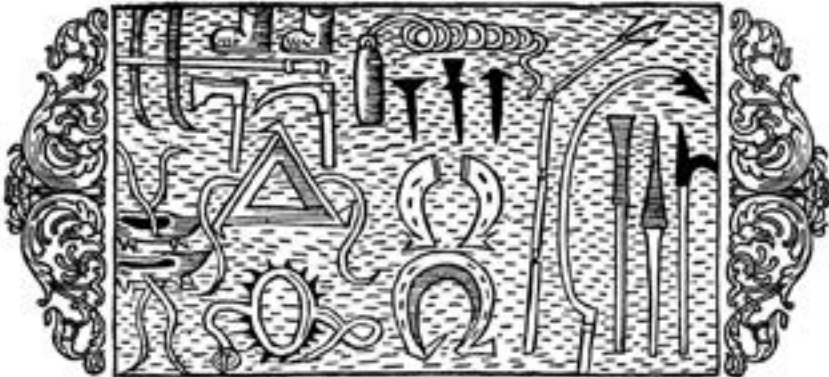
Olaus Magnus no era un científico: era un patriota. Hay que perdonarle sus dibujos de copos de nieve imaginarios. Su fin era otro, muy loable por cierto: él quería mostrar que los países del Norte guardaban maravillas desconocidas en el Sur. Así, no dudó en hacer volar su imaginación para inventar copos que no existen. Él buscaba reivindicar el norte y afirmar la diversidad

del mundo. Pero su batalla no fue completamente ganada, incluso hasta el día de hoy. Muchas personas del departamento del Norte de Francia lo saben muy bien: a menudo se les hace ver su mala suerte por haber nacido en una región tan poco interesante.

En estas otras imágenes se ilustran la nieve y el frío:



Un trineo.



Herramientas para cortar la nieve.



A caballo sobre la nieve.



El sol de invierno.



Cazando sobre esquíes.

JOHANNES KEPLER:
EL CURIOSO (1571-1630)



Johannes Kepler nació en 1571 en Baviera, que hoy forma parte de Alemania. Fue probablemente la primera persona que miró un copo de nieve con los ojos de un científico, más precisamente, de un matemático. Obsérvese que, en su retrato, tiene un compás en la mano para mostrar que practica la geometría.

Pero Kepler no solo hizo esto. Es conocido sobre todo como astrónomo, uno de los más importantes de todos los tiempos. Durante mucho tiempo, se pensó que el Sol y los demás planetas giraban alrededor de la Tierra y que sus movimientos eran circulares y se superponían unos con otros. Kepler fue una de las personas que puso todo esto en duda. Gracias a él, hoy sabemos que la Tierra y los otros planetas giran en torno al Sol

siguiendo trayectorias que no son circulares, sino que tienen la forma de curvas ovales llamadas elipses. Hubo de tener mucho coraje para contradecir lo que todos los sabios afirmaban desde hacía varios siglos.

Debemos entender que el comienzo del siglo XVII es un periodo de transición. Durante la Edad Media, que por ese entonces se extingue, la ciencia y la técnica experimentan algunos progresos, pero se mantienen bajo la autoridad de la Iglesia. En el nuevo mundo que se instala, la ciencia ya no tiene necesidad de la teología para explicar la naturaleza. Kepler tiene un pie en cada lado: es muy religioso, pero sus teorías se alejan de la doctrina oficial. Como muchos astrónomos de su época, él también era astrólogo (¡algo impensable hoy en día!). Su objetivo es entender la obra de Dios

a partir de principios matemáticos simples. Procura comprender el mundo a partir de lo que ahora llamamos los principios de la simetría. Sin exagerar, cuatrocientos años más tarde podemos decir que esta es una de las ideas esenciales de la ciencia: las simetrías gobiernan la física y las matemáticas, tal como veremos para el ejemplo de los copos de nieve.

El 31 de diciembre de 1610, Kepler es invitado por un amigo para celebrar el Año Nuevo. Sabe que a su amigo le encantan las cosas pequeñas y, mientras camina, piensa en una idea de regalo. Cuando cruza un puente, comienza a nevar y un copo de nieve cae sobre la manga de su abrigo. Kepler observa el copo y se maravilla inmediatamente. ¡Tanta belleza en algo tan pequeño! Decide, entonces, regalar un copo a su amigo. El regalo ideal para un matemático, según él, pues «viene del paraíso y parece una estrella». Pero, ¿cómo hacerlo? ¡No se puede envolver un copo de nieve en papel de regalo!

Decide, entonces, escribir un libro sobre los copos y regalárselo a su amigo. Observa la carátula del libro que publicó un poco después.

Su nombre aparece en la parte de arriba,

por supuesto, en latín:

IOANNIS KEPLERI

Luego, escribe algo muy importante para él,
a saber, que es un
MATEMÁTICO

Luego viene el título:
Strena seu de Nive Sexangula,
que quiere decir «Un regalo de año nuevo

en torno a la nieve de seis puntas».

Es un pequeño libro de apenas 24 páginas que muestra cómo Kepler observaba la naturaleza y que sabía interrogarla, haciendo siempre las preguntas acertadas.

IOANNIS KE-
PLERIS. C. MAIEST.
MATHEMATICI
STRENA

Sete

De Nive Sexangula.



Cum Priuilegio S. Cæf. Maiest. ad annos xv.

FRANCOVRTI AD MOENVM,
apud Godefridum Tampach.

Anno M. DC. XI.



AETATIS S
1611

LA PRIMERA OBSERVACIÓN DE JOHANNES KEPLER: **LA DIVERSIDAD**

Cuando se observan los copos, todos parecen ser de una misma familia, aunque bien diferentes. Kepler busca desentrañar esta diversidad inexplicable.

Estas son algunas fotografías modernas:





LA SEGUNDA OBSERVACIÓN DE KEPLER: **SEIS PUNTAS**

Todos los copos tienen seis puntas.
¿Por qué?

Después de todo, algunas flores
tienen cinco pétalos y ciertos
animales tienen ocho patas.



A decir verdad, Kepler no fue el primero en notar que los copos tienen seis puntas, pero pudo no haberlo sabido. En el siglo II de nuestra era, en China, el poeta y filósofo Han Ying ya había hecho la misma observación, pero no se había hecho la pregunta importante:

¿Por qué los copos de nieve tienen seis puntas?

Kepler piensa en los alveolos de los panales de las abejas. Estos están formados por seis lados, *hexágonos*, como dicen los matemáticos.

Se pregunta si los copos de nieve están formados de la misma manera. Recuerda, entonces, un teorema de geometría: *Un círculo de*



radio arbitrario puede ser rodeado exactamente por seis círculos del mismo radio. Una moneda puede ser rodeada por seis otras de la misma forma. Y, si se es suficientemente rico, es posible continuar:

Se ve aparecer así polígonos de seis lados.

Kepler propone, entonces, una solución:

Quizás los copos de nieve están formados por discos minúsculos que se encajan unos contra otros.

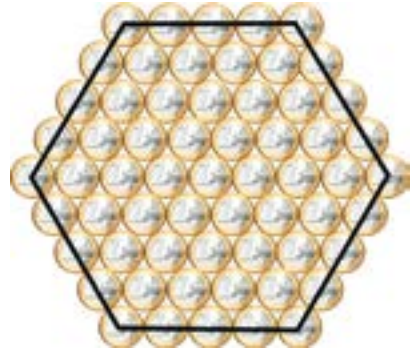
Pero no puede probar su teoría, pues no dispone de ningún instrumento científico. Solo puede observar la naturaleza con sus ojos y su pensamiento. En su época, no se conocían los átomos. Hubo que

esperar casi cuatrocientos años para que se comprendiera que él no estaba equivocado. Hacer las buenas preguntas es una de las cosas más difíciles en ciencia.

Kepler no poseía un microscopio, pero, aunque no lo menciona en su *Strena seu de Nive Sexangula*, posiblemente observó los copos con una lupa. Unos años antes había escrito un libro de óptica: *Astronomia pars Optica*, el cual contiene, en particular,



telescopios. Se trata casi de un libro de matemáticas, organizado en una lista de 141 teoremas. Es muy probable, entonces, que Johannes haya observado los copos con una lupa.



una descripción precisa del funcionamiento del ojo. En 1610 —es decir, el mismo año en que apareció su libro sobre los copos—, supo de la existencia de los telescopios que permiten observar las estrellas.

Entusiasmado como siempre, escribió otro libro de óptica para describir el funcionamiento de los

Kepler observa que, sin importar su forma, todo copo de nieve tiene una *simetría de orden seis*.

Toma un copo y divídelo en seis partes, como un pastel. Pues bien, aunque los copos sean distintos unos de otros, siempre esas seis partes son idénticas. Esto es lo que significa la «simetría»: si se hace rodar el copo en 60 grados (un sexto de vuelta) en torno a su centro, entonces permanece inalterado.

Cuando se piensa en esto parece extraño. Para que las seis puntas del copo permanezcan idénticas a medida que este crece, se necesitaría que, de alguna forma, ellas se comuniquen unas con otras. ¡Qué raro! Kepler incluso se pregunta si los copos no tendrían alguna traza de vida para que exista esta comunicación. No olvidemos que nuestro matemático ve la naturaleza como la obra de Dios. Kepler no podrá explicar su observación de esta simetría.

Hasta el día de hoy, la aparición de simetrías en la naturaleza es un tema muy activo de investigación científica.



OTRA PREGUNTA DE KEPLER: ¿POR QUÉ LOS COPOS SON **PLANOS**?

¡Nadie se había hecho esta pregunta antes que él! Es como un niño que hace preguntas inocentes que sorprenden a los adultos: «Mamá, ¿por qué el cielo es azul?».

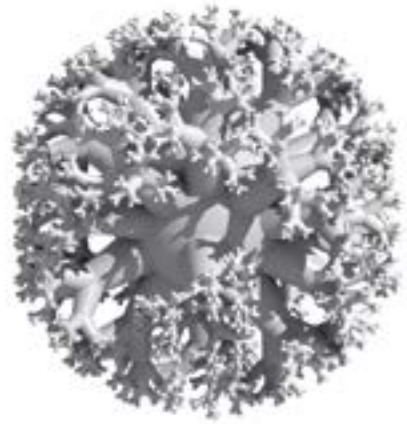
A fin de cuentas, se hubiera podido imaginar que los copos se parecen a los erizos o a cosas más complicadas, como estas:



Pero no: los copos son planos. Kepler piensa, entonces, que los pequeños círculos microscópicos aprisionados unos contra otros son como discos planos, de forma no esférica. Pero ¿por qué? No lo sabe, pero sabe reconocer su ignorancia: es muy modesto.

Continuando con sus reflexiones, se pregunta cómo se hace para apilar esferas en lugar de círculos.

El libro de Kepler prosigue con decenas de lindas preguntas. Por ejemplo: si quieres colocar canicas, naranjas o cualquier tipo de pelota en una gran caja, ¿cómo debe hacerse para hacer entrar la cantidad máxima



posible? Esta pregunta solo fue respondida en 2005, ¡y esto a pesar de que muchas personas intentaron responderla antes!

¿La respuesta? Todos los almaceneros la conocen perfectamente cuando acomodan las naranjas en sus puestos de venta como se muestra a la izquierda.



¿Cuántas pelotas rodean una pelota?



Una pila de naranjas.

¿Por qué estas preguntas son importantes? Hoy sabemos que todo lo que nos rodea está formado por moléculas microscópicas apiñadas unas contra otras. El objetivo de una disciplina científica conocida como «cristalografía» consiste en entender cómo se organizan esas moléculas en el espacio. Como veremos más adelante, casi todo lo que nos rodea está formado por cristales. Muchos físicos consideran que, con su regalo de un copo de nieve de seis puntas para Año Nuevo, Kepler inventó la cristalografía.

Un problema matemático muy difícil.

Toma una pelota, por ejemplo, de ping-pong. ¿Cuántas pelotas idénticas se pueden colocar en torno a esta de modo de que no la toquen? Ya vimos que un círculo puede ser rodeado por otros seis en el plano. ¿Cuántas esferas rodean a una esfera? Esta pregunta es difícil, al punto de que los matemáticos no se pusieron de acuerdo sobre la respuesta durante tres siglos. La solución es conocida desde 1953: se pueden colocar 12 esferas, y no más. Ahora bien, la situación es diferente a lo que ocurre en el plano. Seis discos se organizan perfectamente en torno a un disco, no así doce esferas en torno a una esfera: queda un poco de espacio, pero no lo suficiente para colocar otra.

JOHANNES KEPLER, CURIOSO Y MODESTO

Esta es la última frase de su libro:

«Ahora que golpeé la puerta de la química y que comprendí todo lo que falta por hacer para que podamos recoger esta pregunta, prefiero escuchar a un hombre de una gran perspicacia como la vuestra...».

Después de haber hecho muchas preguntas y propuesto soluciones sin poder demostrarlas, Kepler el curioso señala que ¡serán otros, y no él, quienes van a continuar esta investigación! Kepler el modesto considera que apenas ha golpeado la pleura de la química.

¡Gracias, Johannes Kepler!

De hecho, se necesitarán muchos años para entender la naturaleza química de la nieve. Ya nos referiremos a esto.

**LOS
DIBUJANTES
DE LA
NIEVE**

Johannes Kepler fue un científico excepcional que supo observar, hacer preguntas sobre la nieve y responder algunas de ellas. Durante los siguientes cuatro siglos, nadie intentó responder las preguntas que dejó abiertas, pero muchos completaron las observaciones de Kepler e hicieron ilustraciones cada vez más precisas. Se trata de ilustradores geniales: poco a poco nos acercaremos a un filósofo, un médico, un físico, el fundador de una dinastía, un religioso, un pescador de ballenas, una pareja de artistas y una dama.

RENÉ DESCARTES:
EL FILÓSOFO (1596-1650)



René Descartes es uno de los más grandes filósofos franceses. ¿No se dice, acaso, que los franceses son «cartesianos»?

Descartes es muy conocido por su libro de 1637, *Discurso del Método, para bien conducir la razón y hallar la verdad en las ciencias*. Como lo indica el título, se trata de entender el mundo gracias a la razón más que por la experiencia. Según él, siempre hay que desconfiar de las trampas que nos pueden poner nuestros sentidos. Es célebre por la frase «Cogito ergo sum», que en castellano significa «pienso, luego existo». Desarrolla un método de razonamiento que, en principio, permite explicarlo todo, ¡incluso la existencia de Dios! Justo después de su libro, agrega algunos complementos: «La Óptica, los meteoros, la mecánica y la música, que son ensayos de

este método». Su libro sobre la geometría es muy importante: allí introduce lo que después se llamó *coordenadas cartesianas* del plano, la abscisa y la ordenada (denotadas x e y , respectivamente), que revolucionaron las matemáticas.

El libro *Los meteoros* es muy ambicioso. Esta palabra no es muy utilizada hoy. Antes se usaba para todo lo que sucedía en la atmósfera: los truenos, los destellos, la lluvia, la nieve, el granizo, los arcoiris.

A continuación, un extracto de lo que escribió, traducido desde un francés antiguo:

«... yo diré lo que causa la lluvia, el granizo y la nieve; y no olvidaré que sus partes tienen la forma de pequeñas estrellas de seis puntas perfectamente ensambladas, y el que ellas no hayan sido observadas



René Descartes y
 su «Discurso».

por los antiguos sabios no significa que no sean una de las más raras maravillas de la naturaleza...».

Pero lo que sigue es decepcionante y no cumple con las expectativas. Un discurso complicado, hoy incomprendible: ¡galimatías! Sin hacer experimentos, es difícil entender

lo que nos rodea: el «método» de Descartes no siempre funciona. Sin embargo, es posible observar los dibujos de Descartes, que exhiben las seis puntas. Sus imágenes son mejores que las de Olaus Magnus. No olvidemos que, si bien el libro de Kepler es magnífico, no contiene



ninguna ilustración de un copo de nieve.

Observa bien los copos del lado izquierdo de la figura de la página 32. Increíble: Descartes dibuja copos de ocho puntas, ¡que son imposibles! Cuenta ahora la cantidad de puntas de

los copos marcados con la letra Z en la misma página.

Este tipo de errores se mantendrá por mucho tiempo como muestra esta imagen de un artículo publicado en Estados Unidos en 1789: de los diez copos, ¡seis son imposibles!



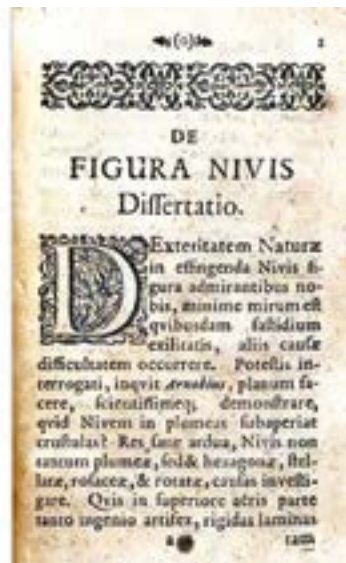
THOMAS BARTHOLIN
EL MÉDICO (1616-1680)



Thomas Bartholin fue un médico y matemático danés nacido en 1616.

En 1659 publicó un libro sorprendente titulado *De nivis usu medico observationes variae*, es decir, *Del uso médico de la nieve, a partir de observaciones*. Su objetivo era establecer el uso de la nieve como

anestésico, lo cual no es del todo una mala idea. Dibujó, entonces, algunos copos. Él redescubrió lo que Kepler había escrito años antes: seis discos pueden tocar un disco dado del mismo tamaño. Es posible observar seis ramificaciones para sus copos, aunque sus dibujos son aún primitivos.



ROBERT HOOKE
EL FÍSICO (1635-1703)



¡Robert Hooke se interesaba en todo! Lamentablemente, no se dispone de ningún retrato suyo, por lo que algunos artistas han tratado de imaginar su apariencia.

En 1662, fue nombrado «demostrador» en la Royal Society, el equivalente de la Academia de Ciencias de muchos países. Su misión era la de presentar diversos experimentos frente a académicos ingleses (a quienes se llamaba *fellows*). Era la época en que se

comenzaban a producir microscopios capaces de agrandar la visión de las cosas hasta treinta veces. Hooke se pasaba el tiempo observando todo tipo de cosas: hormigas, hojas y, por supuesto, copos de nieve. Estos son algunos de sus dibujos.

Hay quienes dicen que él no observó estos copos, sino que copió las imágenes de Thomas Bartholin. Quizás sea verdad, pues las ilustraciones se parecen muchísimo.



En otros dibujos hechos con tinta, se puede apreciar que Hooke usó un compás y que, además, dobló el papel a fin de respetar las simetrías. De cierta manera, lo que dibujaba era lo que pensaba que debía ser

un copo, no lo que observaba. Esto es muy interesante: sospechaba que, antes de caer, los copos tenían formas perfectas en las nubes, pero que se deformaban con la caída.





JEAN-DOMINIQUE CASSINI

EL FUNDADOR DE UNA DINASTÍA (1625-1712)



Este sabio forma parte de una dinastía: la de los Cassini. Hay tantas celebridades en esta familia que se les designa por un número, como a los reyes.

El nuestro es Jean-Dominique, denominado Cassini primero, quien,

en 1692, dibujó lo siguiente en la Academia de Ciencias.

Es un hermoso dibujo, mucho más preciso que los de sus predecesores, aunque solo sea una descripción.



JOANNES FLORENTIUS MARTINET
EL RELIGIOSO (1729-1795)



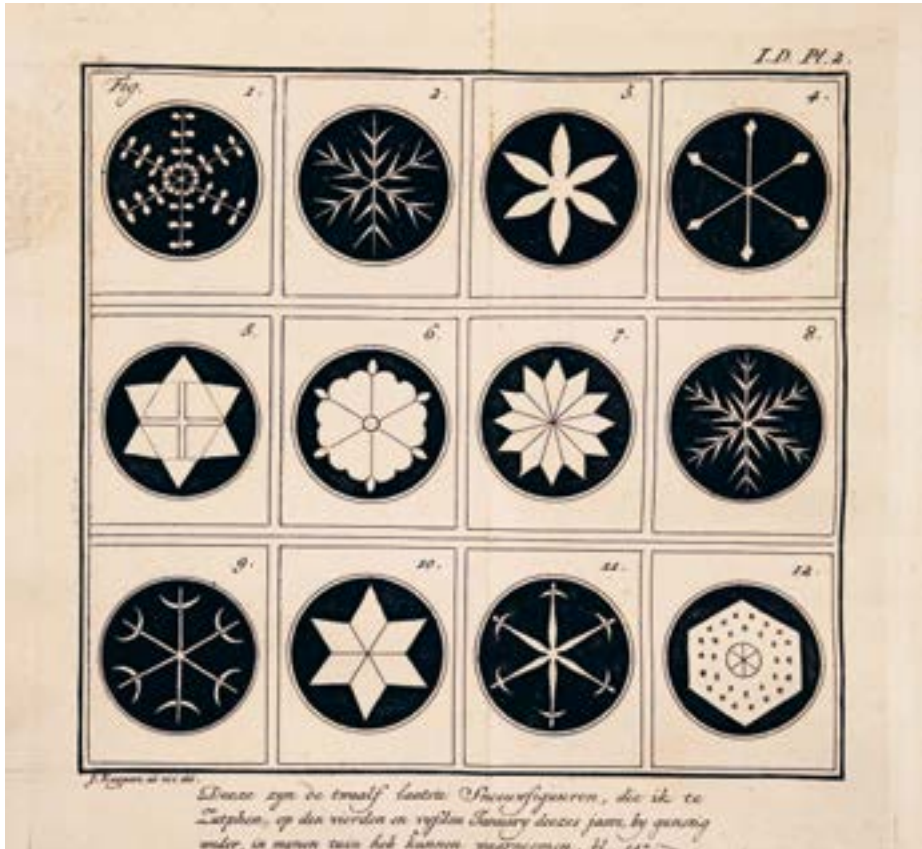
Pasemos al siglo XVIII, el llamado «Siglo de las Luces», en que la ciencia experimental realmente explotó. Joannes Florentius Martinet fue un religioso holandés que escribió muchos libros para niños.

No fue realmente un científico ni representa su época: su objetivo era mostrar la grandeza de Dios a través

de la observación de la naturaleza, un poco como Kepler, pero ciento cincuenta años después.

En 1777 publicó un libro en holandés con el sorprendente título *Katechismus der Natuur*, traducido como *Pequeño catecismo de la naturaleza*, el cual estaba destinado a los niños.





PIE DE FOTO Esto es un texto simulado

Este libro reagrupa las preguntas hechas por un niño y las respuestas de su profesor. A continuación, un extracto:

¿Cuál es el meteoro más maravilloso?

Es la nieve, porque no es otra cosa que agua a la cual Dios dio otra forma. Ella es muy blanca y muy

ligera; a menudo viene en figuras muy hermosas, fáciles de distinguir.

¿Usted las ha visto?

Solo vi unas pocas muy bellas, pero he visto quinientas otras muy diferentes, lo cual testifica de la manera más gloriosa la fuerza todopoderosa de Dios.

¿Para qué fin nos entrega Dios la nieve?

Entre otras cosas, para purificar el aire, para mojar los granos, para servir de cubierta cálida y ligera contra el rigor del frío intenso (es por esto que se dice que Dios nos da la nieve como en copos de lana).

¿Y para qué más?

Para impedir que la helada penetre demasiado en la tierra y la enfríe, para fertilizarla, para aclarar y hacer menos sombríos los días de invierno. En esto, se demuestra tanto la bondad de Dios como su sabiduría.

Claramente, Martinet era más religioso que científico. Incluso quienes creen hoy en Dios no explican el mundo de este modo. Pero Martinet dibujaba bien. En su Catecismo hay hermosas ilustraciones de copos de nieve.

WILLIAM SCORESBY

EL PESCADOR DE BALLENAS (1789-1857)



Pasemos al siglo XIX. William Scoresby era explorador del Ártico, científico y cazador de ballenas. En 1820, publicó un libro titulado *An account of the Arctic Regions and Northern Whale Fishery* (*Una descripción de la región del Ártico y de la caza de la ballena*), en el que se encuentran numerosos dibujos de copos de nieve.

Más adelante, Scoresby se hizo religioso y obtuvo un doctorado en Teología, en 1839. Un cráter de la luna lleva su nombre, así como una pequeña isla de seis kilómetros cuadrados al norte de Noruega. Por supuesto, ¡la isla está bajo hielo y no tiene habitantes!



CECILIA Y JAMES GLAISHER
UNA PAREJA DE ARTISTAS



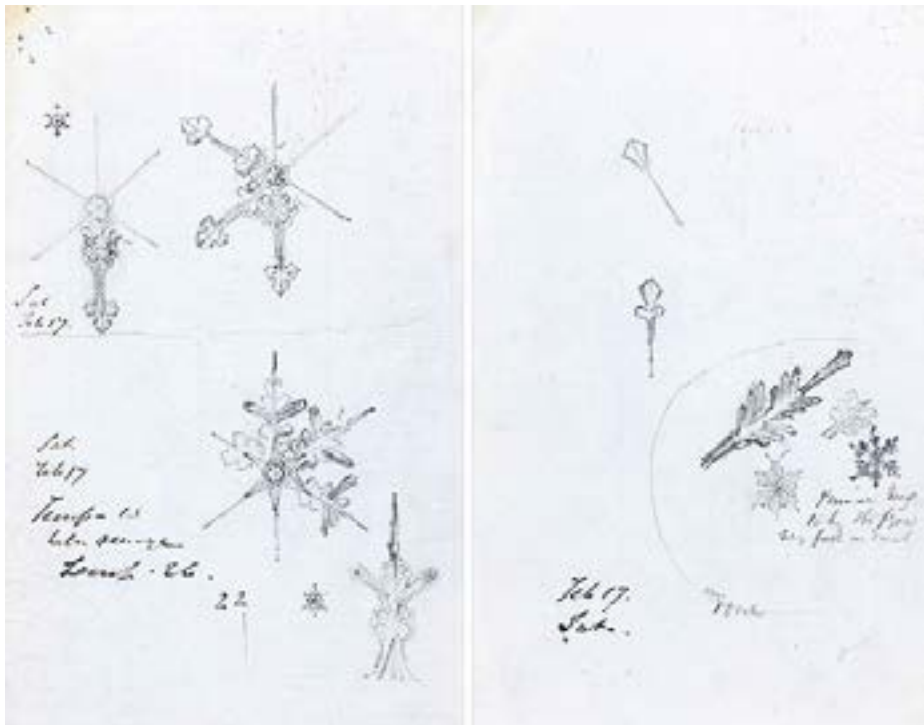
Cecilia Glaisher (1828-1892) nació en Inglaterra en una época en que las mujeres prácticamente no tenían ningún acceso a la enseñanza científica y solo podían excepcionalmente ser reconocidas como científicas. Basta con ver cómo se vestían para percibir la rigidez de las costumbres. Sin embargo, Cecilia era la hija de un astrónomo y es probable que se haya desenvuelto en un medio científico. Contrajo matrimonio en 1843, es decir, a los quince años de edad, con James Glaisher (1809-1902), quien, para esa fecha, tenía 34 años. Él era un científico reconocido y, a lo largo de su vida, fue presidente de las sociedades inglesas de meteorología, de microscopía y de fotografía. Cecilia era, ante todo, una artista que alimentaba su arte de la observación de la naturaleza. Por ejemplo, tomó muchas fotografías



de helechos. Para los copos de nieve, la situación fue diferente: observaba a través del vidrio los copos que se posaban en la ventana (algo bien confortable, pues evita el frío). Usaba lupas potentes para distinguir los detalles y luego dibujaba lo que veía. Por lo tanto, sus imágenes no son fotografías, especialmente porque ella no dudaba en «mejorar» lo que veía —un poco como hacía Hooke— para que las imágenes fueran más bellas y más simétricas.

Se puede pensar que Cecilia hizo los dibujos con su marido James. Quizás. Sin embargo, una cosa es cierta: estas imágenes fueron publicadas en varios artículos, entre ellos, «On snow and snow crystals» («Sobre la nieve y los copos de nieve»), firmado por James, quien al parecer «olvidó» mencionar que su esposa lo había ayudado...

Es un placer ver el trabajo de Cecilia. Primeramente, ella dibuja lo que ve, por ejemplo:



Luego, «idealiza», es decir, deja correr su imaginación para que todo sea más bello y regular, por ejemplo:

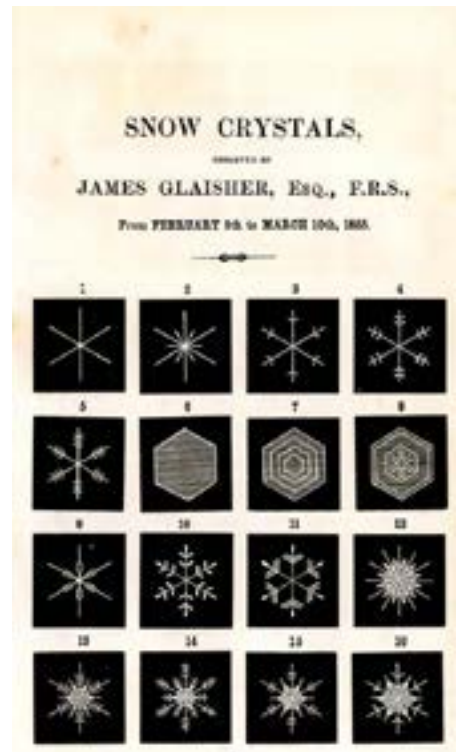


Finalmente no duda en pintar colores que no tienen mucho que ver con la realidad.



¿Es esto ciencia o arte?

Tiempo después, en 1872, fue publicado un artículo titulado «Snow crystals applied to design» («Copos de nieve aplicados al diseño»). ¿Su autor? James Glaisher. Por supuesto, ¡olvidó nuevamente citar a su esposa!



PIE DE FOTO Esto es un texto simulado

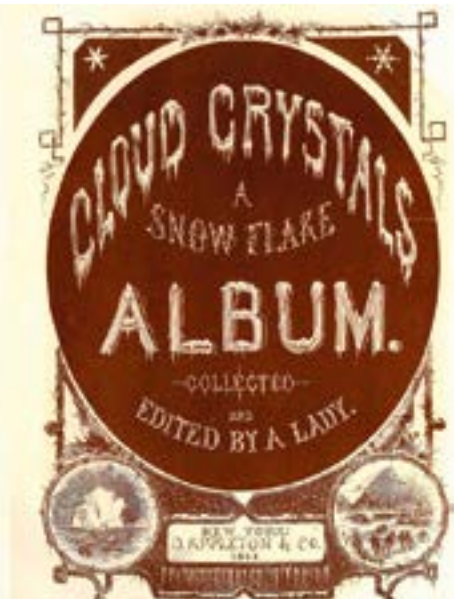
FRANCES CHICKERING

UNA DAMA

¡Otra artista! Y nuevamente en este siglo XIX en el que las mujeres tuvieron tantos problemas para ser reconocidas como científicas profesionales.

Frances Chickering observaba los copos de nieve sobre la repisa de la ventana y los dibujaba inmediatamente en una hoja de papel, para luego cortarlos con tijeras. No sospechaba entonces que

doblar y cortar papel para fabricar copos iba a volverse un pasatiempo para los niños en época navideña. En 1883 publicó un libro que contenía sus reproducciones de copos en papel y algunos poemas sobre el invierno. Para evitar que su nombre apareciera en la portada, la autora aparecía mencionada apenas como «A lady» («Una dama»).



WILSON BENTLEY:
EL COPO DE NIEVE (1865-1931)



Nuestro nuevo héroe se llama Wilson Bentley. Nació en 1865 en una granja de Vermont, un estado de los Estados Unidos de América donde nieva frecuentemente. No era un patriota, como Olaus Magnus; ni científico, como Johannes Kepler; ni dibujante. Simplemente, era un amante de la nieve. Sus amigos lo llamaban *snowflake*, que significa «copo de nieve» en inglés.

Desde muy joven se sintió fascinado por la nieve y buscó observarla de cerca. Más tarde explicaría que en su casa todo el mundo detestaba el invierno —que en su región era especialmente frío—, pero él, muy por el contrario, adoraba dicha estación. A los quince años trató de dibujar los copos de nieve tras observarlos con un microscopio que le había regalado su mamá. Sin embargo, fracasó en su intento, pues los copos se disolvían

a medida que los iba bosquejando. Decidió, entonces, fotografiarlos acoplado una cámara fotográfica al microscopio. No era fácil en esa época, las cámaras eran muy grandes y se requería de mucho tiempo de exposición para obtener fotografías razonables. Tuvo que hacer muchos ensayos antes de obtener su primera fotografía de un copo de nieve el 15 de enero de 1885, apenas unos días antes de su vigésimo cumpleaños.

A decir verdad, él no fue el primero en lograrlo, pero la calidad de sus imágenes sobrepasa ampliamente la de las fotografías de sus predecesores.

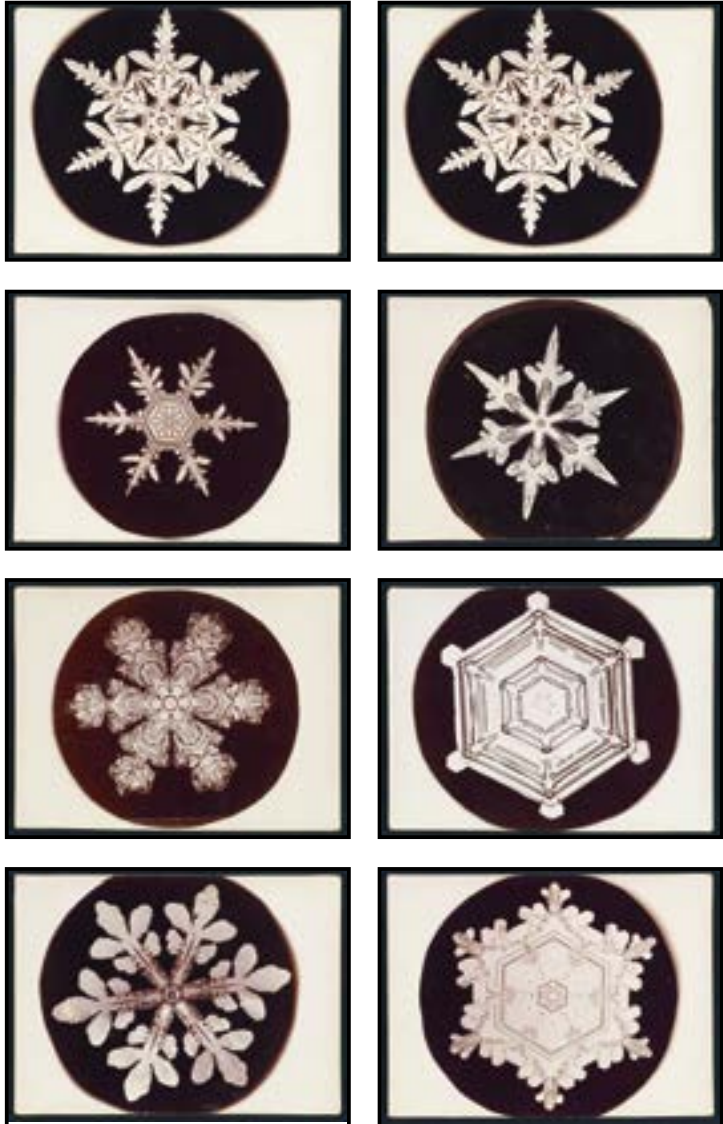
Bentley fue poco a poco perfeccionando sus métodos y logró captar más de mil fotografías magníficas. Aquí se muestran solo algunas.

Incluso al día de hoy, sus imágenes están entre las más hermosas

alguna vez realizadas. Bentley era, ante todo, un artista, y no estaba muy interesado en la ciencia. Solía decir que los copos son «pequeños

milagros de belleza», e incluso los llamaba «flores de hielo».

Al parecer, él retocaba sus fotografías para que fueran aún más bellas, algo que un científico no



debería hacer jamás: no hay que tratar de engañar a la naturaleza. Publicó varios libros con sus imágenes, los cuales tuvieron un inmenso suceso.

Nunca antes el público había visto los copos de tan cerca.

En 1931, salió de su granja para caminar 10 kilómetros bajo la nieve.





Su cuerpo se enfrió demasiado y se enfermó de una neumonía, de la cual murió. Así, ¡la nieve fue el centro de su existencia desde su infancia hasta su muerte!

Wilson Bentley quería mucho a los niños. Se cuenta que organizaba sesiones de presentación de sus imágenes en su granja proyectándolas sobre una sábana como pantalla. Si hoy los copos de

nieve son un símbolo de Navidad, es a él a quien se lo debemos.

Gracias, Wilson!

LOS ÁTOMOS Y LAS MOLÉCULAS

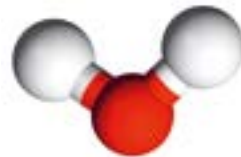
Todo lo que nos rodea está formado de elementos extremadamente pequeños, llamados «átomos». Esta palabra proviene de otra de origen griego que significa «sin división». Hubo que esperar mucho tiempo para que los científicos se pusieran de acuerdo acerca de su existencia. Hoy se conoce una lista de todo tipo de átomos. Hay un centenar, y se los clasifica desde el más ligero hasta el más pesado: el hidrógeno, el helio, el litio, etc. Entre los más hallados en la naturaleza figuran el carbono, el oxígeno y el hidrógeno. Cada átomo es denotado por un símbolo, en general, la inicial de su nombre: C

por carbono, O por oxígeno, H por hidrógeno. Ciertos átomos tienen tendencia a asociarse con otros para formar lo que se conoce como moléculas, que pueden ser pequeñas o grandes.

Por ejemplo, un átomo de carbono C se une con cuatro de hidrógeno H para formar una molécula de metano, que se denota CH_4 , el que a menudo es utilizado en nuestras cocinas a gas. Una molécula de agua está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, H_2O , y tiene una forma parecida a la de la letra V.



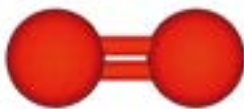
Una molécula
de metano CH_4



Una molécula
de agua H_2O



Es como un juego de legos. Los átomos son como piezas que tienen pequeños enganches que permiten armar distintas formas. La molécula de etanol, que a menudo se denomina simplemente alcohol, se parece a un perrito: 2 C(arbono), 6 H(idrógeno) y un O(xígeno). La molécula de la aspirina, uno de los medicamentos más consumidos en el mundo, es $C_9H_8O_4$.



El aire que respiramos es una mezcla de oxígeno y nitrógeno. Pero atención: la molécula de oxígeno O_2 está formada por dos átomos. Por ello, hoy en día, se habla más bien de dioxígeno u oxígeno molecular. Lo mismo ocurre con el nitrógeno: dos átomos forman una molécula de nitrógeno molecular N_2 .

El aire es un gas, lo cual significa que está formado por un número gigantesco de moléculas que van en todas direcciones. Cada molécula sigue un movimiento muy rápido que no depende de las otras. Puede suceder que dos moléculas colisionen, pero esto es muy raro. En el aire que nos rodea, también está presente el famoso dióxido de carbono CO_2 , que es en gran parte responsable del calentamiento global.



Todo esto era bien conocido por los físicos y químicos de principios del siglo xx. Los químicos incluso pueden crear nuevas moléculas que no existen en la naturaleza, como el fulereno de Buckminster, cuya molécula tiene 60 átomos de carbono. A veces se lo llama futboleno, pues se parece a un balón de fútbol.

LOS CRISTALES

Muchos cuerpos sólidos que nos rodean son cristales. Los átomos que los constituyen se unen unos con otros de manera muy sólida, como un único bloque. Es como si todos esos átomos formaran una sola molécula gigante.

Considera el cristal más hermoso, el diamante. Está completamente constituido de átomos de carbono, ¡al igual que el carbón!

Es una construcción inmensa formada por miles y miles de átomos de carbono ligados entre sí.

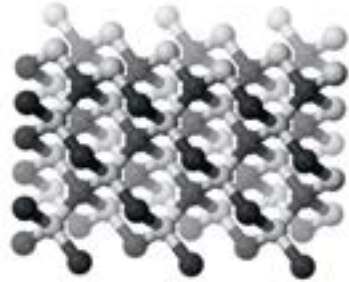
EL DIAMANTE HOPE: uno de los más grandes y bellos.



Cada átomo se enlaza con otros cuatro, como se muestra en la imagen de la página siguiente. Obviamente, solo se pudo dibujar aquí una cantidad pequeña de bolas. Para tener una visión más clara, es posible imaginarse que la imagen continúa indefinidamente en todas direcciones para configurar una maravilla de la geometría. Todos los átomos de carbono son iguales, pero han sido coloreados de negro, gris oscuro y gris claro para comprender mejor la estructura.

Hay otros cristales hechos solo con carbono que cuestan mucho más barato, como el grafito que tienen las minas de los lápices. En este, los átomos de carbono se unen de una manera diferente.

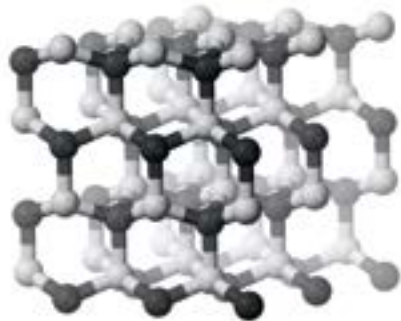
Siempre con carbono, se puede hacer un tercer tipo de cristal, uno que aparece raramente sobre la Tierra, pero que se hace presente en algunos meteoritos: la lonsdaleíta. Su nombre fue escogido para honrar a Kathleen Lonsdale, un químico británico especialista en cristalografía.



Un cristal de diamante.



Un cristal de grafito.



Un cristal de lonsdaleita.

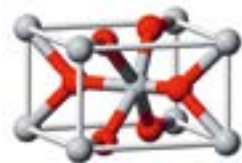
Con otros átomos se pueden hacer una cantidad increíble de cristales. Estos son algunos:



Un cristal de fluorita.



Un cristal de rutilo.



¿Pero cómo se pudo saber que los átomos se organizan como se muestra en las imágenes si son tan pequeños que no se los puede ver al microscopio?

LOS RAYOS X

Hacia fines del siglo XIX, los físicos habían descubierto una radiación que no entendían. Era tan rara que Wilhelm Roentgen decidió llamarla X, pues esta es la letra que se usa generalmente en matemáticas para denotar una incógnita. No se sabía si se trataba de ondas o de pequeñas partículas. Se sabía que atraviesan muchas cosas, entre otras, el cuerpo humano. Por ejemplo, si se metía una mano entre una placa fotográfica y una fuente de rayos X, se podían ver los huesos. Así, se podía observar el interior del cuerpo humano. En síntesis, no se sabía qué eran esos famosos rayos X, pero era claro que podían ayudar a la medicina.

En 1899, el físico Max von Laue termina por entender: esos rayos son ondas (como las olas), no partículas (como pequeños trozos de materia).



UNA DE LAS PRIMERAS
RADIOGRAFÍAS TOMADAS
POR ROENTGEN: se ven
los huesos y el anillo. Si
crees que es la mano de
Roentgen, te equivocas:
¡es la de su esposa!

En esta fotografía se aprecian las olas que llegan desde lejos y entran en una linda ensenada. La ola la llena completamente. Laue hizo lo mismo con los rayos X: los hizo pasar por un pequeño orificio y luego constató que, tras este, se dispersan en todas direcciones. Si hubiesen sido partículas, hubieran continuado en línea recta sin desparramarse. Gracias

a este descubrimiento obtuvo el Premio Nobel en 1914.

Se trataba, entonces, de una onda. Hoy se sabe mucho sobre estas ondas. Son de la misma naturaleza que la luz, las ondas de radio, las microondas o las ondas de wifi, y forman parte de lo que se conoce como ondas electromagnéticas.

.....
EL DIAMANTE HOPE: uno
de los más grandes y
bellos.
.....



**WILLIAM HENRY BRAGG &
WILLIAM LAWRENCE BRAGG**



William Henry Bragg nació en Inglaterra en 1862, tres años antes que Wilson Bentley. Tras terminar sus estudios de matemáticas, fue nombrado profesor en Australia, donde enseñó matemáticas y física. Volvió a Inglaterra en 1908 para dictar clases allí y continuar sus investigaciones en física. Por esa época, los rayos X lo intrigaban enormemente: pensaba que se trataban de partículas.

Su hijo, William Lawrence Bragg, nació en Australia en 1890. A los cinco años se quebró un brazo, y su padre aprovechó para tomarle una radiografía con rayos X: era la primera vez que algo así se hacía en Australia. Tras volver con su familia a Inglaterra, hizo estudios brillantes,



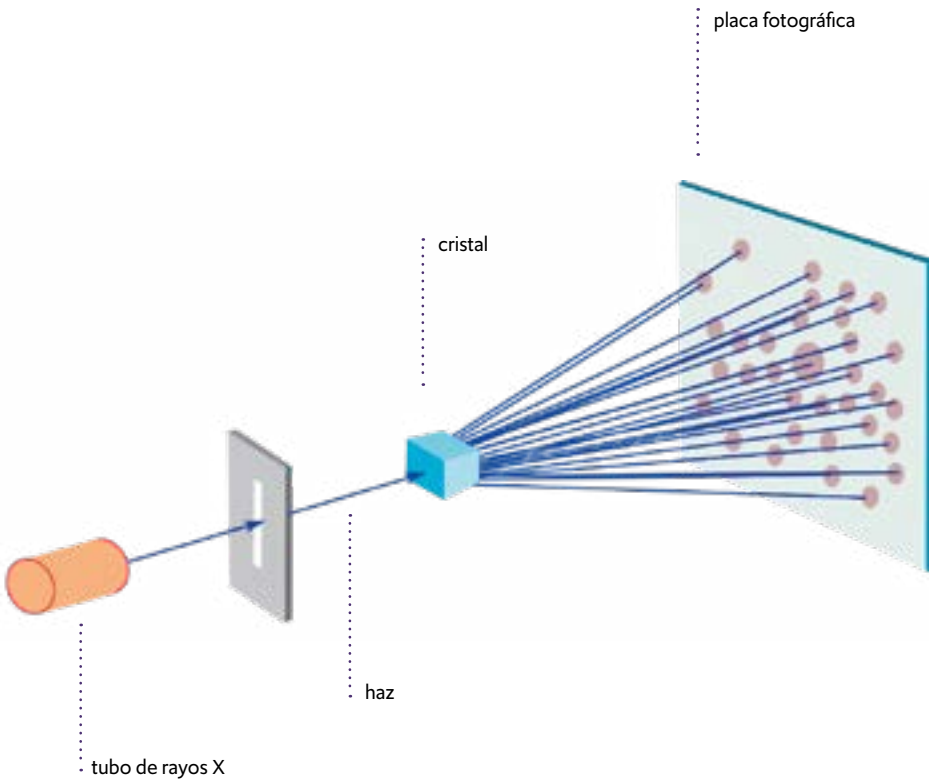
interesándose particularmente en la física.

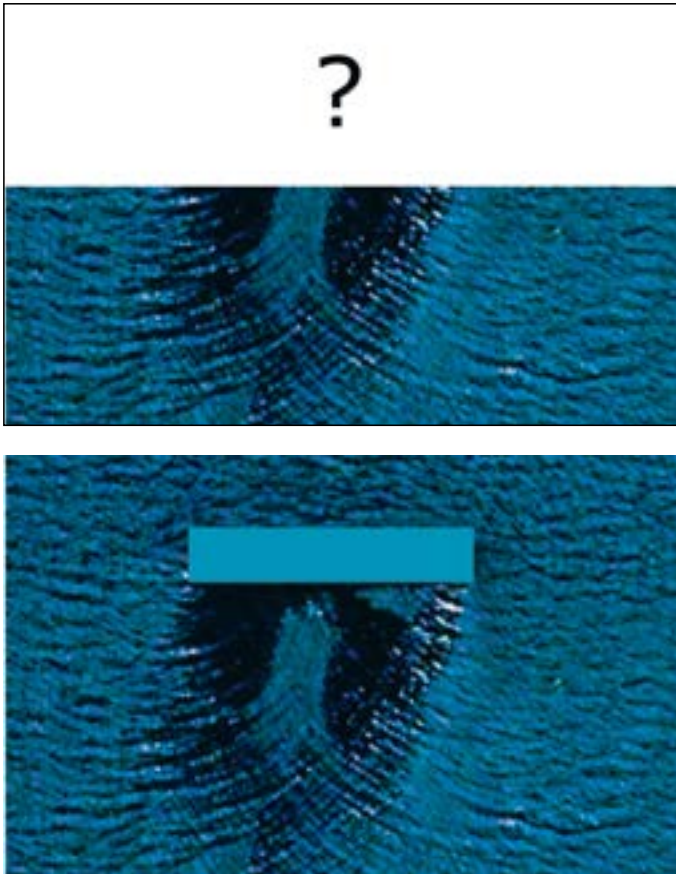
Un día, mientras paseaba sobre el borde de un río, le vino una gran idea: si los rayos X son ondas, entonces, al hacerlos pasar por un cristal, los átomos serán un obstáculo. Las ondas se modificarán por cada átomo del cristal, así como las olas cambian cuando pasa un barco, por ejemplo. Así, al traspasar el cristal, los rayos X debieran generar un sistema complejo de pequeñas olas. Colocándolo frente a una placa fotográfica y observando cómo los rayos X son perturbados por los átomos, probablemente se podrá determinar la disposición de los átomos en el cristal.

Por ejemplo, si se observa solo la imagen superior de la página derecha

que representa el mar, se puede adivinar la figura completa. Las olas vienen desde la parte superior y encuentran un obstáculo de forma rectangular. Es posible que se pueda incluso calcular la longitud del objeto sin necesidad de verlo (imagen inferior de la página derecha).

Esa fue la idea de Lawrence: lanzar rayos X hacia un cristal y mirar lo que ocurre sobre una pantalla puesta detrás, con la esperanza de descubrir el interior del cristal.



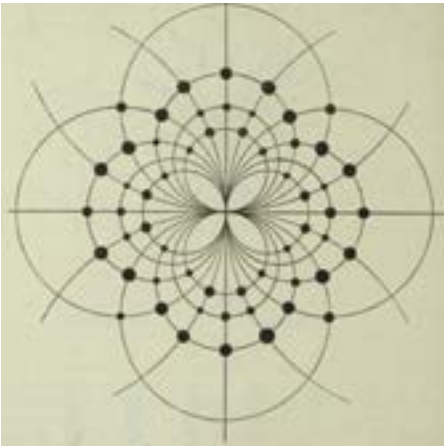


Lawrence explicó su idea a su padre, quien inventó un aparato para llevarla a la práctica. En la imagen de abajo se aprecian seis ejemplos imaginarios. Si se coloca un único átomo frente al haz de rayos X, como en el cuadro de la izquierda

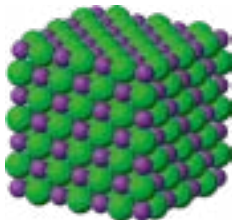
arriba, entonces se observa un disco blanco encerrado por un anillo gris. Si se colocan dos átomos, la imagen dependerá de la distancia entre ellos, tal como se aprecia en los cuadros siguientes. Si se colocan más átomos, la imagen es más complicada.



Sal de cocina.



Finalmente, así es como están conformados los granos de sal.



SAL DE COCINA:
sodio y cloro (NaCl).

Se llama «ecuación de Bragg» a una especie de fórmula que permite determinar lo que se ve en una placa fotográfica a partir de la posición de los átomos. El arte del físico consiste, entonces, en resolver lo que se conoce como el «problema inverso»: adivinar la imagen de arriba en función de la de abajo.

¡Y funciona! Rápidamente, padre e hijo lograron estudiar muchos cristales mediante este método y determinaron la forma en que sus átomos están dispuestos. ¡Fue un gran suceso!

Por ejemplo, esto es lo que se ve en una placa instalada detrás de un cristal de cloruro de sodio. Se trata simplemente de sal de cocina, de la que se conocen muy bien los pequeños cristales en forma de cubo, los granos de sal.

Usando el método de la familia Bragg, se puede descubrir cómo se organizan los átomos. Partiendo de una hipótesis sobre su disposición, se puede prever mediante un cálculo cuál será la imagen que se proyectará en la pantalla, para luego confirmar si es efectivamente la que se ve y, de paso, confirmar la hipótesis. Se trata de un verdadero problema de geometría. Esta es la figura del primer artículo de Lawrence en la que buscaba entender la estructura de la sal.

Las bolitas más pequeñas representan los átomos de sodio y las más grandes, las de cloro. Este es un cristal de sal de cerca de 15 cm de lado, tal cual fue extraído de una mina: ¡un enorme grano de sal!

Se puede apreciar que el bloque consta de trozos cúbicos, lo cual no es sorprendente pues, a nivel atómico, tanto el sodio como el cloro se organizan de esta manera. Antes de los métodos de los Bragg, la cristalografía era casi una ciencia de adivinación: se observaban grandes cristales y se intentaba adivinar cómo se organizan los átomos a nivel microscópico. Con los rayos X es como si se fotografiaran estos átomos: es inmensamente más eficaz.

Bragg padre presentó sus resultados en un coloquio y un artículo en el que, lamentablemente, no se mencionaba correctamente a su hijo. Decía simplemente que su hijo lo había ayudado, sin citar su nombre. ¡Lo menos que se puede decir de esto es que no es muy paternal! Al parecer, su hijo se sintió ofendido por el comportamiento de su padre.



Un bloque de sal.



ESTA ES UNA OBRA DE ARTE en Palermo que representa una molécula de agua. La artista, Giovanna Orlacchio, la llamó *The Beginning*, es decir, *El Comienzo*. Tiene razón: la vida empezó en el agua.

MOLÉCULAS DE AGUA

La molécula de agua es una de las más importantes no solo en física y química, sino también en biología. El agua juega un rol mayor en los intercambios de calor sobre la tierra y, por tanto, en el clima. Piensa en el agua de los océanos, en la lluvia o el vapor de agua en las nubes, en el hielo del Ártico y la Antártica, y ciertamente en los copos de nieve, el tema de este libro. El agua está por todos lados en torno nuestro. Por esta razón, es muy útil entender su naturaleza. Cuando se calienta el agua en una olla, esta hierve al alcanzar la temperatura de 100 °C y se transforma en vapor de agua. Esto, a condición de que la olla esté a nivel del mar, pues las cosas son diferentes en lo alto de una montaña, como el Mont Blanc, por ejemplo, donde el agua hierve a 84 °C. Allí, la presión atmosférica es menor, por lo que opone menos resistencia al aumento de volumen que representa la transformación de agua en vapor.

Si, por el contrario, se coloca agua en un congelador, esta se transforma en hielo desde que alcanza los 0 °C.

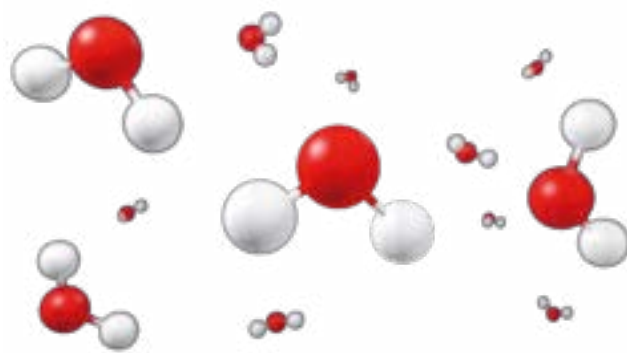
No es por azar que el agua se congele a 0 °C y hierva a 100 °C a nivel del mar: la escala de temperaturas establecida por Celsius en 1742 fue precisamente definida a partir de temperaturas de congelamiento y ebullición en condiciones de presión atmosférica «normales» (es decir, a nivel medio del mar). Existen, sin embargo, otras escalas para medir la temperatura.

El agua puede presentarse en tres formas: vapor de agua, agua líquida y hielo. Examinemos rápidamente estos tres estados del agua.

El vapor de agua

Ya vimos que las moléculas de agua H₂O contienen dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, y tienen la forma de una V. El vapor de agua es un gas, como el aire, y está formado por un número increíblemente grande de estas moléculas que danzan en todas direcciones, ignorándose unas con otras. Es como un gran baile un poco extraño, pues los bailarines no se miran.

Por supuesto, cuando se hace hervir el agua, el vapor que se produce se mezcla con el aire que ya está presente en el lugar y que

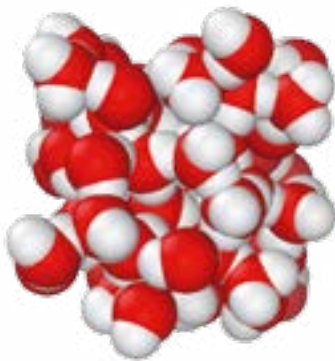


El vapor de agua.

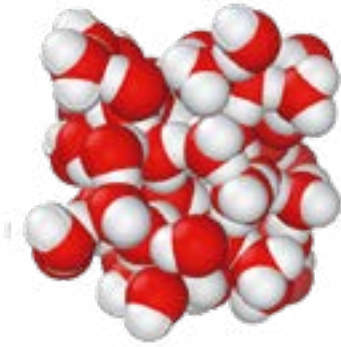
contiene por sobre todo oxígeno y nitrógeno moleculares, por lo que hay una mezcla de moléculas O_2 , N_2 y H_2O .

El agua líquida

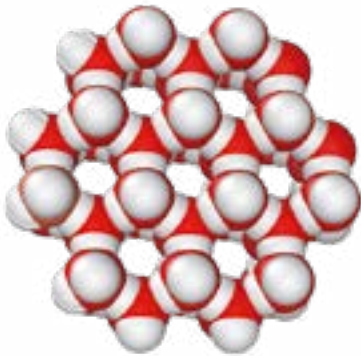
Si se enfría el vapor de agua, se transforma en agua líquida: se dice que ella se condensa. Esto se ve a menudo, por ejemplo, cuando los vidrios están cubiertos de vaho: se trata de pequeñas gotas de agua producidas por la condensación del vapor en contacto con la superficie fría del vidrio. Este es también el fenómeno que se aprecia con el rocío de la mañana, cuando la hierba se recubre de pequeñas gotas. Es el fenómeno inverso de la ebullición, en el cual lo líquido se transforma en vapor por efecto del calor.



Agua líquida.



AGUA LÍQUIDA,
desordenada, como
un paquete de bolitas



AGUA SÓLIDA, es decir,
hielo, bien ordenada.

¿Qué ocurre en la condensación?

Cuando la temperatura baja, las moléculas se mueven cada vez más lento y se aproximan unas a otras. Al apretarse entre ellas, dan lugar a agua líquida.

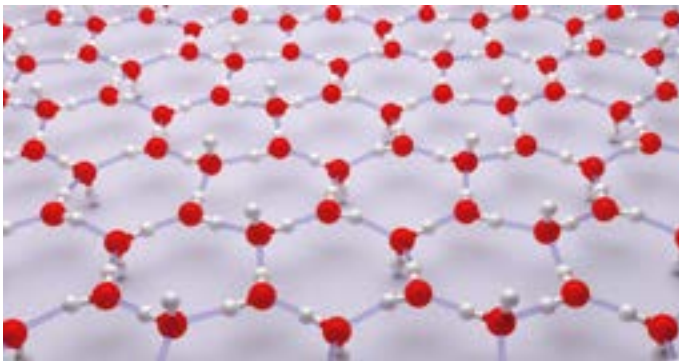
Juntas, parecen un saco de bolitas: se tocan, pero no están realmente pegadas. Se las puede traspasar a otro saco, como cuando se vierte agua de una botella a un vaso.

Atención: los dibujos que representan átomos y moléculas son solo ilustraciones que intentan dar una idea de la realidad. Los átomos no son bolitas, no tienen color, las uniones entre ellos no son ganchos, etc. No hay que olvidar que estos átomos son extremadamente pequeños. Peor aún: si bien durante mucho tiempo se pensó que no se los podía dividir en elementos más pequeños, finalmente se entendió que están formados por partes aún más pequeñas: protones, neutrones y electrones, durante mucho tiempo consideradas indescomponibles, hasta que se entendió que estas también están formadas por elementos más pequeños llamados quarks. ¿Habría algún final en esta carrera hacia lo infinitamente pequeño?

El hielo

Finalmente, llegamos a nuestro querido objeto de estudio: los copos

El ensamble de las moléculas propuesto por William Henry Bragg es magnífico. Los átomos de oxígeno se organizan en capas, como las páginas de un libro. En cada capa forman hexágonos, como los de un panal de abejas.

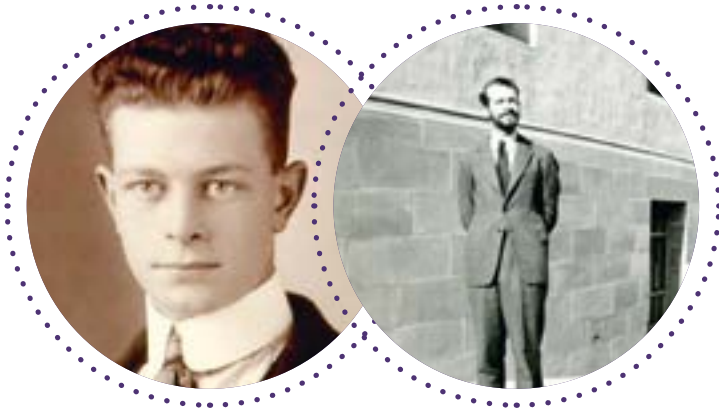


LAS MOLÉCULAS de agua se disponen en hexágonos.

Cada átomo de oxígeno se conecta a cuatro átomos de hidrógeno. Con dos de ellos forma una típica molécula de H_2O . Es una unión muy sólida, que los químicos llaman *covalente*. Sin embargo, los otros dos enlaces son mucho más débiles y de naturaleza eléctrica: son *enlaces de hidrógeno*, muy importantes en las moléculas biológicas.

¿No es esto magnífico?

LINUS PAULING
Y EL HIELO (1901-1994)



Linus Pauling a los
17 años.

Linus Pauling a los
35 años.

Linus Pauling nació en Estados Unidos en 1901 y fue uno de los más importantes físicos, biólogos y bioquímicos del siglo xx. Si bien resulta imposible enumerar todas sus contribuciones a la ciencia, es posible mencionar sus dos temas principales de investigación.

Primeramente, contribuyó a la comprensión de los enlaces químicos. Hasta aquí hemos mencionado que ciertos átomos pueden unirse entre sí, pero no hemos descrito la naturaleza de estos «ganchos». Fue gracias a Linus Pauling que comprendemos cómo funcionan estas uniones entre los átomos. Por esto fue galardonado con el Premio Nobel de Química en 1954.

Además, se puede mencionar aquello en que casi tuvo éxito... pero no completamente. Incluso

los más grandes no lo consiguen todo. Trabajó mucho en tratar de determinar la estructura del ADN, la molécula principal del mundo vivo. No lo consiguió, pero sus trabajos preliminares permitieron a James Watson, Francis Crick y Rosalind Franklin descubrir esta estructura, la famosa «doble hélice», en 1954. A menudo se olvida el rol que jugó Rosalind Franklin en este descubrimiento (¿quizás porque se trata de una mujer?). Ella usaba el método de los rayos X. Lamentablemente, no pudo recibir el Premio Nobel de Medicina en 1962 con Crick y Watson, pues ya había fallecido.

Durante los años posteriores, Watson se esmeró en dar a entender que los trabajos de Rosalind no le fueron útiles para



Rosalind Franklin en 1955.

entender la estructura del ADN. Afortunadamente, Francis Crick y Linus Pauling se encargaron de defender la memoria de Rosalind Franklin.

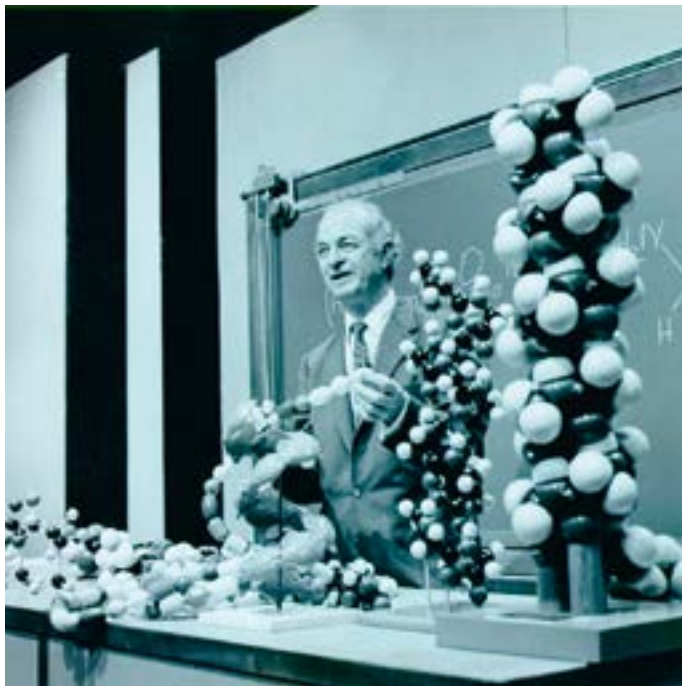
Volvamos a nuestro tema: el hielo

Ya vimos que, en 1922, William Henry Bragg propuso una descripción de la repartición de los átomos en un cristal de hielo. Pero, como él mismo decía, todo esto dependía de «suposiciones», y no estaba del todo confirmado. Además, solo había determinado la posición de

los átomos de oxígeno, no los de hidrógeno. En 1935, Linus Pauling resolvió el problema. Gracias a él entendemos el hielo.

Más tarde, Linus Pauling se involucró en la lucha por la paz. Hay que entender que los físicos de esta generación vivieron la Segunda Guerra Mundial. Ellos estuvieron en el centro del debate sobre las bombas atómicas: ¿era realmente necesario fabricar esas bombas que mataron tantos civiles japoneses en Hiroshima y Nagasaki en 1945?

La pregunta es muy difícil y cada quien puede tener su opinión. Tras la guerra, muchos físicos sintieron



Linus Pauling en 1960.

remordimientos y decidieron orientar su investigación hacia la biología. Después de millones de muertos, era necesario abocarse al estudio de la vida. Esta es una de las razones del desarrollo de la biología molecular después de la guerra. Linus Pauling ilustra perfectamente este movimiento. En 1962 obtuvo un nuevo Premio Nobel, esta vez de la Paz, por su campaña contra los ensayos nucleares.

Linus Pauling es también una de las primeras personas en tomar conciencia de los problemas ligados a la contaminación de las ciudades. Y bueno —nadie es perfecto—, debemos mencionar también que,

hacia el fin de su vida, se lanzó en una aventura que resultó ser un error rotundo. Estaba convencido de que se podía curar el cáncer con vitaminas.

Se equivocó.
Como se decía antiguamente,
«Errare humanum est»
(errar es humano).

Sabemos ahora cómo está hecho el hielo, pero nos falta saber cómo están hechos los copos de nieve.

UKICHIRO NAKAYA:
EL EXPERIMENTADOR (1900-1962)



Ukichiro Nakaya es muy conocido por los escolares en Japón. Él dedicó su vida a la nieve. Fue la primera persona que logró fabricar copos de nieve artificiales.

En 1837, un vendedor de telas japonés llamado Suzuki Bokushi había escrito un hermoso libro titulado *Hokuetsu Seppu*, que significa *Historias de nieve del norte de la provincia de Etsu*, la región en que nació Ukichiro Nakaya en 1900. Muy probablemente, ese libro lo inspiró durante su juventud.



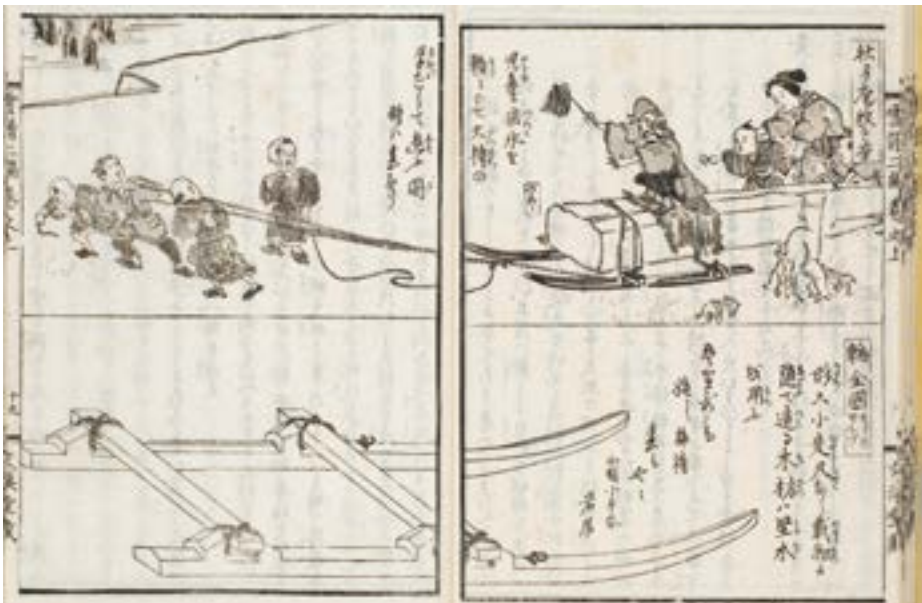
La carátula.



Hokuetsu Seppu: un hermoso libro

Esta obra, que tuvo mucho éxito, se parece en cierta medida al libro de Olaus Magnus. Está ricamente ilustrada y presenta la vida de las personas de esta región a menudo bajo la nieve. También contiene bellas ilustraciones de copos de nieve.

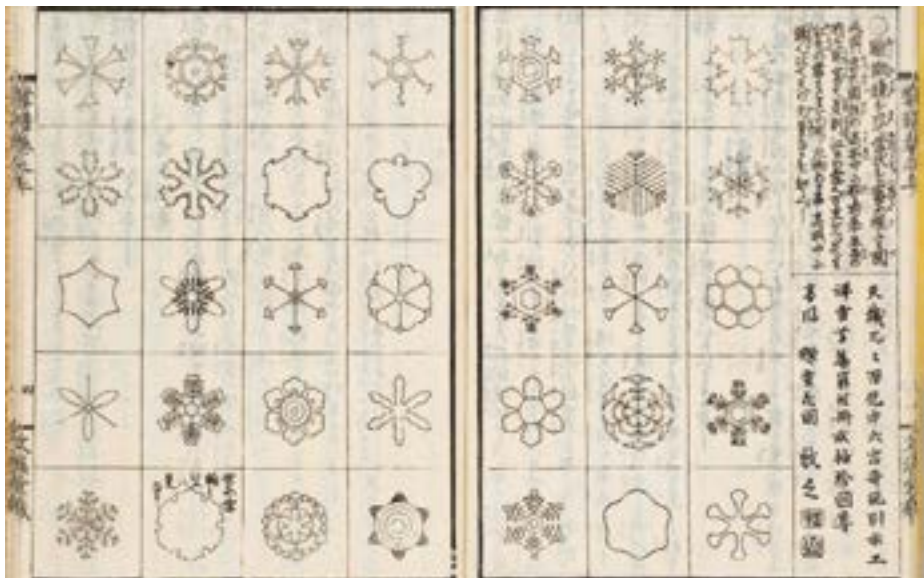
Raquetas de nieve.

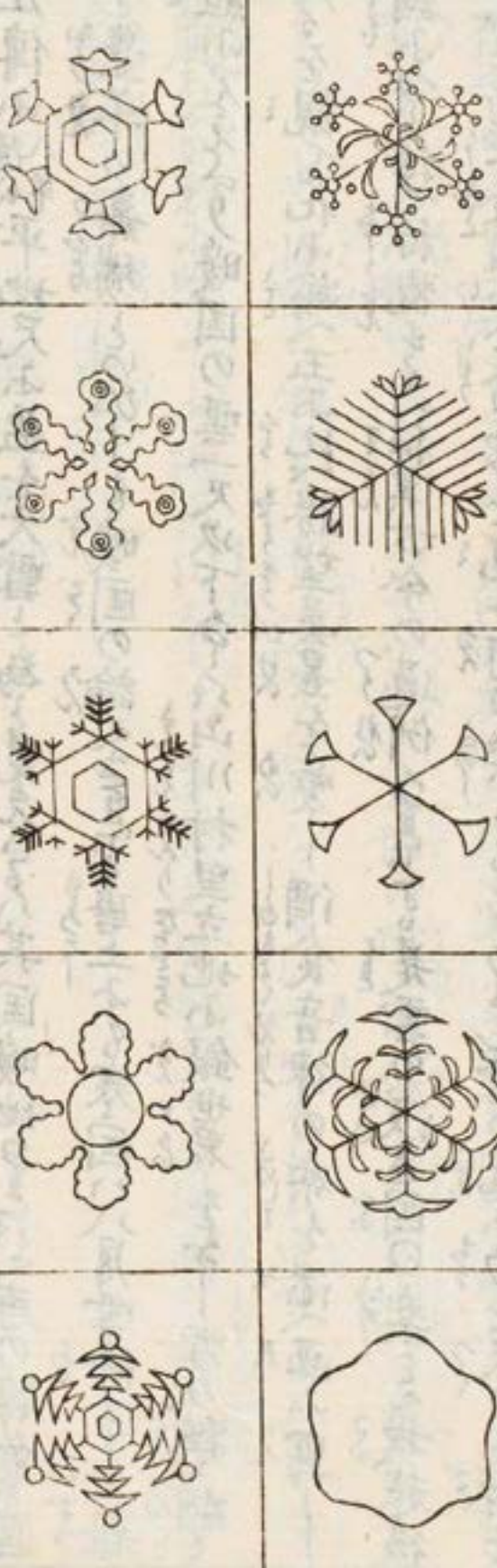




Palas para limpiar.

Diversos tipos de copos de nieve.





¿Son originales y realistas estas imágenes?

No realmente... De hecho, sucede que el *Catecismo de la Naturaleza*, el libro de Joannes Martinet que ya hemos mencionado, había sido traducido al japonés pocos años después de su publicación de 1777 en Holanda. Cincuenta años más tarde, sirvió de base a otro libro que inspiró el de Suzuki Bokushi. Así, esas imágenes son copias de copias de las de Martinet, pasando por dos libros poco conocidos. Obviamente, al hacer copias, a menudo se cometen errores y se agregan nuevas interpretaciones. Estas imágenes, aunque hermosas, son más bien fantasiosas.

Nakaya y la clasificación

Cuando Ukichiro Nakaya llegó a la Universidad de Hokkaido en 1930, el Departamento de Física no disponía de un laboratorio apropiado. Pero había mucha nieve. Fue así que comenzó a fotografiar los copos a su alrededor. Rápidamente entendió que la forma de estos depende muchísimo de la temperatura y la humedad del aire.

La primera decisión que tomó fue clasificar los copos por familias. A todos los científicos les gusta clasificar las cosas que estudian; de algún modo, es un placer culpable.

Por ejemplo, antes de conocer el ADN, los biólogos buscaban clasificar a los seres vivos.

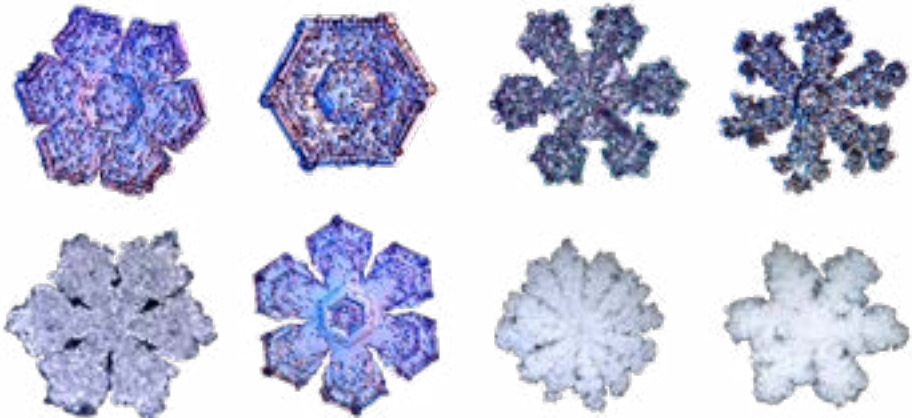
Así, nuestra especie *Homo sapiens* es clasificada del siguiente modo:

- Reino animal
- Vertebrado
- Mamífero (clase)
- Primate (orden)
- Homínidos (familia) - Homo (género)
- Homo sapiens (especie)

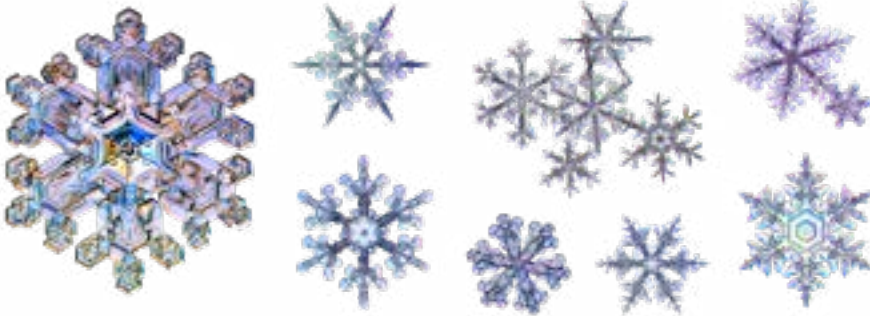
Para los copos de nieve, se puede intentar ordenarlos a partir de su forma general. Por ejemplo, algunos se



parecen a helechos.



Otros tienen un borde más bien liso.
 Y hay otros que son llamados dendritas, pues tienen algo así como



dedos.

Pensando sobre todo esto y observando muchísimos copos, Nakaya propuso definir 41 familias,

N1a	N1b	N2	C1a	C1b	C1c	C2a	C2b
P1a	P1b	P1c	P1d	P1e	P1f	P1g	P1h
P2a	P2b	P2c	P2d	P2e	P4	P5a	P5b
CP1a	CP1b	CP1c	CP2a	CP2b	CP2	S	I1
I2	I3	I4	I5a	I5b	I6a	I6b	I6c

las que se muestran a continuación:

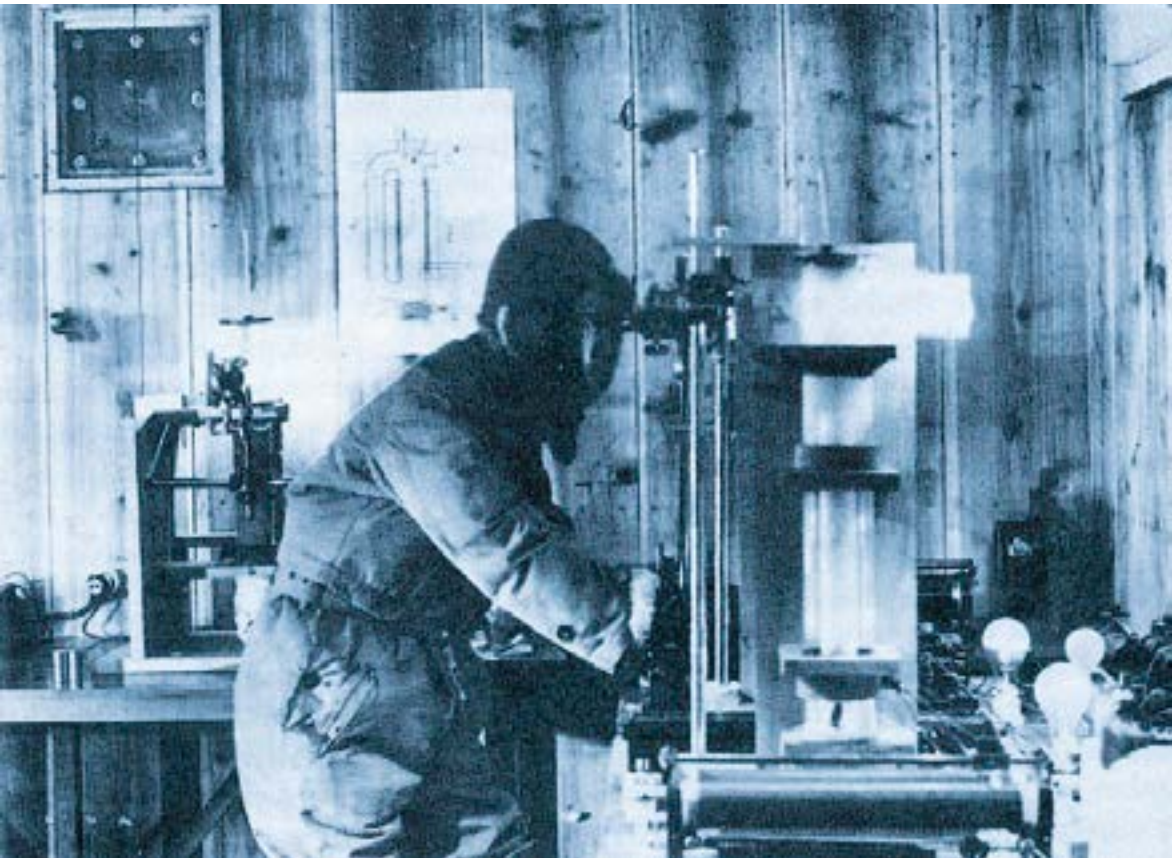
Hoy en día, los especialistas de la nieve utilizan clasificaciones más precisas.

Nakaya quiso entender en qué condiciones de temperatura y humedad se forma cada una de estas familias. Dado que es difícil cambiar la temperatura exterior, decidió fabricar

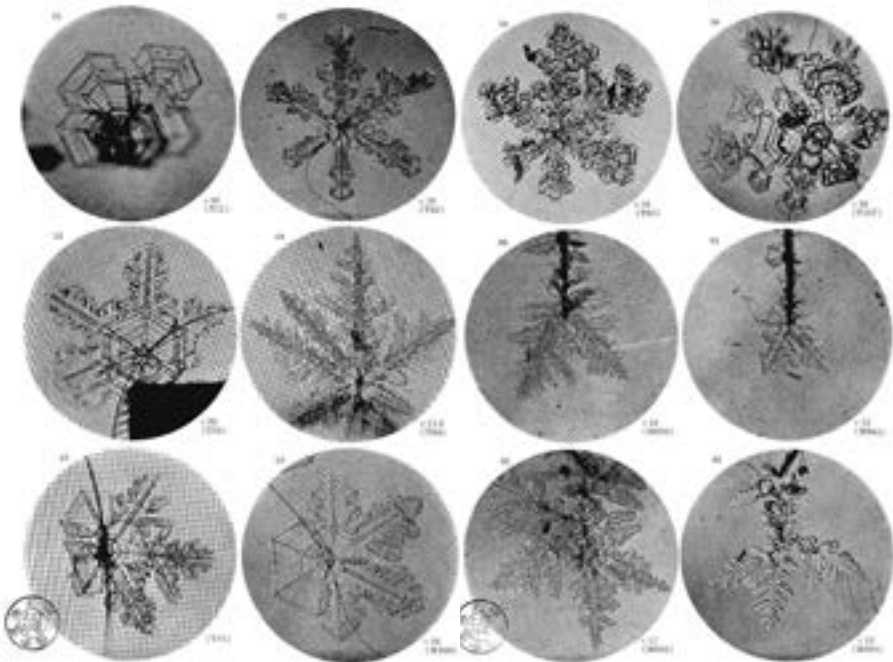
UKICHIRO NAKAYA Y LOS COPOS ARTIFICIALES

Inventó, entonces, un aparato que contiene vapor de agua en su interior y al que se puede variar la temperatura a voluntad (bajo 0 °C obviamente). Pero había que lograr que se formaran los copos de nieve. Así, luego de muchas tentativas infructuosas, lo logró deslizando al interior un pequeño cabello de conejo. ¡Y esto funciona! Alrededor de este cabello se forma el copo y comienza a crecer.

Esta es una imagen de Nakaya en su laboratorio.

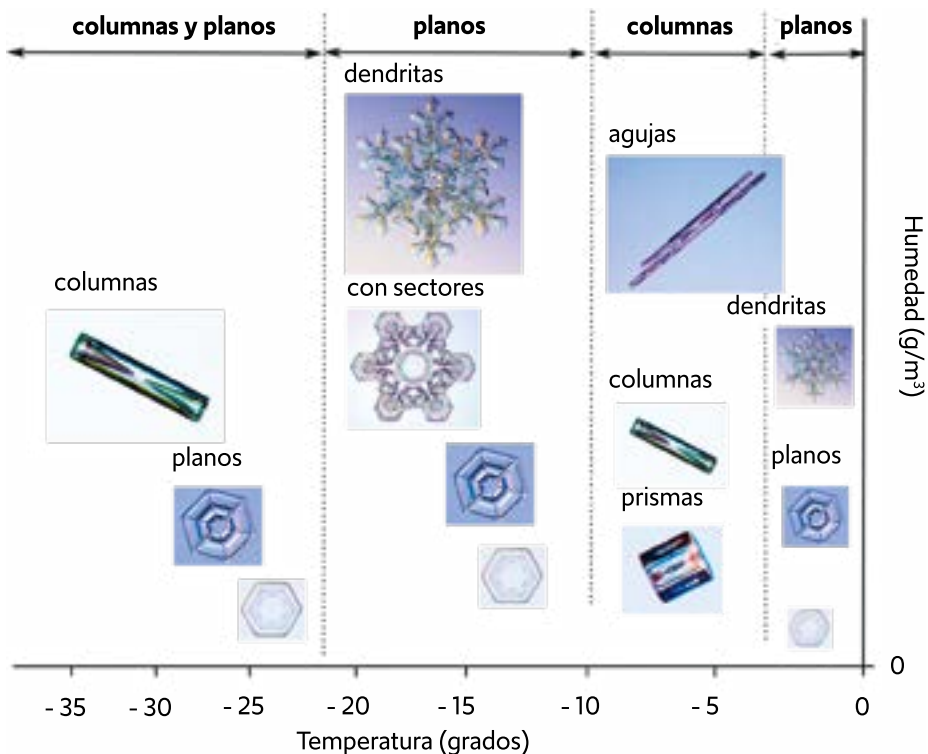


Y estas son algunas imágenes de copos artificiales tomadas por Nakaya.



Cada copo artificial fue cuidadosamente ilustrado para colocarlo en una familia. Así, luego de años de trabajo, logró determinar el tipo de copo producido en función de la temperatura y la humedad.

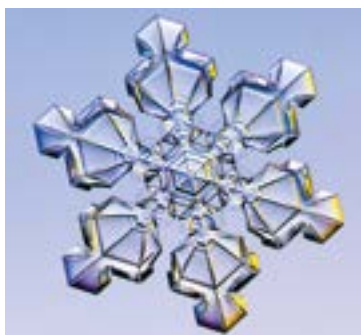
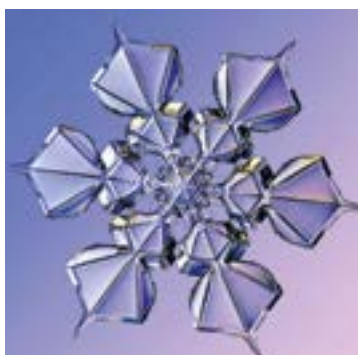
Finalmente, resumió sus descubrimientos en el «diagrama de Nakaya» reproducido aquí:



Sobre el eje horizontal se indica la temperatura, de 0 °C a -35 °C. Sobre el eje vertical se deja constancia del grado de humedad. El diagrama muestra el tipo de copo que surge cuando se hacen variar ambos datos. Muy probablemente, te sorprenderán algunas formas raras de copos de nieve que quizás nunca antes hayas visto. Verás que estas cosas raras solo

pueden aparecer bajo condiciones meteorológicas muy extrañas. Pese a esto, no se encuentran las formas inventadas por Olaf Månsson.

Para cerrar este capítulo, estas son algunas fotografías recientes de copos artificiales fabricados por Kenneth Libbrecht, de quien hablaremos más tarde.



En la imagen que sigue, se pueden distinguir 18 etapas sucesivas del crecimiento de un copo de nieve en el laboratorio durante un periodo de 58 minutos.

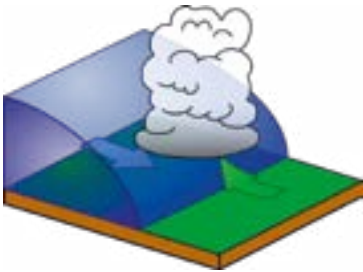


Utilizando su diagrama y observando la forma de un copo, Nakaya fue capaz de determinar las condiciones atmosféricas de la nube en que se formó. Todo esto lo explicó con una linda frase:

«Los copos de nieve son como cartas que vienen del cielo».

Ukichiro Nakaya transmitió su pasión por el agua a su hija Fujiko Nakaya, quien llegó a ser una artista célebre. Ella creó muchas «esculturas de niebla»: se trata de esculturas monumentales a las que uno envía permanentemente vapor de agua para crear un ambiente misterioso y brumoso.

EL NACIMIENTO DE UN COPO DE NIEVE



Ya es momento de describir la vida de un copo de nieve, desde el momento en que se forma en una nube hasta cuando llega al suelo.

Érase una vez una pequeña nube, calurosa y húmeda. En su interior posee entonces una inmensa cantidad de vapor: moléculas independientes de agua que danzan según el favor del viento. En la figura, las moléculas de agua son indicadas con letras V. De pronto, aparece una masa de aire frío, la cual es representada en azul en la figura. Nuestra pequeña nube, más caliente y ligera, es impulsada entonces hacia lo alto.

A medida que coge altitud y que la temperatura disminuye, la nube se enfría y una parte de su vapor se condensa en pequeñas gotitas de agua del orden de una milésima de milímetro de diámetro, las que son representadas aquí por pequeños círculos.

Para que la saturación pueda comenzar, se necesita de un pequeño núcleo, un polvo microscópico como hay muchos en la atmósfera. Este polvo juega el rol de los pelos de conejo de los experimentos de Nakaya.

Se podría pensar que las gotitas se congelan cuando llegan a 0°C , pero esto no ocurre así. Las gotitas de agua pueden permanecer en estado líquido hasta -40°C antes de congelarse. La solidificación depende del polvo y, como hay muchos tipos de este, todas las gotitas no se congelan a la misma temperatura.

La sobresaturación

El aire puede contener una cantidad máxima de vapor de agua, más allá de la cual dicho vapor se transforma en agua líquida. Este máximo depende de la temperatura y la presión. La proporción de vapor respecto de este máximo se llama *tasa de humedad*. Se trata de una información muy importante en meteorología. Los seres humanos (y los animales de sangre caliente) son muy sensibles a esta tasa, pues ella interviene en la regulación de la temperatura interna a través de la transpiración. Soportamos de peor manera el calor si el aire es muy húmedo.

Cuando la temperatura disminuye, como ocurre para una nube que sube, esta cantidad máxima de vapor disminuye y la tasa de humedad aumenta. En principio, el vapor debería condensarse cuando la tasa alcanza el 100 %, es decir, cuando el aire está saturado. Sin embargo, la condensación no puede comenzar si no hay polvo microscópico que permita iniciar el proceso. Una parte del vapor de agua está, entonces, en sobresaturación, es decir, está próxima a condensarse, pero espera aún encontrar este polvo.

En un cierto momento, la nube contiene agua en tres formas: como vapor, líquida y congelada. El vapor se pega, entonces, a los cristales ya presentes, los cuales van creciendo

poco a poco. Las moléculas que están en forma de vapor se desplazan rápidamente: ellas pueden encontrar los pequeños pedazos de hielo y adherirse. Más adelante veremos que el vapor no se pega de la misma manera en todas las partes de los cristales. El resultado es la fabricación de todas esas formas de copos que ya hemos visto. Las gotitas de agua líquida se evaporan y alimentan el aire de vapor de agua. Este vapor se deposita sobre los copos. Las moléculas de agua se alejan de las gotitas para formar el vapor que agranda los copos. Se necesita de un millón de gotitas para obtener el vapor suficiente para formar un solo copo.



Un experimento en el refrigerador

Toma una botella de 50 centilitros de agua y colócala en el congelador. Saca la botella suavemente después de algunas horas, sin agitarla. ¡Sorpresa! Incluso si la temperatura es 3°C por debajo de 0°C , el agua está aún líquida y no se ha congelado. Pero apenas se sacude la botella, el agua se congela en algunos segundos. Este fenómeno es llamado sobrefusión. El agua líquida está lista para congelarse, pero debe ser perturbada, ya sea agitándola o introduciendo en ella algún polvillo.



Durante este tiempo, los pequeños copos en formación van y vienen al interior de la nube. Cada uno sigue su camino y tiene su propio crecimiento, razón por la cual son todos diferentes.

Al cabo de cierto tiempo, los copos han crecido. El viento ya no es capaz de sostenerlos. Son demasiado pesados, por lo que caen. ¡Comienza a nevar!



A decir verdad, el fin de un copo es a menudo decepcionante pues, cuando se aproxima al suelo, la temperatura aumenta y se funde. Qué tristeza saber que incluso nieva en verano, pero todos esos copos, esas magníficas joyas, se transforman en vulgares gotas de agua, y la nieve se transforma en lluvia. Este es el proceso de fundición de un copo en cuatro fotografías.



Dos procesos inversos

Nos falta entender cómo los minúsculos trozos de hielo crecen poco a poco capturando las moléculas de agua en forma de vapor en torno a ellos. Pero seamos honestos: este proceso no es entendido del todo. Los fenómenos físicos involucrados son muy complejos. Nos limitaremos a mencionar aquí algunas ideas muy generales. En el capítulo siguiente veremos algunos modelos matemáticos que permiten entender un poco mejor.

Pero muchos misterios subsisten.

Primer proceso: el facetado

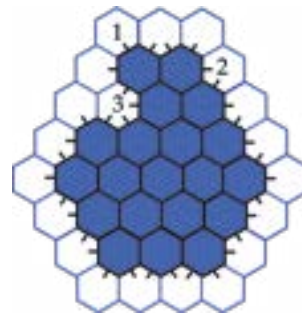
Supongamos que en cierto momento el cristal de hielo es como el de la figura A. Los hexágonos azules están formados de hielo y los blancos están llenos de vapor de agua. El vapor intenta adherirse al cristal.

Una molécula de agua se pasea en todas direcciones y, si ella puede pegarse al cristal que tiene a su lado, entonces es capturada por el cristal. Si una molécula está en una casilla como aquella que lleva el número 1 en la imagen A, entonces puede adherirse a un solo «gancho». En la casilla 2 hay dos ganchos y en la 3 hay cuatro. Vemos, entonces, que una molécula de vapor tiene más

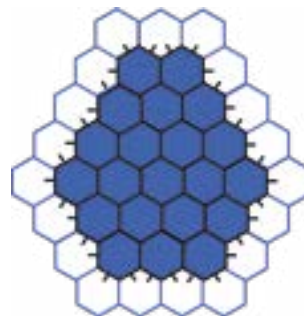
posibilidades de adherirse al cristal si está en la casilla 3 que si está en las casillas 1 o 2. Es muy probable, entonces, que la casilla 3 se congele primero.

El vapor llenará, entonces, los orificios e irregularidades del borde del cristal. Algunos instantes después, el cristal está como se muestra en la imagen B.

Esto es lo que se llama el facetado del cristal: sus caras se han hecho más lisas.



A



B

Segundo proceso: la creación de puntas

Se trata casi del proceso inverso. Imaginemos que el cristal presenta una especie de dedo que apunta hacia lo alto. En la imagen C, la casilla 5 está rodeada de cinco hexágonos llenos de vapor. La casilla está, entonces, rodeada de vapor. Es muy probable que el cristal crezca más rápido sobre esta casilla que del lado de la casilla 2, que solo posee dos casillas vecinas con vapor. Es un efecto inverso al del facetado. Una vez que un dedo aparece, tiende a desarrollarse.

Ambos procesos son un poco



C

contradictorios: el primero alisa los copos y el segundo los hace más complicados. Es la mezcla la que crea la diversidad. Ahora es el momento de introducir modelos matemáticos en todo esto.

NORMAN PACKARD:
EL MATEMÁTICO

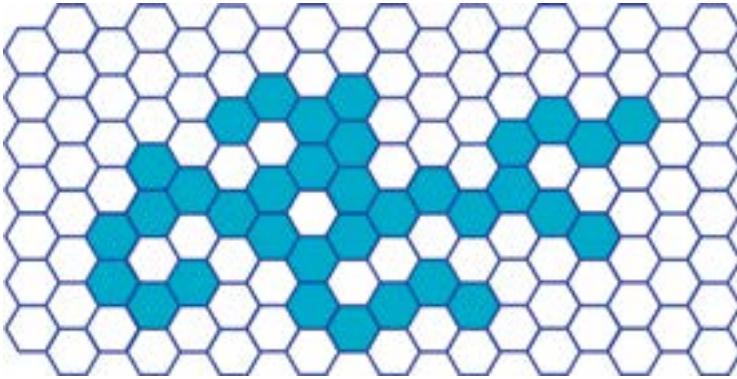


Cuando un sistema físico es demasiado complicado, se suele recurrir a los matemáticos. En 1986, Norman Packard propuso un modelo muy simple para intentar entender el crecimiento de los cristales. No se trata de un modelo realista que busque resolver el verdadero problema; se busca más bien dar con un problema más sencillo que pueda ser resuelto que se inspire de la verdadera dificultad. Obviamente, nada asegura que la solución sea interesante para el verdadero problema. Se hace lo que se puede,

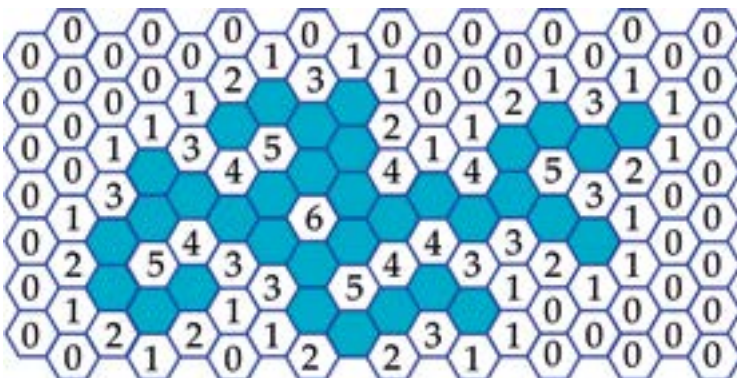
pero, a menudo, eso permite ver más claramente.

Este es el modelo. Primero, se dibuja un copo en el plano (más adelante veremos otros modelos que funcionan en el espacio). Suponemos que el plano está descompuesto en hexágonos, como nos instruyó Kepler, y simplificamos al máximo el problema: suponemos que cada hexágono está lleno de hielo o de vapor. Ciertamente, es una simplificación exagerada, pero continuemos.

Un copo de Packard se parece a esto. Las casillas blancas están llenas de vapor y las azules, congeladas.



Ahora, debemos entender cómo ciertos hexágonos llenos de vapor pueden congelarse y adherirse al cristal en crecimiento. Para este efecto, para cada casilla contamos la cantidad de vecinos congelados, como en la figura siguiente:



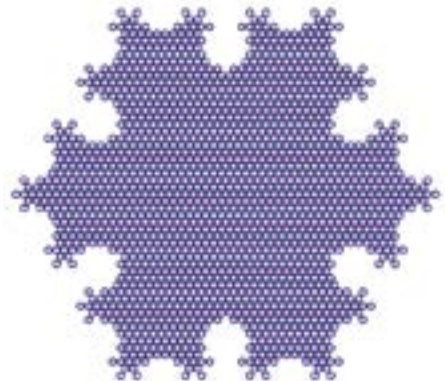
Enseguida, vamos a elegir una regla para decidir en qué condiciones una casilla con vapor va a congelarse en

el instante siguiente. Esta elección puede ser totalmente arbitraria, pero podemos inspirarnos en dos procesos ya vistos: el facetado y la creación de puntas. Norman Plackard decide adoptar la regla siguiente:

- Si una casilla con vapor es vecina de 1, 3, 4, 5 o 6 casillas congeladas, entonces se congela al instante siguiente.

- Si ella posee 0 o 2 casillas congeladas vecinas, entonces no se congela y sigue estando llena de vapor.

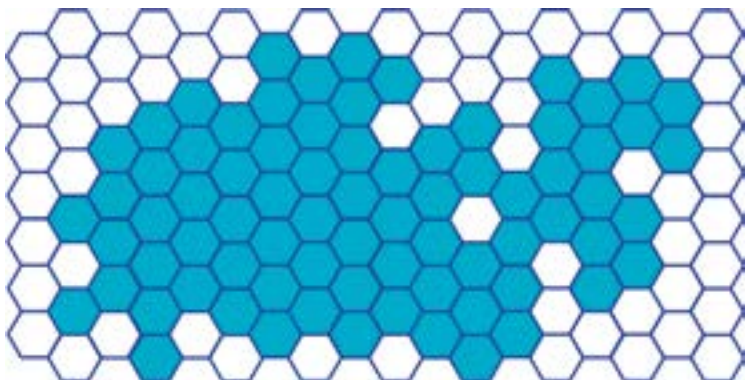
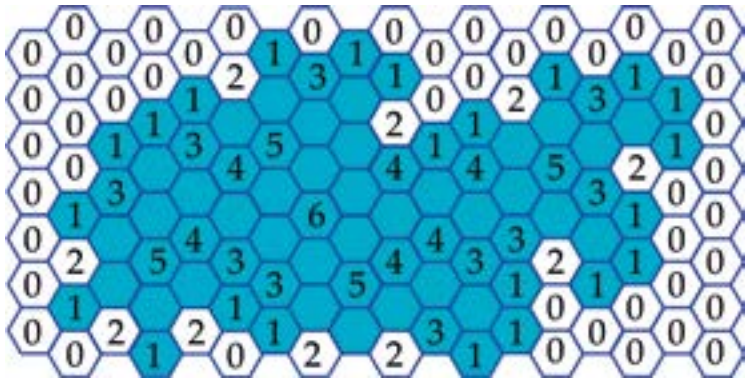
¿Por qué esta regla por sobre otras? Pues bien, no es para nada claro. Es muy probable que Packard haya procedido de esta manera después de sucesivos ensayos. Obviamente, se pueden imaginar otras reglas, pero es esta la que da los mejores resultados. Así es, a veces se empieza



por andar a tientas antes de ver más claro.

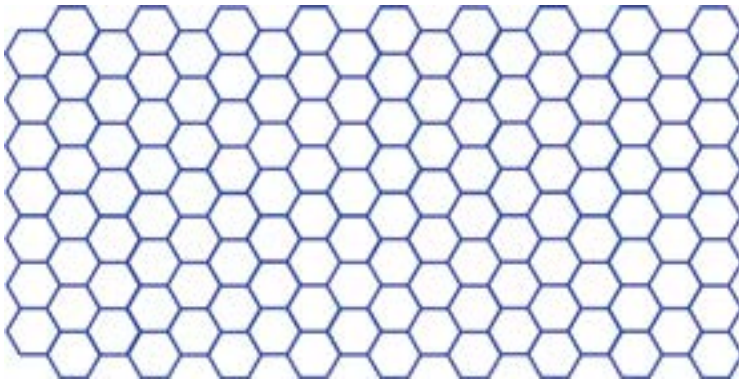
Nuestro copo se transforma, entonces, en esto. Las casillas 1, 3, 4, 5 o 6 se congelaron y forman parte ahora del cristal.

Ahora tenemos un nuevo cristal y recomenzamos el juego. Para cada casilla del nuevo cristal, contamos el número de vecinos congelados, aplicamos la regla y recomenzamos una y otra vez. De esta manera, si partimos de un pequeño cristal, este va a crecer poco a poco.



¡A JUGAR!

Comencemos con hexágonos llenos de vapor, como este:



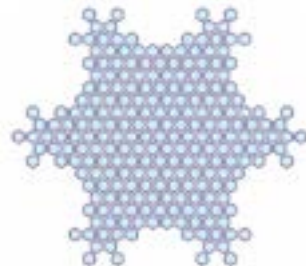
Escoge un número pequeño de casillas, digamos 4 o 5, para formar el inicio del cristal. Píntalos del color que quieras. Busca todas las casillas con vapor (es decir, las no coloreadas) que tienen 1, 3, 4, 5 o 6 casillas coloreadas, y coloréalas!

Obtienes un nuevo cristal.

Comienza nuevamente.

Evidentemente, esto puede hacerse con un cuaderno y lápices de colores, pero es mejor intentarlo con un computador. Veamos lo que da.

Si se comienza con un copo que contiene solo un hexágono y hacemos correr 11 veces el modelo, se obtiene la figura siguiente:



Las imágenes de la página siguiente muestran la evolución del copo. Para entender bien lo que ocurre, pusimos colores diferentes a los hexágonos de acuerdo con el momento en que se congelaron. El hexágono del centro estaba congelado en un inicio, y en cada etapa aparecen nuevos hexágonos congelados. Evidentemente, nuestro copo crece, por lo que cambiamos sistemáticamente la escala para apreciarlo en una talla razonable en cada imagen.

¿El modelo de Placard da cuenta de la realidad? ¡Ciertamente no!

Por supuesto, las imágenes son interesantes —recuerdan vagamente los copos de la naturaleza—, pero debemos reconocer que los verdaderos copos son bastante más bellos. Sin embargo, lo que es notable es que, con estas reglas de juego tan simples, se pueden producir imágenes razonablemente cercanas a las de un copo. En particular, se constata la coexistencia del facetado con la creación de puntas.

Vamos por buena vía...

Complicando un poco el modelo, se debería poder fabricar cosas que se parecen realmente a copos.

CLIFFORD REITER:
MATEMÁTICO



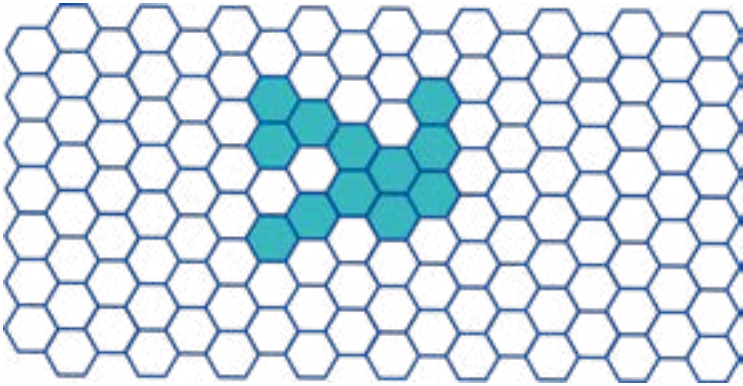
Clifford Reiter.

Este capítulo es más complicado que los otros.

Es normal: la ciencia no siempre es fácil. Pero si piensas que el capítulo es demasiado difícil, puedes simplemente no leerlo...



Clifford Reiter es un matemático estadounidense. En 2005 publicó un artículo en que mejora el

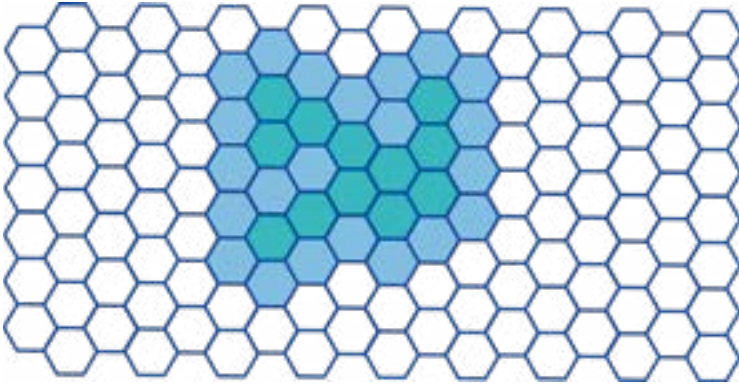
modelo de Placard y produce imágenes realistas. Mejor aún, su modelo contiene «parámetros» que se pueden regular para obtener más o menos todas las formas observadas por Ukichiro Nakaya. Se comienza como lo hizo Placard, descomponiendo el plano en hexágonos.



Como antes, los hexágonos coloreados están congelados. La diferencia es que los otros hexágonos contienen vapor en cantidades diferentes. Imaginamos, entonces, que cada hexágono blanco contiene un número entre 0 y 1 según la cantidad de vapor que allí hay.

Tan pronto la cantidad de vapor alcanza 1, el hexágono se congela. Ahora hay que buscar las reglas del juego que van a modelar el crecimiento del copo. Esto puede hacerse en dos etapas

En primer lugar, se distinguen dos tipos de hexágonos. El tipo 1 es el de aquellos que ya están congelados o que son vecinos de otro hexágono congelado. Son estos últimos los que posiblemente van a congelarse en el instante próximo. En la figura de la página siguiente los hexágonos de tipo 1 son  (congelado) y  (vecino de un congelado). Los otros hexágonos son de tipo 2; estos no se congelarán al instante siguiente.



Esta es la situación:

Al comienzo del juego, solo un hexágono está congelado y se le asocia una cantidad de vapor igual a 1. Todos los otros hexágonos tienen la misma cantidad de vapor igual a cierto número $a < 1$ que se puede escoger arbitrariamente (a es lo que llamamos un parámetro). El crecimiento del copo opera, entonces, de la siguiente manera:

Difusión del vapor: cada hexágono de tipo 2 entrega una cierta proporción de vapor a sus vecinos (incluidos aquellos que son de tipo 1). Es un poco como la difusión del calor: si un lugar es mucho más caliente que su entorno, entonces se enfría, y el calor que pierde calienta lo que hay a su alrededor.

Crecimiento del copo: cada hexágono de tipo 1 recibe una cierta

cantidad adicional c de vapor. Cada hexágono que contiene una cantidad de vapor superior a 1 se congela inmediatamente y permanece congelado en el futuro. Se obtiene así un nuevo copo, con una nueva repartición de vapor. Y se recomienza la operación. Lo que es interesante es que este proceso depende de tres parámetros: a , b y c . Para cada elección de estos valores se obtiene un crecimiento de cristal diferente. Esto es exactamente lo que se busca si se quiere emular a la naturaleza. Recuerda el diagrama de Nakaya, que también contiene parámetros: la temperatura y la humedad.

Los copos son más realistas que los de Packard, pero aún no son perfectos. Dos matemáticos mejoraron el modelo introduciendo nuevos parámetros.

Veamos algunos de sus copos:



JANKO GRAVNER & DAVID GRIFFEATH:
MATEMÁTICOS



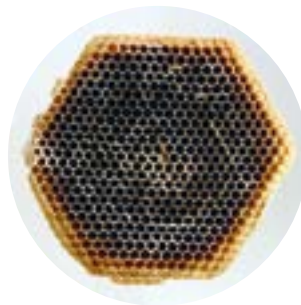
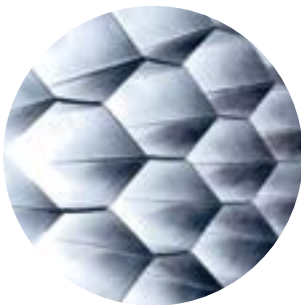
Janko Gravner.



David Griffeath.

Todo esto es muy interesante, pero nuestros copos aún están en el plano. Se debe inventar aún otro modelo, un poco más complicado, que funcione en tres dimensiones. Son los mismos matemáticos, Janko Gravner y David Griffeath, quienes lo concibieron en 2009.

Esta vez el modelo es tan complejo que es preferible no explicarlo del todo aquí. Se comienza no con un plano descompuesto en hexágonos, sino con el espacio descompuesto en prismas de base hexagonal (como los alveolos de las abejas que, después de todo, están en el espacio y no en el plano).



Imaginamos, entonces, que el espacio es llenado por prismas, como los alveolos. Cada prisma está congelado o lleno de vapor. Pero esta vez, cada prisma no solo puede comunicar con sus seis vecinos, sino también con los prismas que están arriba y abajo de él. Obviamente, la situación es más complicada, y las reglas del juego son diferentes.

Los resultados de Janko y David son magníficos.

Lo que los hace aún más impresionantes es que, eligiendo bien los parámetros, es posible encontrar copos que son realmente tridimensionales. Ya vimos que este tipo de copos existe en la naturaleza, al menos en condiciones meteorológicas muy particulares. En una situación tal, el crecimiento del copo ocurre más rápido en la dirección perpendicular a los planos de los hexágonos del cristal de hielo.

Así en este libro hemos visto tres tipos de copos:

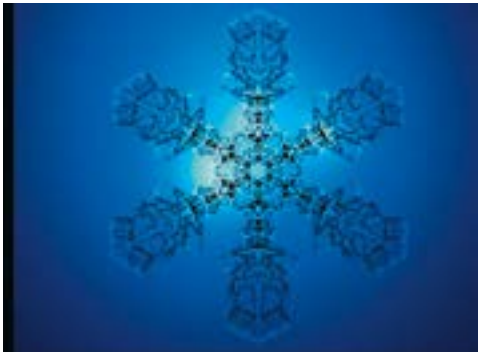
- los copos naturales, tal como los fotografiados por Wilson Bentley;
- los copos artificiales, como los de Ukichiro Nakaya;
- los copos virtuales, como aquellos producidos por los modelos que acabamos de describir.

A modo de broma, los últimos son llamados *snowfakes*, en oposición a los *snowflakes*: en inglés, *flake* significa «copo» y *fake* significa «falso».









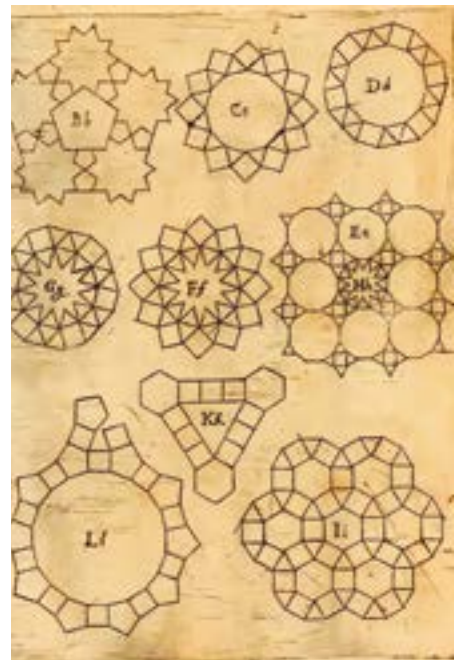
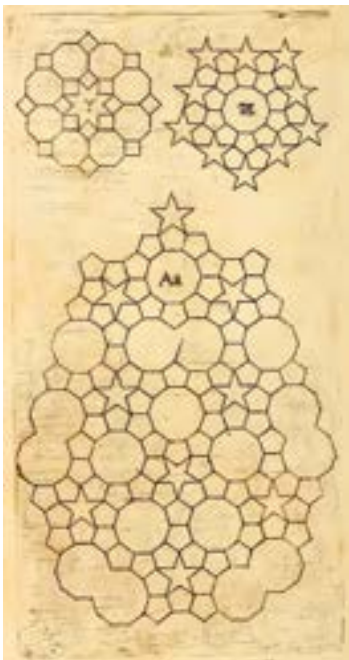
JOHANNES KEPLER Y LAS SIMETRÍAS DE ORDEN 5

En 1618, nuestro héroe Johannes Kepler escribió el libro *Harmonices Mundi* (Armonía del mundo). Como siempre, Kepler busca entender las simetrías. Se trata de una obra importante y difícil, en la cual se pueden hallar una gran cantidad de cosas. De hecho, él lo sabe perfectamente, al punto de que en su introducción escribe:

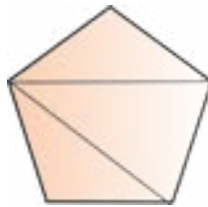
Escribí este libro para mis contemporáneos o –poco importa– para la posteridad.

Es posible que mi libro tenga que esperar cien años antes de tener un lector.

Estas son dos páginas ilustradas, entre muchas otras.



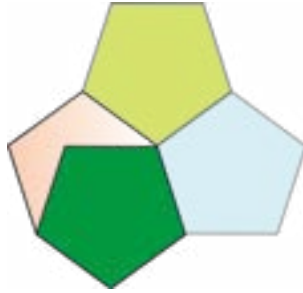
Al realizar estos dibujos, ¿pensaba ya en la cristalografía, que no existía aún? Observa la gran cantidad de pentágonos, es decir, polígonos de cinco lados. ¿Andaba en procura de cristales que permanecieran intactos al girarlos en un quinto de vuelta? (En tal caso, se hablaría de una simetría de orden 5). Él había observado que los copos tienen una simetría de orden 6 y había sugerido que esto se asemejaba a lo de los alveolos de las abejas, formados por hexágonos regulares. En un pentágono, la suma de los ángulos internos es igual a $3 \times 180 = 540$ grados, pues se lo puede descomponer en tres triángulos, y la suma de los tres ángulos de un triángulo vale 180 grados.



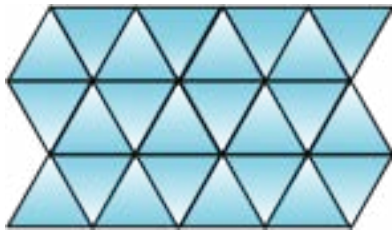
Si el pentágono es regular, sus cinco ángulos son iguales, por lo que cada uno vale $540 : 5 = 108$ grados. Si se intenta embaldosar el plano con baldosas que son pentágonos *regulares*, se observa rápidamente que no se pueden colocar tres baldosas alrededor de un vértice, pues $3 \times 108 = 324$ es menor que los 160 grados necesarios para dar la vuelta a un punto.



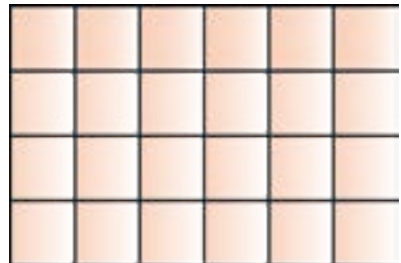
Tampoco se pueden poner cuatro, pues $4 \times 108 = 432$ es mayor que 360.



Por lo tanto, es imposible embaldosar el plano con pentágonos regulares. Los únicos polígonos regulares que pueden llenar el plano son el triángulo equilátero, el cuadrado y el hexágono regular. Para el triángulo equilátero, los ángulos valen 60 grados, y se pueden colocar seis en torno a cada vértice.



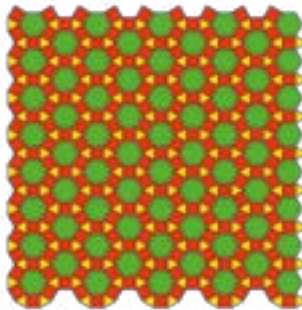
Para el cuadrado, los ángulos valen 90 grados, y se colocan cuatro alrededor de cada vértice.



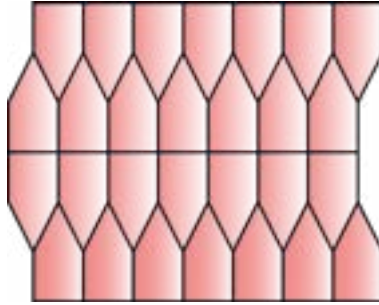
Y para el hexágono, los ángulos valen 120 grados, y se ubican seis en torno a cada vértice.



Es posible preguntarse qué se puede hacer con distintos tipos de polígonos regulares. Este es un ejemplo con cuadrados, triángulos y hexágonos.

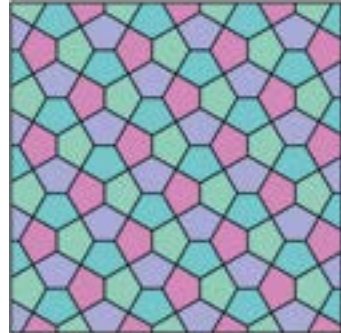


Kepler encontró todas las combinaciones posibles: hay exactamente once. Sin embargo, ninguna utiliza pentágonos. ¡No hay simetría de orden 5! Pero no es el fin de la historia. Es posible embaldosar el plano con pentágonos que no son regulares. Hay ejemplos evidentes como este, en que las piezas tienen forma de casa.

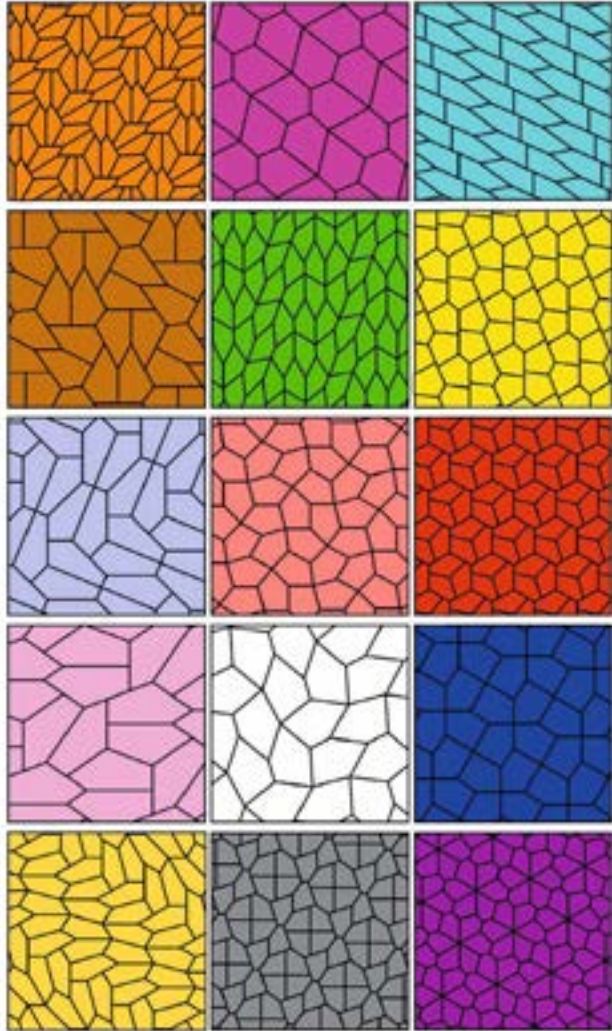


Otros ejemplos son menos evidentes. Este es llamado el embaldosado de El Cairo, pues se halla en una calle de la capital egipcia.

Sin embargo, aunque los pentágonos de esta figura son todos idénticos, no hay simetría de orden 5. Por el contrario, se constata una simetría de orden 4 en este ejemplo. Durante mucho tiempo se buscaron todas las formas de pentágonos que pueden embaldosar el plano. Se conocían cinco ejemplos en 1918. Otros tres fueron descubiertos en 1968, y se pensó que la lista estaba completa. Pero un informático y una matemática aficionada descubrieron otros dos después de haber leído sobre el asunto en una revista para todo público. En 1985, se descubrieron dos nuevos ejemplos, y finalmente otro en 2015. Tras esto, en 2017, un matemático de Lyon probó que la lista está completa.



Esta es:



Los quince pentágonos que pueden embaldosar el plano.

Poco a poco, los cristalógrafos han tomado conciencia de que un cristal solo puede presentar simetrías de orden 2, 3 y 6. La búsqueda de la

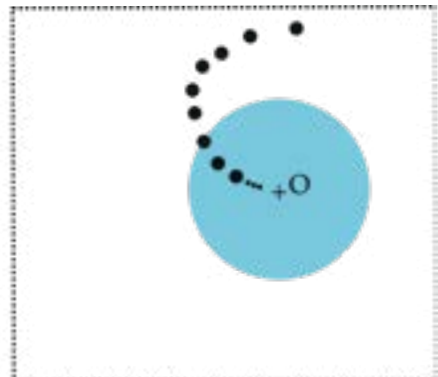
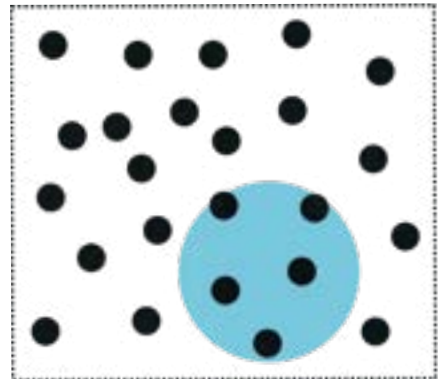
simetría de orden 5 de Kepler estaba destinada al fracaso.

Un teorema de geometría

Como hablamos de matemáticas aquí, vamos a hacer una demostración.

A menudo, un matemático simplifica las cosas al extremo para concentrarse en lo esencial, incluso si esto lo obliga a alejarse un poco de la realidad física. Por ejemplo, un cristal está formado por una cantidad gigantesca de átomos. En un primer momento, olvidaremos los detalles sobre la naturaleza de estos átomos y los imaginaremos como simples puntos, sin dimensión alguna. Para simplificar aún más, no dudaremos en imaginar una cantidad infinita de átomos, y en lugar de situarnos en el espacio, comenzaremos dibujando en el plano. Obviamente, los verdaderos átomos tienen dimensión y solo se puede ubicar una cantidad finita en una región acotada del espacio. Proponemos entonces la definición siguiente:

Un cristal (matemático) es un conjunto de puntos (que representan a los átomos) repartidos en el plano de modo que un disco solo contiene un número finito.



A la izquierda de la imagen de la página anterior vemos un cristal. A decir verdad, este cristal solo contiene una cantidad finita de puntos, pero podemos imaginar que lo prolongamos infinitamente en todas direcciones. Obviamente, fue necesario dar un pequeño diámetro a los puntos para visualizarlos, pero nuevamente hay que pensar en puntos matemáticos, sin dimensión. Se trata de un cristal, pues un círculo, como aquel coloreado de azul, contiene solo un número finito de puntos.

El dibujo de la página anterior, representa una sucesión infinita de puntos que se aproximan más y más al punto central O. Al menos, eso es lo que la figura intenta sugerir. El círculo azul de centro O contiene una infinidad de átomos: no es un cristal. Dibujemos un cristal sobre una hoja de papel (de amplitudes infinitas: hay que hacer un pequeño esfuerzo de imaginación). Fotocopieemos este cristal en una transparencia (también infinita). Si superponemos la transparencia a la hoja, entonces cada punto de la transparencia se ubica sobre un punto del papel. A veces, si desplazamos la transparencia de cierta manera apropiada, los puntos de ella se ubican nuevamente sobre los puntos del papel de manera exacta. Cuando esto sucede, decimos que el desplazamiento de

la transparencia es una simetría del cristal.

La imagen que viene a continuación es un ejemplo. Si trasladamos el cristal de abajo en la dirección de la flecha roja, cada punto va a instalarse sobre otro punto. La flecha roja representa, entonces, una simetría. Una vez más, hay que imaginar que el cristal se prolonga infinitamente, tanto a izquierda como a derecha.

Este es otro ejemplo. Si giramos el cristal siguiente en un quinto de vuelta, entonces queda intacto. Aquí, la simetría es una rotación de orden



5.

Necesitaremos otra definición.

Se dice que el cristal es periódico si existe una traslación del plano que la preserva.

Finalmente, este es el teorema que



queremos demostrar:

Teorema: ningún cristal periódico admite una simetría de orden 5.

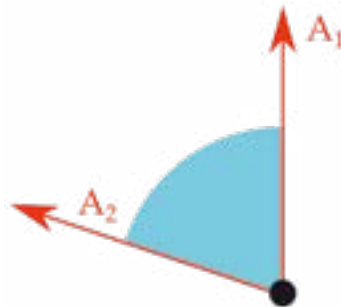


La demostración será «por absurdo»: supondremos que un cristal periódico tiene una simetría de orden

5 y veremos que esto nos conduce a una contradicción.

Nuestro cristal es invariante por una traslación, ilustrada en la página siguiente por una flecha A_1 , que los matemáticos llaman un vector.

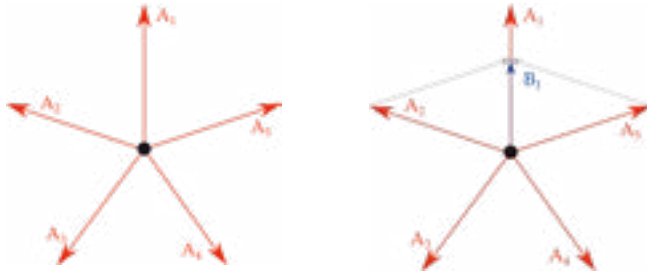
Como el cristal es invariante por una rotación de un quinto de vuelta —pues asumimos que tiene una simetría de orden 5—, también es invariante por la traslación A_2 obtenida al hacer girar A_1 un quinto de vuelta. En efecto, si hacemos girar el plano un quinto de vuelta, luego trasladamos en la dirección A_1 y finalmente giramos un quinto de vuelta pero en el sentido contrario, el resultado final de estas operaciones es que el plano se somete a una traslación A_2 (haz el diagrama en una hoja de papel)



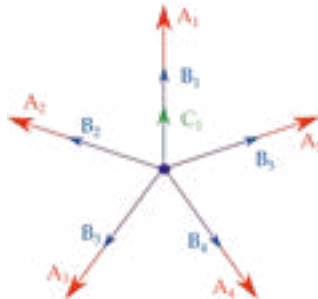
Continuemos: se obtienen los vectores A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 .

Las traslaciones A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 son, por tanto, simetrías.

Si hacemos actuar las traslaciones A_2 y A_5 una después de la otra, obtenemos la traslación B_1 de la figura.



Acabamos de probar, entonces, que nuestro cristal también es invariante por la traslación B_1 . Vemos, además, que B_1 es más corto que A_1 .



Podemos ahora recomenzar con B_1 en lugar de A_1 . Encontramos, entonces, una nueva traslación C_1 aún más corta, y luego una traslación D_1 más corta, etc. Finalmente, encontramos una sucesión infinita de traslaciones A_1, B_1, C_1, D_1 , etc., cuyas longitudes son más y más pequeñas. Si tomamos un átomo y lo trasladamos por A_1, B_1, C_1, D_1 , etc., hallamos una sucesión infinita de átomos que se aproximan más

y más. Sin embargo, según nuestra definición de cristal, no puede haber sino una cantidad finita de átomos en un círculo. Esta es la contradicción buscada que nos lleva a la conclusión.

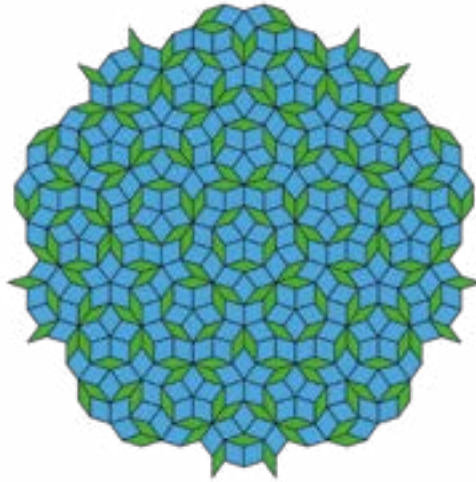
Q.E.D.

Un cristal periódico no puede admitir una simetría de orden 5.

Con el mismo tipo de demostración, se puede probar que las únicas simetrías autorizadas para un cristal periódico son de orden 2, 3, 4 o 6. Por otra parte, ¡el mismo argumento funciona para cristales en el espacio! También es válido en espacios de dimensiones más altas, pero aquí llegamos a un mundo de elucubraciones matemáticas.

Con pentágonos con forma de casa se puede obtener un embaldosado con una simetría de orden 7 pero, obviamente, no periódica





Observa ahora este embaldosado del plano, con dos tipos de piezas y una simetría de orden 5.

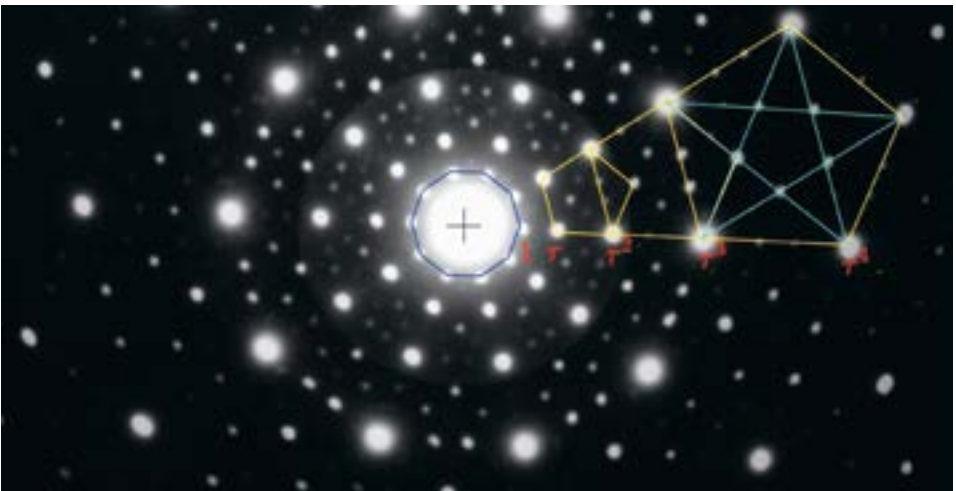
Las piezas son romboides de dos formas diferentes, en azul y verde. Si se continúa el embaldosado sobre una gran superficie, se tiene la impresión de que las piezas vuelven periódicamente, pero nuestros ojos nos engañan: cada cierto tiempo aparecen «pequeños errores»

De manera más precisa, delimitemos una zona de esta imagen, por ejemplo, lo que hay al interior de un círculo, no importa cuán grande sea. Pues bien, sucede que se puede encontrar una traslación del plano que envía este círculo sobre una copia idéntica en alguna parte del diseño. Sin embargo, la traslación no es una simetría, pues no deja invariante la parte del diseño exterior al círculo.

Hemos visto que un embañosado periódico del plano no puede tener una simetría de orden 5, pero, en este caso, el embañosado no es del tipo periódico: se dice que es *cuasiperiódico*.

Este tipo de embañosados fue descubierto en los años 70 por Roger Penrose (quien, por otra parte, recibió el Premio Nobel de Física en 2020 por sus trabajos sobre los agujeros negros). Todo esto es muy matemático y, en principio, no tiene nada que ver con los «verdaderos» cristales que se encuentran en la naturaleza.

Sin embargo, en 1982, Dan Shechtman observó lo siguiente en la difracción de un cristal de aluminio y manganeso:



Parecía increíble: esta imagen permanece intacta si se la rota en un quinto de vuelta. Frente a sus ojos tenía una simetría de orden 5 que no debía existir para un cristal físico. Era el inicio de una bella aventura que revolucionaría la cristalografía, la de los *cuasicristales*. Kepler hubiera adorado esto. Shechtman obtuvo el Premio Nobel de Química en 2011 por este descubrimiento.

Pero esto es otra historia:
ya no se trata de copos de nieve...



KENNETH LIBBRECHT:
¿FÍSICO O ARTISTA?



Kenneth G. Libbrecht es profesor de física en la prestigiosa universidad estadounidense CALTECH (California Institute of Technology). Nació en Dakota del Norte, uno de los estados donde más nieva. Sus trabajos tratan sobre el crecimiento de los cristales, en particular sobre los cristales de nieve, desde el vapor hasta el copo de nieve. En una sola frase, es un físico de la nieve.

También es un artista, digno de su predecesor, Wilson Bentley.

Ha tomado una gran cantidad de fotografías y ha publicado magníficos libros sobre los copos de nieve, como *The Snowflake: Winter's Frozen Artistry*, *The Secret Life of a Snowflake* y *Ken Libbrecht*

Guide to Snowflake. Unos de estos libros ha sido traducido al francés: *Flocons de neige, la beauté secrète de l'hiver* (Copos de nieve, la belleza secreta del invierno), por Éditions de l'Homme.

Muchas imágenes de este libro provienen de su página de internet (en inglés), que es una maravillosa fuente de información:

<http://snowcrystals.com>

Le agradezco calurosamente.
¡No puedes dejar de visitar esta página!

¿LA CONTINUACIÓN?

Hay mucho aún por hacer para entender la verdadera naturaleza de los copos de nieve. Hemos visto que ciertos programas informáticos producen copos virtuales que pueden ser visualizados en la pantalla de un computador y que se parecen mucho a los copos naturales. ¿Se puede concluir de esto que se ha *entendido* realmente el crecimiento de un copo?

Entender es mucho más que calcular...

El fenómeno físico subyacente esconde aún muchos secretos. En lo que a mí respecta, la pregunta que me parece más misteriosa tiene relación con el diagrama de Nakaya. Incluso si todos los copos son diferentes, parecen formar una gran familia descrita esencialmente

por apenas dos parámetros: la temperatura y la humedad.

¿Por qué tan pocos parámetros?
¿Por qué esta diversidad que, después de todo, es un poco limitada?

Mientras permanecen aún en las nubes, lanzados en todas direcciones por el viento, los copos en pleno crecimiento posiblemente tienen formas muy variadas. La evolución posterior parece forzarlos después a aproximarse a una especie de atractor simbolizado por el diagrama de Nakaya.

¿Por qué? ¿Cómo?

La historia aún no ha concluido. Espero que una de mis lectoras pueda responder a una de estas preguntas en el futuro.

CRÉDITOS DE LAS ILUSTRACIONES

- 10: © Instituto de Francia.
- 12, 23: Johannes Kepler, grabado de N. Dietz. Wellcome Collection. Atribución 4.0 International (cc BY 4.0).
- 12, 17: René Descartes, grabado por J. Suyderhoeff a partir de F. Hals, 1649. Wellcome Collection. Atribución 4.0 International (cc BY 4.0).
- 12, 38: Retrato de Thomas Bartholin, Wellcome Collection. Atribución 4.0 International (cc BY 4.0).
- 12, 39: Grabado tomado de *Micrographia*, 1665, por Robert Hooke. Wellcome Collection. Atribución 4.0 International (cc BY 4.0).
- 12, 41: Academia de ciencias; Giovanni Domenico Cassini. Litografía por [F. C.]. Crédito: Wellcome Collection. Atribución 4.0 International (cc BY 4.0).
- 12, 42: Joannes Florentius Martinet. Grabado por R. Vinkeles, 1778, a partir de lui-même. Wellcome Collection. Atribución 4.0 International (cc BY 4.0).
- 12, 44: <https://www.biodiversitylibrary.org>; William Scoresby. Grabado por E. Smith, 1821, a partir de A. Mosses. Wellcome Collection. Atribución 4.0 International (cc BY 4.0).
- 12, 45: Negretti & Zambra (Firm). Cecilia Louisa Glaisher - Photograph taken by Negretti & Zambra. Craddock, Gerald Rainsford, 1910-1990: Photographs relating to the Glaisher family. Ref: PA1-o-190-22. Alexander Turnbull Library, Wellington, New Zealand ; Wikimedia Commons.
- 10-11, 13-14, 16-17, 22-24, 26-27, 30, 34-35, 52-53, 60-61, 78, 83, 85, 88-89, 94, 128-129: Con la amable autorización de Kenneth Libbrecht, snowcrystals.com.
- 13, 49: Wikimedia Commons.
- 13, 61: University of Adelaide, con autorización.
- 13, 75, 77: Special Collections and Archives Research Center (SCARC), con autorización.
- 13, 76: Wikimedia, cc BY MRC Laboratory of Molecular Biology.
- 13, 78-81: <http://kotenseki.nijl.ac.jp>, avec autorisation.
- 13, 97: Con la amable autorización de Norman Packard.
- 13, 104, 107: Con la amable autorización de Clifford A. Reiter.
- 13, 110-114: Con la amable autorización de Janko Gravner y David Griffeath.
- 15, 17-21: <http://runeberg.org/olmagnus/>.

- 16: © Wirestock/AdobeStock.
- 22, 37, 39-41, 48-49, 51, 53-55, 57-60, 66, 79: Wikimedia Commons.
- 25, 38: <https://archive.org/>.
- 28: Wikimedia Commons, CC BY SA autor KENPEI ; Wikimedia Commons, Pseudopanax at English Wikipedia.
- 29: Wikimedia Commons, a partir de CC BY Waugsberg.
- 29, 62-64: Montajes del autor.
- 31: Adaptado por el autor, Con la amable autorización de Kenneth Libbrecht, snowcrystals.com.
- 32: Wikimedia Commons, CC BY Frédéric Ducarme.
- 32, 33: Con la amable autorización de Jos Leys, www.josleys.com.
- 33: Wikimedia Commons, CC BY SA JJ Harrison (<https://www.jjharrison.com.au/>).
- 36: René Descartes, *Discurso del método*, recopilación del autor.
- 40: © The Royal Society.
- 42-43: Katechismus der natuur. Public Domain Mark.
- 46-47: © The Fitzwilliam Museum.
- 48: DR.
- 50: Wikimedia Commons, Snow_Crystal-_MET, Purchase, Alfred Stieglitz Society Gifts, 2015.
- 52: © Oksana Kumer/AdobeStock.
- 56: Wikimedia Commons, Smithsonian Institution Archives (SIA).
- 59: Wikimedia Commons, Rob Lavinsky, iRocks.com –CC-BY-SA-3.0.
- 62, 64, 70, 90-93, 95-96, 98, 100-101, 105-106, 116-119, 121-125: Diagramas del autor.
- 65-66: <https://royalsociety.org/journals/free-content/>.
- 67: Wikimedia Commons, CC BY Didier Descouens.
- 68: Foto del autor, con la amable autorización de Giovanna Orlacchio.
- 70: Diagrama del autor.
- 71, 73: Wikimedia Commons, CC BY P99am.
- 74: Con la amable autorización de los autores, a partir de Chen, Ji, Georg Schusteritsch, Chris J. Pickard, Christoph G. Salzmann, Angelos Michaelides, «Two dimensional ice from first principles : Structures and phase transitions», *Physical Review Letters*, 2016, 116 (2), 025501.
- 84: Con la amable autorización de Kenneth Libbrecht, a partir de Nakaya.
- 86: Nakaya, Ukitorô Toda, Yasuaki, Maruyama, Syûzô, «Further experiments on the artificial production of snow crystals», *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido Imperial University*, 30 mars 1938, série 2 «Physics», 2 (1), p. 13-57 (Con la autorización de la

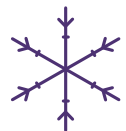
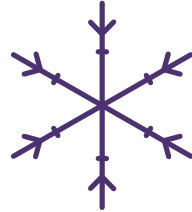
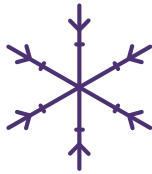
Hokkaido University Library).

- 87: Diagramas del autor, imágenes con la amable autorización de Kenneth Libbrecht, snowcrystals.com.
- 90: Wikimedia Commons, CC BY Jérôme Blum.
- 96-99, 101, 103-105: Diagramas del autor, con <https://community.wolfram.com/groups/-/m/t/235291>.
- 108-109, 138: Con la amable autorización de Martin Krzywinski, mkweb.bcgsc.ca.
- 110: Wikimedia Commons, CC BY Ad Meskens ; Wikimedia Commons, CC BY Iseeaboar ; Wikimedia Commons, CC BY SA BuildingTheFuture.
- 115: Smithsonian, <https://library.si.edu/digital-library/book/ioanniskeplerih00kepl>, con autorización.
- 118: Wikimedia Commons, CC BY Tomruen.
- 119: Wikimedia Commons, CC BY R. A. Nonenmacher.
- 120: Wikipédia Commons, CC BY EdPeggJr.
- 126: Wikipédia Commons, CC BYInductiveload. Wikipédia Commons, CC BY Nessaalk.
- 127: Con la amable autorización de Denis Gratias.
- 137: Wikimedia Commons, Snowflake par Urmansky (CC BY 4.0).
- 139: EMU Lab. us Dpt Agriculture (public domain).



Nieve bajo microscopio
electrónico







Esta primera edición de
La pequeña historia de los copos de nieve
se terminó de imprimir en
octubre de 2024, Santiago,
en los talleres de Eclipse Impresores.

