

## Encontrando patrones ocultos en el clima y en otros fenómenos complejos

*Los tres premiados comparten este año el Premio Nobel de Física por sus estudios sobre los fenómenos complejos. **Syukuro Manabe y Klaus Hasselmann** sentaron las bases de nuestro conocimiento del clima de la Tierra y la influencia de la humanidad en él. **Giorgio Parisi** es recompensado por sus revolucionarias contribuciones a la teoría de los fenómenos desordenados y aleatorios.*

Todos los sistemas complejos constan de muchas partes diferentes que interactúan. Han sido estudiados por los físicos durante un par de siglos y pueden ser difíciles de describir matemáticamente ya que pueden tener una enorme cantidad de componentes o estar gobernados por el azar. También pueden ser sistemas caóticos, como el clima, donde pequeñas desviaciones en los valores iniciales dan como resultado grandes diferencias en una etapa posterior. Todos los galardonados de este año han contribuido a que obtengamos un mayor conocimiento de dichos sistemas y su desarrollo a largo plazo.



El clima de la Tierra es uno de los muchos ejemplos de sistemas complejos. Manabe y Hasselmann reciben el Premio Nobel por su trabajo pionero en el desarrollo de modelos climáticos. Parisi es recompensado por sus soluciones teóricas a una amplia gama de problemas de sistemas complejos.

**Syukuro Manabe** demostró cómo el aumento de las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera conduce a un aumento de las temperaturas en la superficie de la Tierra. En la década de 1960, dirigió el desarrollo de modelos físicos del clima terrestre y fue la primera persona que exploró la interacción entre el balance de radiación y el transporte vertical de las masas de aire. Su trabajo sentó las bases para el desarrollo de modelos climáticos.

Aproximadamente diez años después, **Klaus Hasselmann** creó un modelo que vincula el tiempo y el clima, respondiendo así a la pregunta de por qué los modelos climáticos pueden ser confiables a pesar de que el clima es cambiante y caótico. También desarrolló métodos para identificar señales específicas, verdaderas huellas digitales, que tanto los fenómenos naturales como las actividades humanas imprimen en el clima. Sus métodos se han utilizado para demostrar que el aumento de temperatura en la atmósfera se debe a las emisiones humanas de dióxido de carbono.

Alrededor de 1980, **Giorgio Parisi** descubrió patrones ocultos en materiales complejos desordenados. Sus descubrimientos se encuentran entre las contribuciones más importantes a la teoría de sistemas complejos. Permiten comprender y describir muchos materiales y fenómenos complejos diferentes y aparentemente completamente aleatorios, no solo en la física sino también en otras áreas muy diferentes, como las matemáticas, la biología, la neurociencia y el aprendizaje automático.

## El efecto invernadero es vital para la vida

Hace doscientos años, el físico francés Joseph Fourier estudió el balance de energía entre la radiación del sol absorbida por el suelo y la irradiada. La atmósfera jugaba un importante papel en este equilibrio: en la superficie de la Tierra la radiación solar entrante se transforma en radiación saliente que es absorbido por la atmósfera, calentándola. Este efecto de la atmósfera se conoce como efecto invernadero. El nombre proviene de su similitud con lo que ocurre en los invernaderos, donde los cristales permiten el paso de los rayos del sol, atrapando el calor en el interior. Sin embargo, los procesos en la atmósfera son mucho más complicados.

La tarea sigue siendo la misma que emprendió Fourier: investigar el equilibrio entre la radiación solar de onda corta que llega a nuestro planeta y la radiación infrarroja de onda larga que sale de la Tierra. Los detalles fueron facilitados por muchos estudiosos del clima durante los siguientes dos siglos. Los modelos climáticos contemporáneos son herramientas increíblemente poderosas, no solo para comprender el clima, sino también para comprender el calentamiento global del que son responsables los humanos.

Los modelos se basan en las leyes de la Física y se han desarrollado a partir de otros que se utilizaron para predecir el clima. El tiempo se describe mediante medidas como la temperatura, las precipitaciones, el viento o las nubes, y se ve afectado por lo que sucede en los océanos y en la tierra. Los modelos climáticos

se basan en datos estadísticos del clima, como valores promedio, desviaciones estándar, valores máximos y mínimos medidos, etc. No podemos predecir qué tiempo hará en Estocolmo el 10 de diciembre del próximo año, pero podemos hacernos una idea de qué temperatura o cuánta lluvia podemos esperar en promedio en Estocolmo en ese mes.

## **El papel del dióxido de carbono**

El efecto invernadero es fundamental para la vida en la Tierra. Regula la temperatura porque los gases de efecto invernadero en la atmósfera (dióxido de carbono, metano, vapor de agua y otros) absorben primero la radiación infrarroja de la Tierra y luego liberan la energía absorbida, calentando el aire circundante y el suelo debajo de ella.

En realidad, los gases de efecto invernadero representan una proporción muy pequeña de la atmósfera seca de la Tierra, que consta, principalmente, de nitrógeno y oxígeno en un 99% en volumen. El dióxido de carbono es solo el 0,04 % en volumen. El gas con un efecto invernadero más poderoso es el vapor de agua, pero queda fuera de nuestro alcance controlar la concentración de vapor de agua en la atmósfera, mientras que sí podemos controlar la de dióxido de carbono.

La cantidad de vapor de agua en la atmósfera depende en gran medida de la temperatura, lo que genera un mecanismo de retroalimentación. Más dióxido de carbono en la atmósfera la calienta, lo que permite que se retenga más vapor de agua en el aire, lo que aumenta el efecto invernadero y hace que las temperaturas aumenten aún más. Si el nivel de dióxido de carbono baja, parte del vapor de agua se condensará y la temperatura bajará.

Una primera pieza importante del rompecabezas sobre el impacto del dióxido de carbono provino del investigador sueco, y premio Nobel, Svante Arrhenius. Por cierto, fue su colega, el meteorólogo Nils Ekholm, quien, en 1901, fue el primero en utilizar la palabra invernadero para describir la acumulación de calor en la atmósfera.

Arrhenius, a finales del s. XIX, conocía la física responsable del efecto invernadero.

La energía emitida por un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta ( $T^4$ ). Por otro lado, cuanto más caliente sea la fuente de radiación, más corta será la longitud de onda de los rayos emitidos. El Sol tiene una temperatura superficial de 6000 °C y emite, principalmente, rayos en el espectro visible. La Tierra, con una temperatura superficial de solo 15 °C, irradia radiación infrarroja que es invisible para nosotros. Si la atmósfera no absorbiera esta radiación, la temperatura de la superficie apenas superaría los -18 °C.

Arrhenius en realidad estaba tratando de averiguar qué efecto había causado el enfriamiento de la Tierra durante los periodos glaciales, fenómeno descubierto en esa época. Concluyó que, si el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera se reducía a la mitad, sería suficiente para que la Tierra entrara en una nueva era de hielo. Y viceversa: una duplicación de la cantidad de dióxido de carbono aumentaría la temperatura entre 5 y 6 °C, un resultado que, de manera algo fortuita, se acerca asombrosamente a las estimaciones actuales.

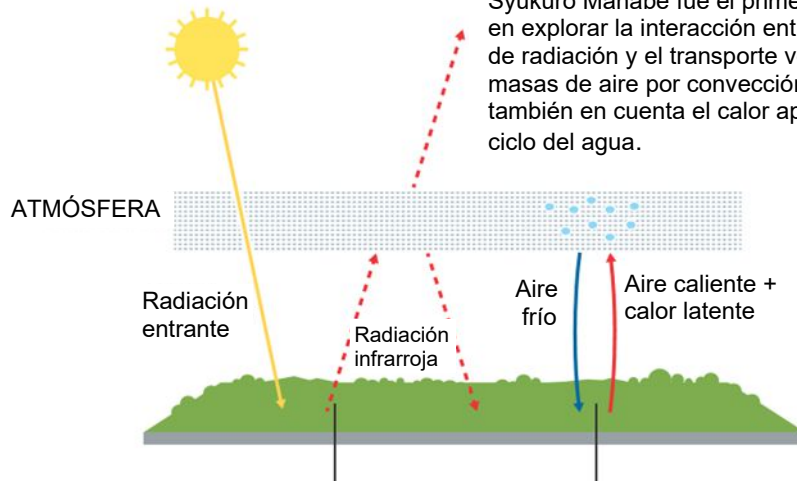
## **Un modelo pionero para el efecto del dióxido de carbono**

En la década de 1950, el físico japonés Syukuro Manabe fue uno de los jóvenes y talentosos investigadores que abandonaron Japón, que había sido devastado por la guerra, y continuaron sus carreras en los Estados Unidos. El objetivo de la investigación de Manabe, como la de Arrhenius unos setenta años antes, era comprender cómo el aumento de los niveles de dióxido de carbono puede provocar un aumento de las temperaturas. Sin embargo, mientras Arrhenius se había centrado en el balance de radiación, en la década de 1960 Manabe lideró el trabajo en el desarrollo de modelos físicos para incorporar el transporte vertical de masas de aire debido a la convección, así como el calor latente del vapor de agua.

Para que estos cálculos fueran manejables, redujo el modelo a una dimensión: una columna vertical de 40 km de aire atmosférico. Aun así, fueron necesarias cientos de valiosas horas de computación para probar el modelo variando los niveles de gases en la atmósfera. El oxígeno y el nitrógeno tuvieron efectos insignificantes en la temperatura de la superficie, mientras que el dióxido de carbono tuvo un impacto claro: cuando el nivel de dióxido de carbono se duplicó, la temperatura global aumentó en más de 2 °C.

### Modelo climático de Manabe

Syukuro Manabe fue el primer investigador en explorar la interacción entre el balance de radiación y el transporte vertical de masas de aire por convección, teniendo también en cuenta el calor aportado por el ciclo del agua.

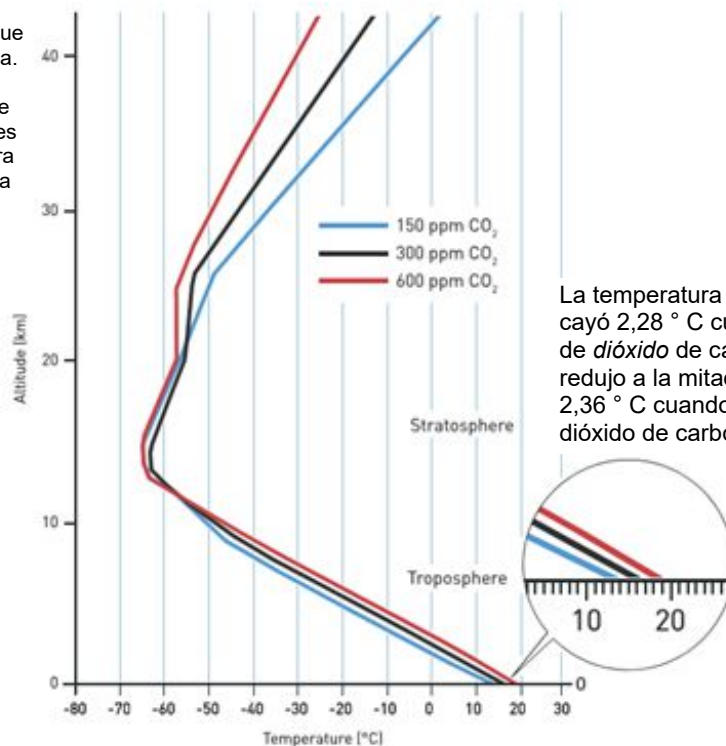


La radiación infrarroja proveniente del suelo se absorbe parcialmente en la atmósfera, calentando el aire y el suelo, mientras que parte se irradia al espacio.

El aire caliente es más ligero que el aire frío, por lo que se eleva por convección. También transporta vapor de agua, que es un potente gas de efecto invernadero. Cuanto más cálido esté el aire, mayor será la concentración de vapor de agua. Más arriba, donde la atmósfera es más fría, se forman gotas de agua líquida que liberan el calor latente almacenado en el vapor de agua.

### El dióxido de carbono calienta la atmósfera

Niveles elevados de dióxido de carbono conducen a temperaturas más altas en la atmósfera inferior, mientras que la atmósfera superior se enfría. Manabe confirmó así que la variación en la temperatura se debe al aumento de los niveles de dióxido de carbono; si fuera causado por un aumento de la radiación solar, toda la atmósfera debería haberse calentado.



La temperatura en la superficie cayó 2,28 ° C cuando el nivel de dióxido de carbono se redujo a la mitad. Aumentó en 2,36 ° C cuando el nivel de dióxido de carbono se duplicó.

Source: Manabe and Wetherald [1967] Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity, *Journal of the atmospheric sciences*, Vol. 24, Nr 3, May.

El modelo confirmó que este calentamiento se debió al aumento de dióxido de carbono, pues predijo un aumento de las temperaturas más cerca del suelo mientras que la atmósfera superior se enfrió. Si las variaciones en la radiación solar fueran responsables del aumento de temperatura, toda la atmósfera debería haberse calentado al mismo tiempo.

Hace sesenta años, las computadoras eran cientos de miles de veces más lentas de las actuales, por lo que este modelo era relativamente simple, pero Manabe había dado con la clave. En sus palabras: siempre debes simplificar. No se puede competir con la complejidad de la naturaleza: hay tanta física involucrada en cada gota de lluvia que nunca sería posible calcular absolutamente todo. Los conocimientos del modelo unidimensional llevaron a un modelo climático en tres dimensiones, que Manabe publicó en 1975; este fue otro hito en el camino hacia la comprensión de los secretos del clima.

### **El clima es caótico**

Aproximadamente diez años después de Manabe, Klaus Hasselmann logró vincular el tiempo y el clima al encontrar una manera de burlar los rápidos y caóticos cambios climáticos, tan problemáticos para los cálculos. Nuestro planeta tiene grandes cambios en su clima debido a que la radiación solar está distribuida de manera desigual, tanto geográficamente como a lo largo del tiempo. La Tierra es redonda, por lo que hay menos insolación en las latitudes más altas que en las más bajas, alrededor del Ecuador. Además, el eje de la Tierra está inclinado, lo que produce diferencias estacionales en la radiación entrante. Las diferencias de densidad entre el aire más cálido y el más frío provocan colosales transportes de calor entre diferentes latitudes, entre el océano y la tierra, entre masas de aire más altas y más bajas, que gobiernan el clima en nuestro planeta.

Como todos sabemos, hacer predicciones fiables sobre el tiempo por un periodo superior a los próximos diez días es un desafío. Hace doscientos años, el renombrado científico francés, Pierre-Simon de Laplace, afirmó que, si conociéramos la posición y la velocidad de todas las partículas del universo, sería posible calcular, tanto lo que ha sucedido, como lo que sucederá. En principio, esto debería ser cierto; las leyes del movimiento de Newton, con tres siglos de antigüedad, que también describen el transporte en la atmósfera, son completamente deterministas: no se rigen por el azar.

Sin embargo, esto es completamente falso en lo que respecta al clima. En la práctica, es imposible ser lo suficientemente preciso a la hora de establecer la temperatura del aire, la presión, la humedad o las condiciones del viento para cada punto de la atmósfera. Además, las ecuaciones no son lineales; pequeñas desviaciones en los valores iniciales pueden hacer que un sistema evolucione de formas completamente diferentes. Es lo que se conoce con el nombre de "efecto mariposa": una mariposa batiendo las alas en Brasil puede causar un tornado en Texas. En la práctica, esto significa que es imposible realizar pronósticos meteorológicos a largo plazo: el tiempo es caótico; este descubrimiento fue realizado en la década de 1960 por el meteorólogo estadounidense Edward Lorenz, quien sentó las bases de la teoría del caos actual.

### **Dando sentido a datos confusos**

¿Cómo podemos producir modelos climáticos confiables para varias décadas o cientos de años, a pesar de que el clima es un ejemplo clásico de un sistema caótico? Alrededor de 1980, Klaus Hasselmann demostró cómo los fenómenos meteorológicos, caóticamente cambiantes, pueden describirse, dando así a los pronósticos climáticos a largo plazo una base científica sólida. Además, desarrolló métodos para identificar el impacto humano en la temperatura global observada.

Cuando en la década de 1950 era un joven estudiante de doctorado en física en Hamburgo, Alemania, Hasselmann trabajó en dinámica de fluidos y luego comenzó a desarrollar observaciones y modelos teóricos de las olas y corrientes oceánicas. Se mudó a California y continuó con la oceanografía, conociendo a científicos como Charles David Keeling. Keeling es conocido por comenzar, en 1958, lo que ahora es la serie más larga de mediciones de dióxido de carbono atmosférico en el Observatorio de Mauna Loa en Hawai. Entonces Hasselmann aún no sabía que en su trabajo posterior usaría regularmente la curva de Keeling, que muestra los cambios en los niveles de dióxido de carbono.

La obtención de un modelo climático a partir de datos meteorológicos se puede ilustrar paseando a un perro: el perro corre, atado a la correa, hacia atrás y hacia adelante, de un lado a otro y alrededor de tus piernas. ¿Cómo puedes saber por sus huellas si estás caminando o parado? ¿O si caminas rápido o lento? Las huellas de los perros son los cambios en el clima y tu paseo es el clima calculado. ¿Es posible sacar conclusiones sobre las tendencias a largo plazo del clima utilizando datos meteorológicos caóticos?

Una dificultad adicional es que las fluctuaciones que influyen en el clima son extremadamente variables: pueden ser rápidas, como la fuerza del viento o la temperatura del aire, o muy lentas, como el derretimiento de las capas de hielo y el calentamiento de los océanos. Por ejemplo el calentamiento uniforme de solo un

grado puede llevar mil años para el océano, pero solo unas pocas semanas para la atmósfera. El truco decisivo fue incorporar los cambios rápidos a los cálculos y mostrar cómo afectan al clima.

Hasselmann creó un modelo climático estocástico, lo que significa que el azar está integrado en el modelo. Su inspiración provino de la teoría del movimiento browniano de Albert Einstein. Usando esta teoría, Hasselmann demostró que cambios rápidos en la atmósfera puede causar variaciones lentas en el océano.

### Identificando las huellas del impacto humano

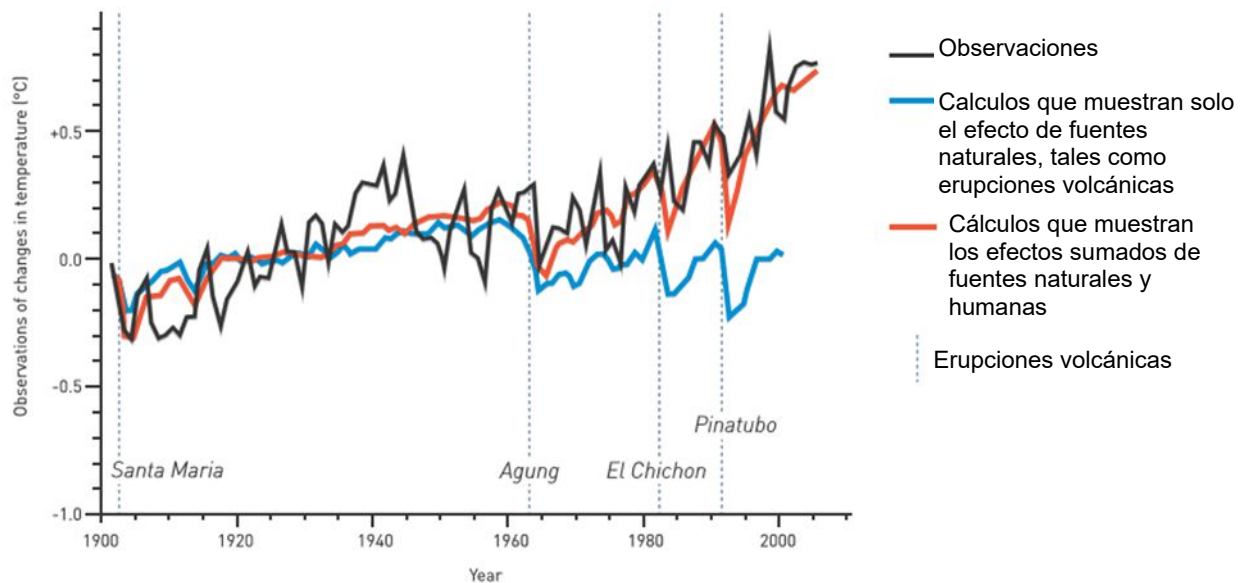
Una vez terminado el modelo de variaciones climáticas, Hasselmann desarrolló métodos para identificar el impacto humano en el sistema climático. Encontró que los modelos, junto con las observaciones y las consideraciones teóricas, contienen importante información. Por ejemplo, los cambios en la radiación solar, las partículas volcánicas o los niveles de gases de efecto invernadero dejan señales, verdaderas huellas dactilares, que pueden identificarse. Este método de identificación también se puede aplicar al efecto que los humanos tienen en el sistema climático. Hasselmann abrió así el camino a nuevos estudios sobre el cambio climático, que han mostrado rastros del impacto humano en el clima utilizando un gran número de observaciones independientes.

Los modelos climáticos se han perfeccionado cada vez más a medida que los procesos incluidos en las complicadas interacciones del clima se mapean más a fondo, sobre todo a través de mediciones satelitales y observaciones meteorológicas. Los modelos muestran claramente un efecto invernadero acelerado; desde mediados del siglo XIX, los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera han aumentado en un 40 %. La atmósfera de la Tierra no ha contenido tanto dióxido de carbono en cientos de miles de años. En consecuencia, las mediciones de temperatura muestran que el mundo se ha calentado 1° C durante los últimos 150 años.

Syukuro Manabe y Klaus Hasselmann han beneficiado a la humanidad, en el espíritu de Alfred Nobel, al proporcionar una base física sólida para nuestro conocimiento del clima de la Tierra. Ya no podemos decir que no lo sabíamos, los modelos climáticos son inequívocos. ¿Se está calentando la Tierra? Sí. ¿Es la causa el aumento de la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera? Sí, ¿se puede explicar esto únicamente por factores naturales? No. ¿Son las emisiones de la humanidad la razón del aumento de temperatura? Si.

### Identificación de huellas dactilares en el clima

Klaus Hasselmann desarrolló métodos para distinguir entre causas naturales y humanas (huellas dactilares) del calentamiento atmosférico. Comparación entre los cambios en la temperatura media en relación con el promedio de 1901-1950 (° C).



Source: Hegerl and Zweirs (2011) Use of models in detection & attribution of climate change, *WIREs Climate Change*.

## Métodos para sistemas desordenados.

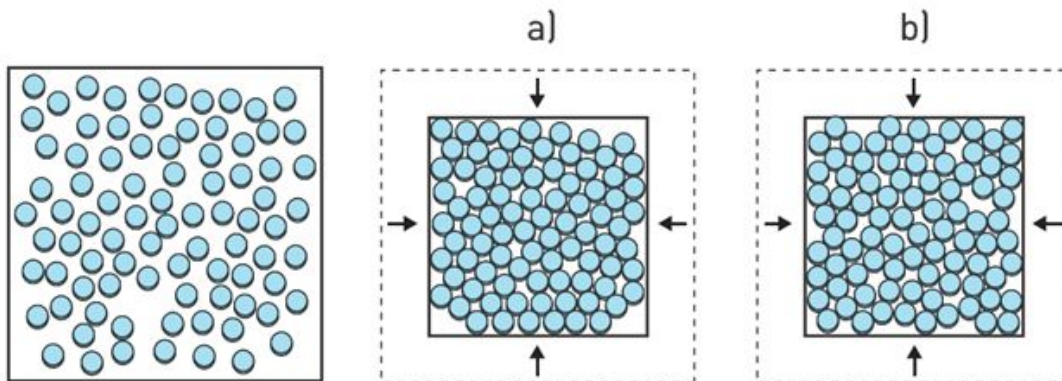
Alrededor de 1980, Giorgio Parisi presentó sus descubrimientos sobre cómo los fenómenos aparentemente aleatorios se rigen por reglas ocultas. Su trabajo se considera ahora una de las contribuciones más importantes a la teoría de sistemas complejos.

Los estudios modernos de sistemas complejos tienen sus raíces en la mecánica estadística desarrollada en la segunda mitad del siglo XIX por James C. Maxwell, Ludwig Boltzmann y J. Willard Gibbs. La mecánica estadística evolucionó a partir de la idea de que un nuevo método era necesario para describir sistemas, como los gases o los líquidos, que constan de un gran número de partículas. Este método tenía que tener en cuenta los movimientos aleatorios de las partículas, por lo que la idea básica era calcular el efecto promedio de las partículas en lugar de estudiar cada partícula individualmente. Por ejemplo, la temperatura de un gas es una medida del valor medio de la energía de las partículas de gas. La mecánica estadística tuvo un gran éxito, porque proporcionó una explicación microscópica de las propiedades macroscópicas en gases y líquidos, como la temperatura y la presión.

Las partículas de un gas se pueden considerar como pequeñas bolitas con velocidades que aumentan con la temperatura. Cuando la temperatura baja o la presión aumenta, las partículas primero se condensan formando un líquido y luego un sólido. Este sólido suele ser un cristal, en el que las partículas se organizan en un patrón regular. Sin embargo, si este cambio ocurre rápidamente, las partículas pueden formar un patrón irregular que no cambia, aunque el líquido se enfríe más o se comprima. Si se repite el experimento, las partículas se organizarán según un patrón distinto, a pesar de que el cambio ocurra exactamente de la misma manera. ¿Por qué?

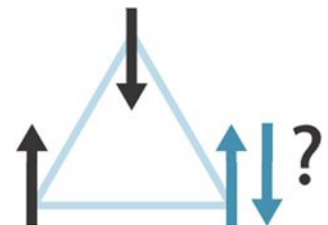
## Matemáticas para sistemas complejos desordenados

Cada vez que muchos discos idénticos se aprietan, se forma un nuevo patrón irregular a pesar de que el proceso utilizado para juntarlos sea exactamente el mismo. ¿Qué es lo que condiciona el resultado? Giorgio Parisi descubrió una estructura oculta en los sistemas complejos desordenados representados por estos discos y encontró una forma de describirlos matemáticamente.



## Entendiendo la complejidad

Estas bolas comprimidas son un modelo simple para el vidrio ordinario y para materiales granulares, como la arena o la grava. Sin embargo, el tema del trabajo original de Parisi era un tipo diferente de sistema: los llamados vídrios de spin (spin glass), un tipo especial de aleación en el que los átomos de hierro, por ejemplo, se colocan aleatoriamente en una rejilla de átomos de cobre. Aunque solo haya unos pocos átomos de hierro, las propiedades magnéticas del material cambian de una manera radical y desconcertante. Cada



## Frustración

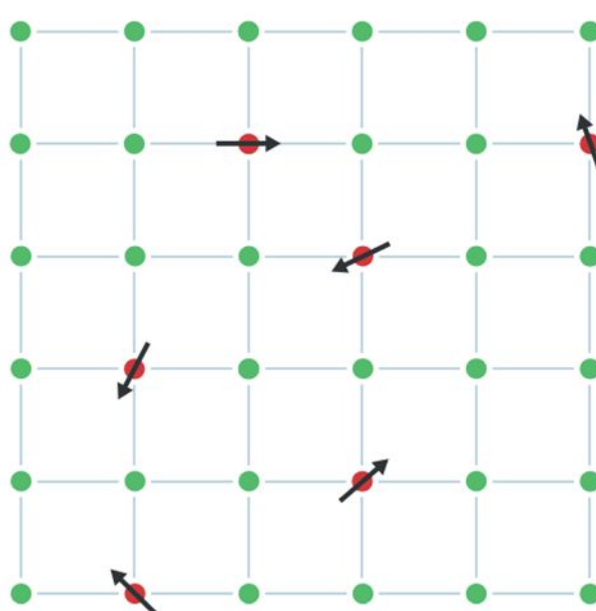
Cuando el spin de un átomo apunta hacia arriba y el del vecino hacia abajo, ¿qué orientación tomará el de un tercero, considerando que los spines han de ser antiparalelos? Giorgio Parisi es un maestro en responder estas preguntas para muchos materiales y fenómenos diferentes.

átomo de hierro se comporta como un pequeño imán que se ve afectado por los átomos de hierro cercanos a él. En un imán ordinario, todos los spines de los átomos apuntan en la misma dirección, pero en un spin glass no sucede así; algunos espines apuntan en la misma dirección y otros en la dirección opuesta, entonces, ¿qué es lo que determina esta orientación?

En la introducción a su libro sobre los spin glass, Parisi escribe el estudio de estos sistemas es como contemplar las tragedias de las obras de Shakespeare. Si quieres hacerte amigo de dos personas al mismo tiempo, pero estas se odian, puede ser frustrante. ¿Cómo se puede minimizar la tensión cuando amigos y enemigos se encuentran?

Los spin glass y sus exóticas propiedades proporcionan un modelo para sistemas complejos. En la década de 1970, muchos físicos, incluidos varios premios Nobel, buscaron una forma de describir los misteriosos spin glasses. Utilizaron el *truco de las réplicas*, una técnica matemática en la que se procesan muchas copias, o réplicas, del sistema al mismo tiempo. Sin embargo, en términos físicos, los resultados de los cálculos originales eran inviables.

En 1979, Parisi hizo un avance decisivo al demostrar cómo el truco de las réplicas podía usarse para resolver un problema de spin glasses. Descubrió una estructura oculta en las réplicas y encontró una manera de describirla matemáticamente. Se necesitaron muchos años para que la solución de Parisi demostrara ser matemáticamente correcta. Desde entonces, su método se ha utilizado en muchos sistemas desordenados y se ha convertido en una de las piedras angulares de la teoría de sistemas complejos.



### Spin glass

Un spin glass es una aleación donde átomos de hierro, por ejemplo, se colocan aleatoriamente en una rejilla de átomos de cobre. Cada átomo de hierro se comporta como un pequeño imán, que se ve afectado por los otros imanes que lo rodean. Sin embargo, en un spin glass hay problemas en la orientación de los spines. Usando sus estudios sobre los spin glass, Parisi desarrolló una teoría de fenómenos desordenados y aleatorios que puede ser empleada en muchos otros sistemas complejos.

- Hierro
- Cobre

### Los frutos de la frustración son muchos y variados.

Tanto el spin glass como los materiales granulares son ejemplos de sistemas *frustrados*, en los que varios componentes deben organizarse de tal manera que se alcance un compromiso entre fuerzas contrarias. La pregunta es cómo se comportan y cuáles son los resultados. Parisi es un maestro en responder estas preguntas para muchos fenómenos y materiales. Sus descubrimientos fundamentales sobre la estructura de los spin glasses fueron tan profundos que no solo influyeron en la física, sino también en las matemáticas, la biología, la neurociencia y el aprendizaje automático, porque todos estos campos incluyen problemas que están directamente relacionados.

Parisi también ha estudiado muchos otros fenómenos en los que los procesos aleatorios juegan un papel decisivo a la hora de crear estructuras y cómo se desarrollan, y ha abordado preguntas como: ¿Por qué fenómenos como las edades de hielo se repiten periódicamente? ¿Existe una descripción matemática más general del caos y los sistemas turbulentos? O, ¿cómo surgen patrones en una bandada de miles de estorninos? Estas preguntas pueden parecer muy alejadas de los spin glasses, sin embargo, las investigaciones de Parisi han aclarado cómo los comportamientos simples dan lugar a comportamientos colectivos complejos, y esto se aplica tanto a los spin glasses como a los estorninos.

## OTRAS LECTURAS

Información adicional sobre los premios de este año, incluyendo referencias científicas en inglés, está disponible en el sitio web de la Real Academia de Ciencias de Suecia, [www.kva.se](http://www.kva.se), y en [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org), se puede ver el vídeo de las conferencias de prensa para obtener información adicional sobre los premios de este año, las conferencias Nobel y otros. La información sobre exposiciones y actividades relacionadas con los Premios Nobel y el Premio de Ciencias Económicas está disponible en [www.nobelprizemuseum.se](http://www.nobelprizemuseum.se)

La Real Academia de Ciencias de Suecia ha decidido otorgar el Premio Nobel de Física 2021

*"Por sus innovadoras contribuciones a la comprensión de los sistemas físicos complejos"*

Una mitad conjunatmente a		y la otra mitad a
<b>SYUKURO MANABE</b>	<b>KLAUS HASSELMANN</b>	<b>GIORGIO PARISI</b>
<i>Nacido en 1931 en Shingu, Japón. Ph.D. 1957 por la University of Tokyo, Japan. Senior Meteorologist at Princeton University, USA.</i>	<i>Nacido en 1931 en Hamburgo, Alemania. Ph.D. 1957 from University of Göttingen, Germany. Professor, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany.</i>	<i>Nacido en 1948 en Roma. Italia. Ph.D. 1970 from Sapienza University of Rome, Italy. Professor at Sapienza University of Rome, Italy.</i>
<i>"Por el modelado del clima de la Tierra, cuantificando la variabilidad y prediciendo de manera confiable el calentamiento global"</i>		<i>"Por el descubrimiento de la interacción del desorden y las fluctuaciones en los sistemas físicos desde la escala atómica hasta la planetaria"</i>