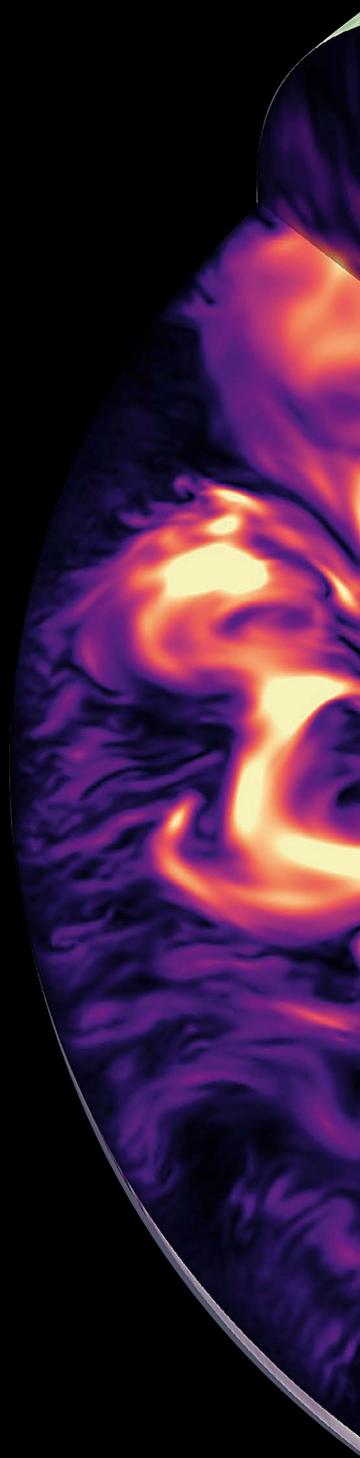


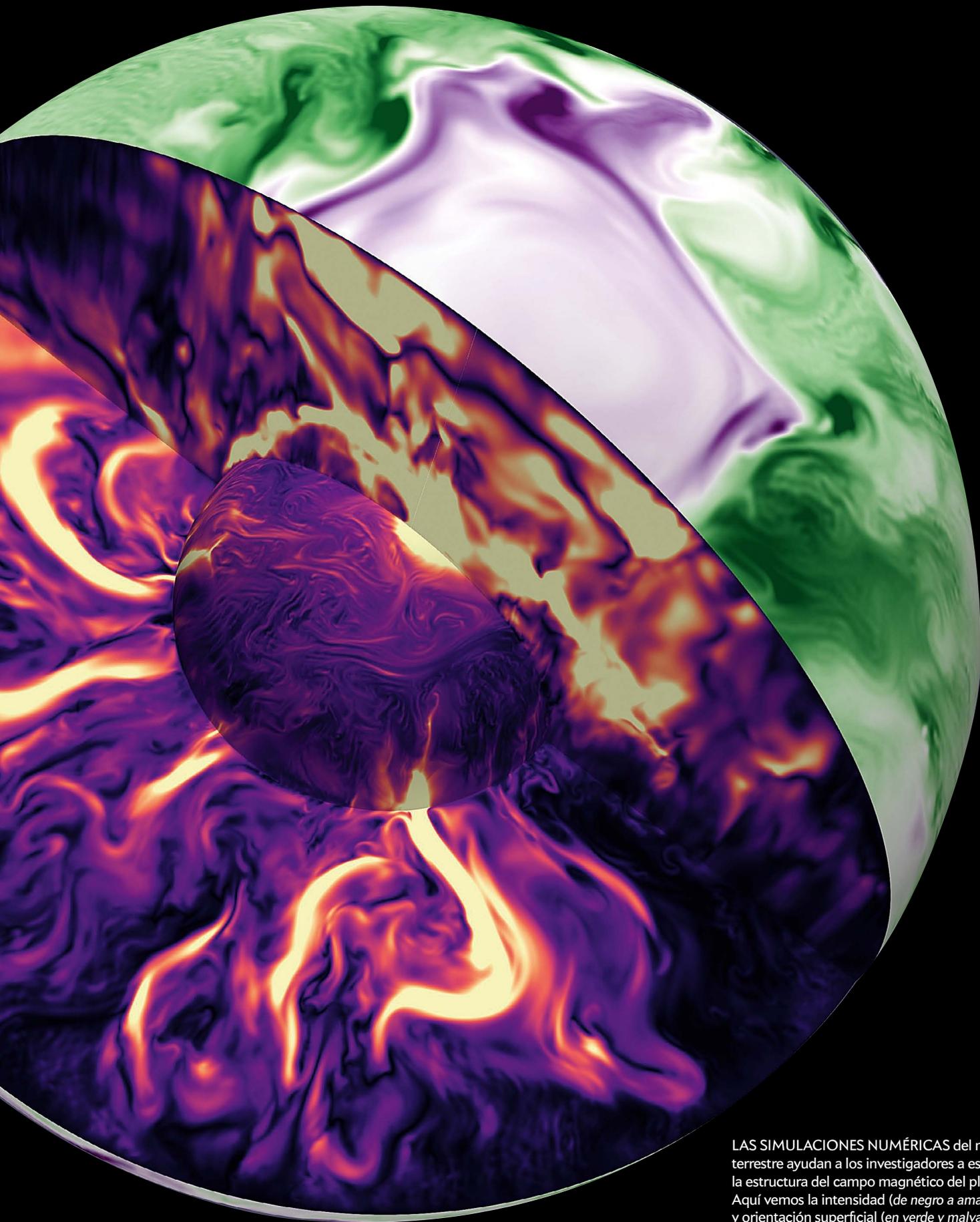
GEOFÍSICA

La dinamo terrestre, un desafío centenario

Hace cien años, Joseph Larmor propuso que el campo magnético de la Tierra se debía a un efecto dinamo generado por el movimiento del hierro líquido en el núcleo del planeta. Cálculos teóricos, simulaciones y experimentos parecen confirmarlo

Emmanuel Dormy





LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS del núcleo terrestre ayudan a los investigadores a estudiar la estructura del campo magnético del planeta. Aquí vemos la intensidad (de negro a amarillo) y orientación superficial (en verde y malva) del campo magnético en un modelo del núcleo.

Emmanuel Dormy es director de investigación del Centro Nacional de Investigación Científica de Francia en la Escuela Normal Superior de París y profesor en la Escuela Politécnica de Palaiseau.



TODOS HEMOS JUGADO ALGUNA VEZ CON UNA BRÚJULA. ES UNA EXPERIENCIA SIMPLE pero fascinante. La aguja se orienta sistemáticamente en una dirección privilegiada, el «norte». Al desviarla, oscila y recupera su posición inicial, y si la acercamos a un imán, fluctúa de manera rápida y termina por orientarse hacia él. Estos fenómenos no dejan de sorprendernos y despertar nuestra curiosidad científica. En su autobiografía, Albert Einstein escribió que, a la edad de cuatro o cinco años, estando enfermo, su padre le regaló una brújula. El objeto lo cautivó: «El que la aguja se comportara de una forma tan precisa sin que nadie la tocara no encajaba dentro de mis esquemas de comprensión del mundo [...] Recuerdo, o creo recordar, que aquel suceso dejó en mí una impresión honda y duradera. Tenía que haber un orden oculto tras la apariencia de las cosas». Este afán por comprender llevó al joven Einstein a realizar descubrimientos espectaculares. Pero ¿qué se esconde tras esa brújula tan fascinante?

En el siglo IV antes de nuestra era, los chinos ya usaban un «indicador del sur» para orientarse (las brújulas chinas indicaban esa dirección). En la época Han, las brújulas consistían en cucharas de magnetita (un óxido de hierro que presenta imanación permanente) con el mango apuntando al sur. Hay que esperar hasta el siglo XI para encontrar las primeras referencias al uso de brújulas en navegación. Más tarde, la innovación técnica se extendería a Europa, donde se menciona por primera vez en la obra *De naturis rerum*, escrita alrededor de 1190 por el filósofo inglés Alexander Neckam.

Hoy sabemos que la orientación de la brújula guarda relación con la existencia de un campo magnético global a escala planetaria. Sin embargo, el origen de ese campo fue un misterio durante mucho tiempo e intrigó a numerosos eruditos, como René Descartes, Edmond Halley o André-Marie Ampère. Pero hace poco más de cien años, en 1919, el británico Joseph Larmor sentó las bases que explican el campo magnético de nuestro planeta. Desde entonces, nuestra comprensión de la dinamo terrestre ha avanzado notablemente gracias a esfuerzos tanto teóricos y matemáticos como experimentales y numéricos.

El interés de estudiar la dinamo terrestre no se limita a la Tierra. Otros planetas, las estrellas e incluso las galaxias poseen campos magnéticos con mecanismos subyacentes similares. Por lo tanto, la Tierra constituye un buen modelo para comprender este fenómeno complejo.

LA TIERRA, ¿UN IMÁN GIGANTE?

Los primeros experimentos sistemáticos sobre el campo magnético terrestre se atribuyen a William Gilbert, astrónomo inglés que hacia 1600 trató de esclarecer la causa de la alineación de las brújulas. Lo más natural sería suponer que la Tierra alberga en su centro un enorme imán; de este modo, las líneas del campo magnético emergerían de la superficie en el hemisferio sur, ascendiendo hacia el hemisferio norte a lo largo de los meridianos antes de volver a sumergirse en el planeta. A fin de verificar esta hipótesis, el erudito inglés concibió un imán esférico al que denominó *terrella* («pequeña Tierra», en latín). Al aproximar una brújula, la aguja apuntaba hacia el polo norte de la esfera. También reparó en el hecho de que la aguja no permanecía horizontal con respecto al suelo, sino que se inclinaba al señalar el norte.

EN SÍNTESIS

Los movimientos en el núcleo de hierro líquido de la Tierra producen un efecto dinamo que constituye el origen del campo magnético del planeta.

Aunque Joseph Larmor explicó las claves de este mecanismo hace ya cien años, sigue constituyendo un área activa de investigación en la frontera entre la geofísica, las matemáticas y la física experimental.

Los futuros experimentos servirán para comprender mejor los procesos que generan el campo magnético terrestre y la dinámica de la inversión de los polos.

Representar el campo magnético

La fuerza que orienta la brújula actúa a distancia, sin estar en contacto con la aguja. Aunque pueda parecer misterioso, es lo mismo que ocurre con la fuerza gravitatoria cuando saltamos en el aire. Esto nos sorprende menos porque experimentamos la gravedad desde nuestra infancia.

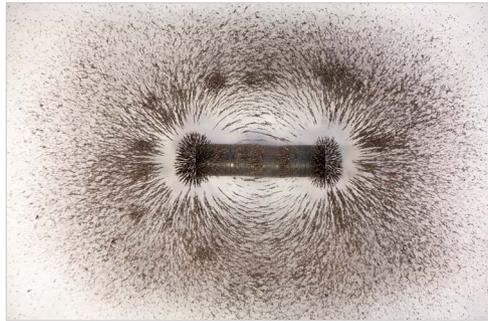
El paralelismo entre la gravedad y el magnetismo no acaba aquí. Para estudiar ambas fuerzas, empleamos la noción de campo. Un campo indica la intensidad de una magnitud en todos los puntos del espacio, como la temperatura o la velocidad del viento en un mapa meteorológico. Para el viento también hay que especificar una dirección, por lo que recurrimos a un campo vectorial. Lo mismo ocurre con el campo gravitatorio: hay que señalar en qué dirección actúa la fuerza en cada

punto (hacia el centro de la Tierra, simplificando). En el caso del campo magnético, la dirección del vector indica hacia dónde se orientaría una brújula imaginaria situada en ese punto, mientras que su longitud representa la intensidad de la fuerza.

La intensidad de la gravedad disminuye a medida que nos alejamos de la Tierra, mientras que en la superficie

es aproximadamente constante. Podemos medirla desplazando un péndulo de su posición de equilibrio. Si la amplitud de las oscilaciones no es demasiado grande, el período solo depende de la longitud del péndulo y de la aceleración local de la gravedad (el éxito de los relojes de péndulo en el siglo XIX se basó en este hecho).

Del mismo modo, al separar la aguja de la brújula de su posición de equilibrio, oscila con un período que depende de la intensidad local del campo magnético: cuanto mayor sea esta, más rápido se moverá la aguja. Así es como Carl Friedrich Gauss efectuó las primeras medidas de la intensidad del campo magnético terrestre en 1832. Para un pequeño imán, podemos visualizar el campo magnético con la ayuda de limaduras de hierro (*imagen*).



Pero, si bien la idea de un imán gigante (es decir, un dipolo magnético con un polo sur y un polo norte) explica el comportamiento de una brújula, el modelo resulta demasiado simple y no da cuenta de las variaciones del campo magnético terrestre a lo largo del tiempo. En efecto, en 1634, Henry Gellibrand, profesor de astronomía del Colegio Gresham de Londres, demostró que el polo norte magnético señalado por la brújula (que hoy correspondería, aproximadamente, al polo sur del dipolo) se desplazaba. Había medido una declinación (el ángulo entre el polo norte magnético y el polo norte geográfico definido por el eje de rotación de la Tierra) de 4,1 grados hacia el este. Sin embargo, las medidas de sus predecesores indicaban una declinación de 6 grados este en 1622 y de 11,3 grados este en 1580. Asumiendo que esos datos eran fiables, Gellibrand concluyó que el campo magnético terrestre evolucionaba con el tiempo, a diferencia del generado por un dipolo simple.

La segunda razón que permite excluir la posibilidad de un imán gigante es más fundamental. Desde que Pierre Curie presentó su tesis doctoral en 1895, sabemos que, por encima de una cierta «temperatura de Curie» (que por lo general es de varios cientos de grados), los materiales ferromagnéticos como la magnetita pierden su imanación permanente a causa de la agitación térmica. Sin embargo, en el interior de la Tierra la temperatura aumenta rápidamente con la profundidad (lo que se conoce como «gradiente geotérmico») y se estima que en el núcleo es de varios miles de grados, muy por encima de la temperatura de Curie del hierro. Es imposible que exista un imán permanente en tales condiciones.

Entonces, ¿de dónde procede el campo magnético terrestre? En el siglo XIX, Ampère propuso una nueva idea basada en los experimentos de Hans Christian Ørsted, que en 1820 había descubierto una relación entre la electricidad y el magnetismo. El físico danés demostró que, al hacer circular una corriente

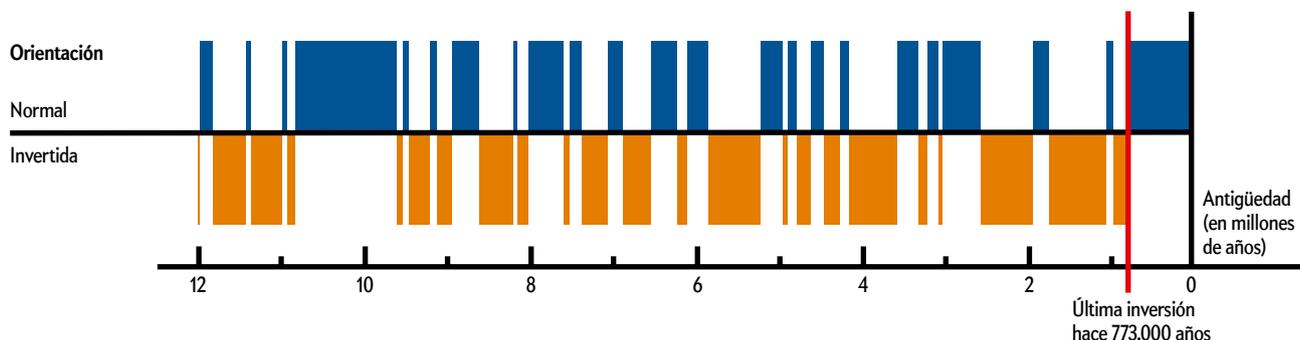
eléctrica en un conductor, la aguja de una brújula cercana se desviaba: las corrientes eléctricas producen campos magnéticos. Dos años más tarde, Ampère postuló que el magnetismo terrestre estaba vinculado a corrientes eléctricas en el interior de la Tierra: «La idea más simple, y que se le ocurriría de inmediato a cualquiera que quisiera explicar la dirección constante de la aguja, ¿no sería admitir que en la Tierra existe una corriente eléctrica [...] perpendicular al meridiano magnético?». Sin embargo, aún faltaba determinar el origen de dicha corriente.

¿Podía tratarse de una corriente momentánea? Según los cálculos, una corriente eléctrica no alimentada se disiparía en forma de calor en unos diez mil años debido a la resistividad eléctrica del planeta. Sin embargo, los registros geológicos demuestran que la Tierra posee un campo magnético desde hace miles de millones de años.

Esos registros consisten en coladas volcánicas que contienen minerales de hierro, como la magnetita. Al enfriarse el flujo, produce rocas cuya imanación se orienta en la dirección del campo magnético de la época y lugar en que se produjo la colada (en los sedimentos de los fondos lacustres ocurre un mecanismo análogo). En 1906, el geofísico francés Bernard Brunhes halló algo sorprendente: las coladas sucesivas en un mismo emplazamiento indicaban que el norte geomagnético en ocasiones estaba próximo al norte geográfico, y en otras, al sur geográfico. Acababa de descubrir las inversiones del campo magnético terrestre. Aunque tuvo que pasar más de medio siglo para que toda la comunidad científica aceptara su hallazgo, hoy es una idea bien asentada: el campo magnético de la Tierra se ha invertido en múltiples ocasiones a lo largo de su historia.

EL VALS DEL CAMPO MAGNÉTICO

Tales inversiones se producen de forma irregular. Aunque, en promedio, los períodos duran cientos de miles de años, el planeta



EL CAMPO MAGNÉTICO DE LA TIERRA se ha invertido en muchas ocasiones a lo largo de la historia. El polo norte del imán terrestre se encuentra unas veces cerca del polo norte geográfico y otras cerca del polo sur geográfico. Esta última configuración es la actual, y nos referimos a ella como «normal». El estudio de las rocas volcánicas permite establecer la cronología de las épocas en las que el campo presentaba una orientación normal (azul) o invertida (naranja).

también ha conocido épocas de más de 30 millones de años sin inversión. La última tuvo lugar hace 773.000 años. La duración de una inversión puede determinarse, o bien por la lenta disminución de intensidad magnética que la precede, o bien por el cambio de dirección, que es más rápido. En 2012, el equipo de Jean-Pierre Valet, del Instituto de Física del Globo de París, llegó a la conclusión de que esta última etapa duraba unos 1000 años. En 2019, Brad Singer, de la Universidad de Wisconsin, y sus colaboradores argumentaron que la última inversión podría haberse alargado hasta 22.000 años. Harán falta más análisis para zanjar el debate.

La última inversión se produjo hace 773.000 años y el período de transición duró varios milenios

En conjunto, las observaciones sugieren que el origen del campo magnético terrestre obedece a un mecanismo complejo. Fue Joseph Larmor, profesor de la Universidad de Cambridge, quien finalmente halló la solución en 1919. Larmor propuso un mecanismo que convierte parte de la energía mecánica asociada al movimiento de un fluido conductor en energía eléctrica y, por lo tanto, en un campo magnético. Su razonamiento no recurre a ningún imán permanente para generar las corrientes eléctricas, y fue innovador ya que se basa en una inestabilidad. La idea es que la interacción del fluido en movimiento con un pequeño campo magnético o una pequeña corriente eléctrica que pudieran estar presentes de forma accidental produce una corriente eléctrica y un campo magnético que se refuerzan y mantienen mutuamente. Se trata del efecto de la dinamo autoexcitada o autoinducida (véase el recuadro «El papel de la inestabilidad»).

Inicialmente Larmor aplicó su idea al Sol, dado que la existencia de movimientos fluidos en su seno ya se conocía a comienzos del siglo xx. Sin embargo, observó que el mecanismo también sería aplicable a la Tierra si su interior fuese fluido. En aquella época los geofísicos ya habían demostrado, gracias a las

ondas sísmicas, que el planeta presenta un núcleo distinto del manto. Pero todavía hubo que esperar un decenio para saber que una parte del núcleo se halla en estado líquido.

Durante su formación, la Tierra se dividió en capas: el hierro (más denso) se acumuló en el centro del planeta y dio lugar al núcleo, que quedó rodeado de un manto rocoso menos denso. A unos 3000 kilómetros bajo nuestros pies, ese núcleo está constituido en un 80 por ciento por hierro fundido, mezclado con otros elementos más ligeros (sobre todo níquel), y el conjunto se encuentra a una temperatura de varios miles de grados. Debido a las presiones extremas, en el centro se formó un núcleo interno sólido de hierro prácticamente puro. El efecto dinamo surgiría en la parte líquida del núcleo.

UN MOVIMIENTO EFICAZ

Dado que la Tierra se enfría desde la superficie, presenta un gradiente radial de temperatura. En consecuencia, el hierro líquido más profundo está más caliente y es menos denso que el más próximo al manto. Eso genera movimientos de convección: el hierro líquido más caliente se desplaza hacia arriba debido al empuje de Arquímedes, y el más frío desciende.

A ello se añade una convección relacionada con la composición: a medida que se enfría el planeta, el radio del núcleo interno sólido aumenta lentamente. El hierro cristaliza, mientras que los elementos más ligeros permanecen en la parte líquida del núcleo; pero, debido a su menor densidad, ascienden hacia el manto y contribuyen al movimiento de convección. Además, la cristalización del núcleo interno libera calor, lo que amplifica el efecto de la convección térmica en el núcleo líquido.

La rotación de la Tierra y la fuerza (ficticia) de Coriolis asociada a ella también influyen. En ausencia de un campo magnético, esta fuerza obliga al fluido en convección a organizarse en «cyclones y anticiclones», y se opone a cualquier variación de velocidad en la dirección del eje de rotación del planeta. Como resultado, el fluido se estructura en una serie de «rodillos» o columnas giratorias paralelas al eje de rotación (véase el recuadro «Columnas de hierro líquido en el centro de la Tierra»). El número y el diámetro de estas columnas dependen de diversos factores, como la viscosidad del hierro líquido y la intensidad de los movimientos.

Los investigadores suelen usar simulaciones numéricas para estudiar la dinamo terrestre. Pero las características de la Tierra dificultan la construcción de modelos realistas. Cuando ciertos parámetros adimensionales son pequeños, los efectos de algunos términos sobre el flujo aparecen a escalas minúsculas. Eso obliga a realizar más cálculos y a emplear recursos informáticos más potentes para obtener simulaciones realistas. Por lo tanto, es indispensable recurrir a la computación de alto rendimiento, es decir, al «paralelismo masivo» (un enorme número de procesadores trabajando en paralelo).

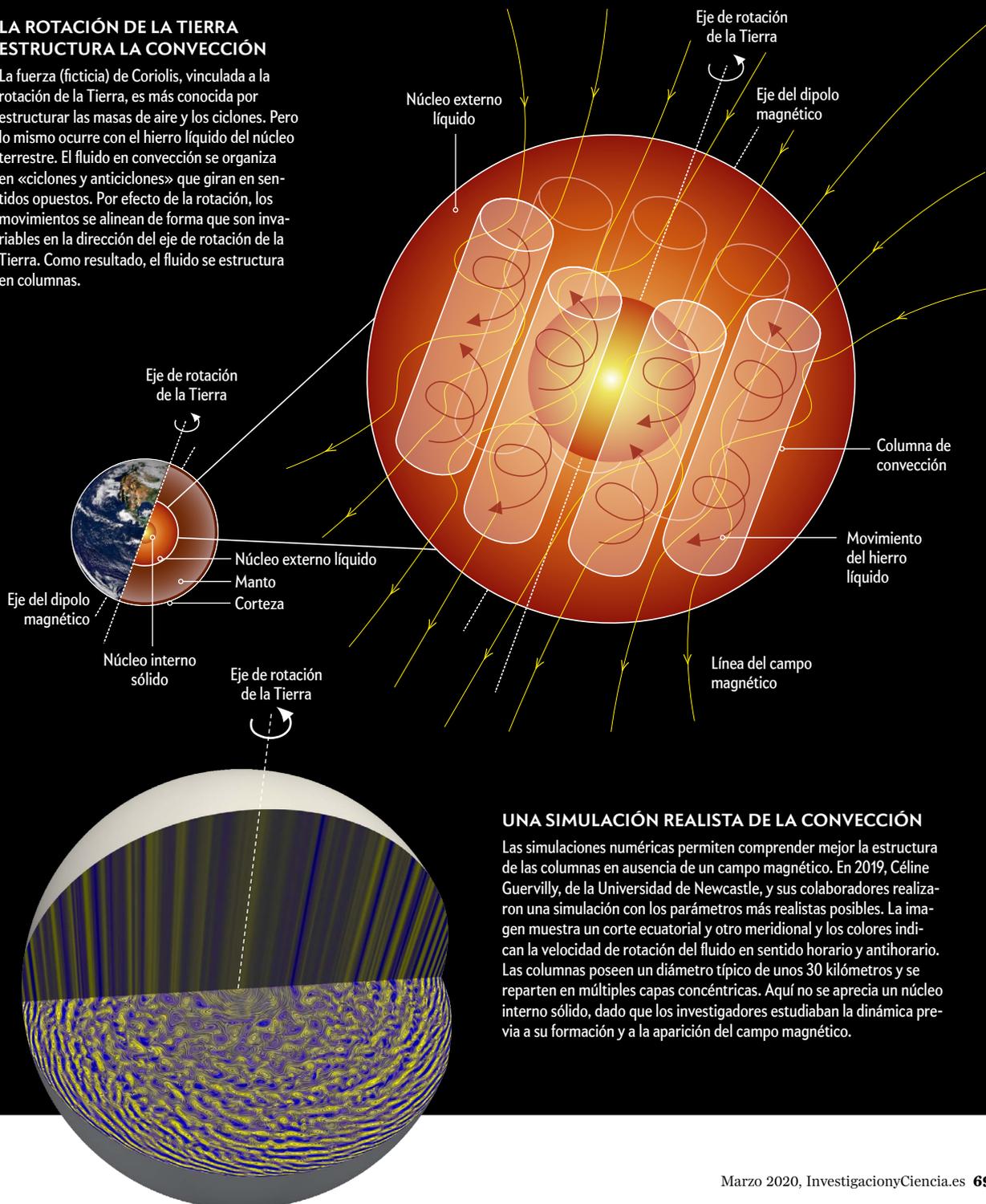
Columnas de hierro líquido en el centro de la Tierra

Para que funcione la dinamo terrestre, el hierro líquido del núcleo de la Tierra debe estar en movimiento. Eso ocurre gracias a la convección térmica: el líquido más profundo, al estar más caliente, es menos denso y tiende a ascender a la superficie, mientras que el hierro más frío se hunde. A medida que el núcleo se enfría, el crecimiento de la parte interna sólida también contribuye a los movimientos convectivos. Para des-

cribir este proceso hay que tener en cuenta la rotación de la Tierra, que genera una fuerza inercial. Esta fuerza de Coriolis estructura los movimientos de convección del hierro líquido en columnas paralelas al eje de rotación del planeta. A medida que se intensifica el campo magnético producido por el efecto dinamo, las fuerzas asociadas a él compiten con la de Coriolis y destruyen la estructura.

LA ROTACIÓN DE LA TIERRA ESTRUCTURA LA CONVECCIÓN

La fuerza (ficticia) de Coriolis, vinculada a la rotación de la Tierra, es más conocida por estructurar las masas de aire y los ciclones. Pero lo mismo ocurre con el hierro líquido del núcleo terrestre. El fluido en convección se organiza en «ciclones y anticiclones» que giran en sentidos opuestos. Por efecto de la rotación, los movimientos se alinean de forma que son invariables en la dirección del eje de rotación de la Tierra. Como resultado, el fluido se estructura en columnas.



UNA SIMULACIÓN REALISTA DE LA CONVECCIÓN

Las simulaciones numéricas permiten comprender mejor la estructura de las columnas en ausencia de un campo magnético. En 2019, Céline Guervilly, de la Universidad de Newcastle, y sus colaboradores realizaron una simulación con los parámetros más realistas posibles. La imagen muestra un corte ecuatorial y otro meridional y los colores indican la velocidad de rotación del fluido en sentido horario y antihorario. Las columnas poseen un diámetro típico de unos 30 kilómetros y se reparten en múltiples capas concéntricas. Aquí no se aprecia un núcleo interno sólido, dado que los investigadores estudiaban la dinámica previa a su formación y a la aparición del campo magnético.

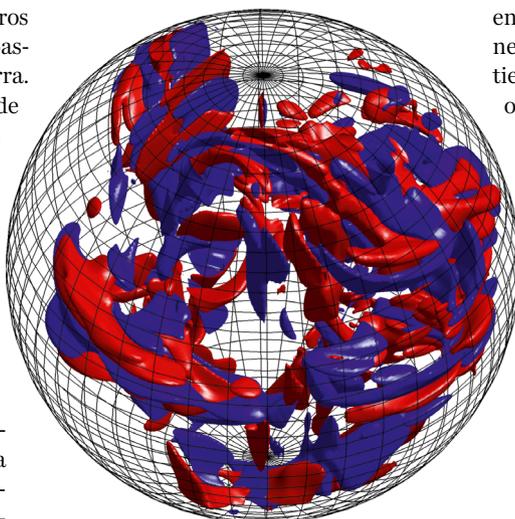
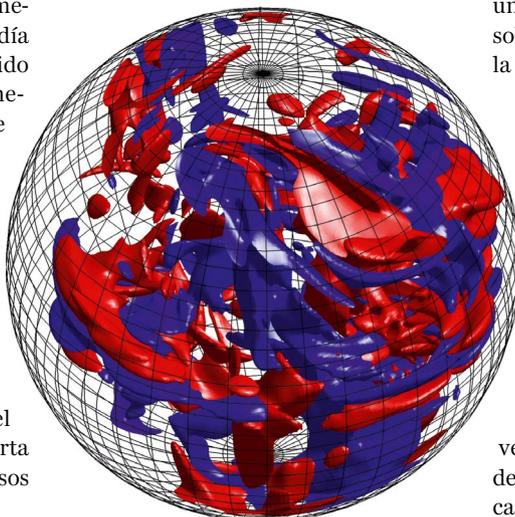
Por ejemplo, se pensaba que el diámetro de las columnas convectivas dependía principalmente de la viscosidad del fluido y era del orden de una decena de metros, en contraste con el diámetro de varios miles de kilómetros del núcleo. Pero en 2019, Céline Guervilly, de la Universidad de Newcastle, y sus colaboradores demostraron mediante simulaciones numéricas que es más bien la amplitud de los movimientos, y no la viscosidad, la que determina las dimensiones de las columnas. Concluyeron que su diámetro era de unos 30 kilómetros, lo que mitiga el problema de las escalas y abre la puerta a modelos más realistas y menos costosos computacionalmente.

Pero, a pesar de que los ordenadores son cada vez más potentes, los parámetros de las simulaciones siguen difiriendo bastante de los del núcleo fluido de la Tierra. No obstante, los investigadores tratan de usar sus modelos para deducir ciertas características robustas del campo magnético y acercarse a un régimen lo más realista posible.

Las simulaciones numéricas han revelado la posibilidad de generar el efecto dinamo en algunos modelos del núcleo líquido terrestre. Así pues, parece que tenemos todos los elementos de la teoría de Larmor. Una vez puesta en marcha la dinamo, la intensidad del campo magnético aumenta hasta que la fuerza de Laplace que ejerce dicho campo sobre el fluido conductor se iguala a la fuerza de Coriolis. Se obtiene entonces un régimen de equilibrio donde el campo magnético compensa las restricciones de la rotación rápida: las columnas de convección desaparecen, como se observa en mis simulaciones de 2016 (véase la figura de esta misma página).

UN SISTEMA NO LINEAL

Ese tipo de simulaciones se basan en ecuaciones que se resuelven mediante métodos numéricos aproximados y cuyo estudio riguroso supone un reto para los matemáticos. El análisis de dichas ecuaciones comenzó tras la Segunda Guerra Mundial, cuando el físico de origen alemán Walter Elsasser introdujo su forma moderna, expresándolas como un sistema de ecuaciones magnetohidrodinámicas que describen la inestabilidad propuesta por Larmor. El sistema consta de tres ecuaciones: la de Navier-Stokes (intrínsecamente no lineal), que gobierna el movimiento del fluido; la de inducción magnética, que describe la formación del campo magnético y los efectos de la inducción; y una tercera ecuación relacionada con las transferencias de calor en el seno del fluido. El sistema formado por estas tres ecuaciones es difícil de resolver, porque no es lineal (en particular, porque el movimiento del fluido genera



UNA VEZ PUESTA EN MARCHA LA DINAMO, sobre el hierro líquido del núcleo actúan las fuerzas de Coriolis (arriba) y de Laplace (abajo). Estas simulaciones del autor, en las que dichas fuerzas se representan mediante isosuperficies (valores positivos en rojo y negativos en azul), muestran cómo ambas tienden a equilibrarse.

un campo magnético que, a su vez, actúa sobre el flujo del hierro líquido mediante la fuerza de Laplace).

Como en el caso de las simulaciones numéricas, parte de la dificultad para resolver estas ecuaciones reside en los valores de sus parámetros, asociados a ciertas características —en ocasiones extremas— de la Tierra. Por ejemplo, la fuerza de Coriolis es varios miles de millones de veces más intensa que las fuerzas asociadas a la viscosidad del fluido. Tales diferencias de escala también se observan en la evolución temporal: la rotación de veinticuatro horas de la Tierra influye de manera evidente en la generación del campo geomagnético (confiriéndole su estructura principalmente dipolar y alineada en promedio con el eje de rotación del planeta), pero la evolución de este presenta tiempos característicos del orden de siglos o incluso mayores (como en el caso de las inversiones de la polaridad). Estas diferencias de escala dificultan sobremanera el estudio de las ecuaciones.

ECUACIONES RÍGIDAS

Si despreciamos, en primera aproximación, todos los parámetros pequeños (las cantidades adimensionales menores que una millonésima), obtenemos unas ecuaciones simplificadas que, sin embargo, aún no sabemos resolver en general. Ni siquiera se ha demostrado que posean soluciones «regulares», es decir, físicamente aceptables y sin anomalías como, por ejemplo, oscilaciones infinitamente rápidas. Obtener la solución en este límite, denominado «estado de Taylor» (por el físico británico John Bryan Taylor, quien lo introdujo en 1963), aún supone un formidable desafío matemático.

En 2015, Paul Roberts y Cheng-Chin Wu, de la Universidad de California en

Los Ángeles, desarrollaron los primeros modelos numéricos aplicados al estado de Taylor, para una configuración simplificada. En 2017, Isabel Gallagher, de la Escuela Normal Superior de París, y David Gérard-Varet, de la Universidad París-Diderot, estudiaron la regularidad matemática de un caso particular del estado de Taylor, considerando una linealización de las ecuaciones y una geometría idealizada. Sorprendentemente, al reintroducir los pequeños parámetros que habíamos ignorado (lo que se conoce como desarrollo asintótico), pueden obtenerse soluciones. Pero las ecuaciones de estos sistemas «rígidos» siguen siendo muy difíciles de estudiar.

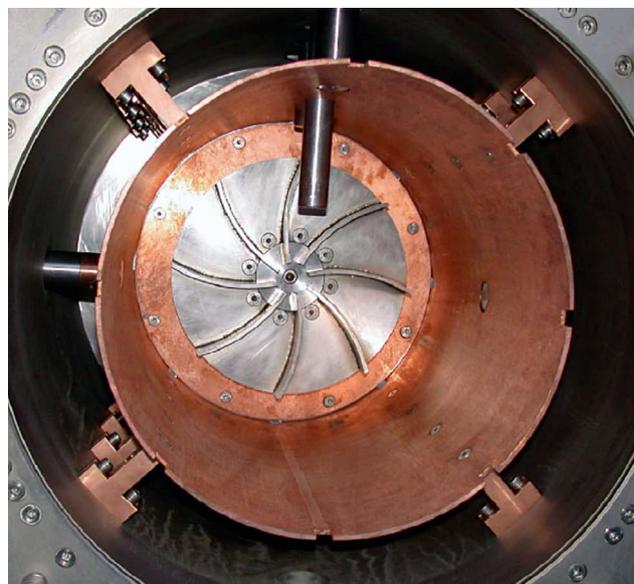
En 2015, Michael Calkins, de la Universidad de Colorado en Boulder, y un equipo internacional combinaron las estrategias asintótica y numérica en el caso de un campo magnético bastante débil. En 2016, desarrollé una simulación de dinamo en el límite de campo intenso (es decir, cuando el campo magnético

se equilibra con la fuerza de Coriolis) a la que ya me he referido anteriormente. Distintos equipos de todo el mundo siguen en busca de los parámetros más realistas posibles.

Otro enfoque se basa en la demostración experimental del efecto de la dinamo autoexcitada. Se trata de una tarea compleja, puesto que requiere poner en movimiento grandes volúmenes de metales líquidos: para pequeños volúmenes, la disipación de las corrientes eléctricas es demasiado eficaz como para que pueda compensarla el movimiento del fluido. A día de hoy, solo hay tres experimentos que hayan reproducido el efecto de la dinamo autoexcitada en un fluido conductor en el laboratorio.

UNA DINAMO EN EL LABORATORIO

Los dos primeros se realizaron en 1999, con unos meses de diferencia, en Karlsruhe, Alemania, y en Riga, Letonia. En ambos se impusieron fuertes restricciones al flujo de un metal líquido (sodio, que se funde justo por debajo de los 100 grados Celsius) con la ayuda de tubos. Las geometrías de los flujos se escogieron de modo que se aproximaran a flujos cuyas propiedades de dinamo ya se conocían analíticamente. Los dos experimentos confirmaron que el mecanismo de Larmor era viable. Los campos magnéticos generados crecían hasta que la fuerza de Laplace frenaba el flujo lo suficiente como para poner fin a su amplificación. Sin embargo, los experimentos no mostraron ninguna inversión, porque la geometría de los flujos estaba demasiado limitada.



EL EXPERIMENTO VKS, situado en Cadarache, Francia, reprodujo en 2006 el efecto de dinamo autoexcitada. El sodio líquido contenido en una cavidad cilíndrica se agitaba por medio de dos discos con paletas (en el centro, en gris) situados en los extremos del cilindro y que rotaban en sentidos opuestos. Haciéndolos girar a distintas velocidades, los investigadores observaron por primera vez el fenómeno de la inversión del campo magnético.

DINAMO AUTOEXCITADA

El papel de la inestabilidad

En la dinamo de una bicicleta, el movimiento de la rueda hace que gire un imán permanente situado dentro de una bobina. Según las leyes del electromagnetismo, las variaciones del campo magnético crean una corriente eléctrica en la bobina. En un dispositivo equivalente (abajo, izquierda), la corriente se genera gracias a un disco conductor que rota en un campo magnético fijo. Pero ¿cómo podemos producir una corriente eléctrica sin un imán permanente, como parece ocurrir en la Tierra? En 1919, Joseph Larmor propuso una solución: el mecanismo de la dinamo autoexcitada.

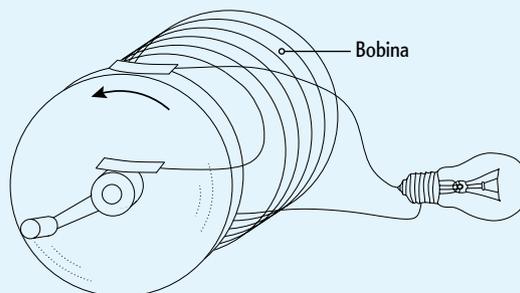
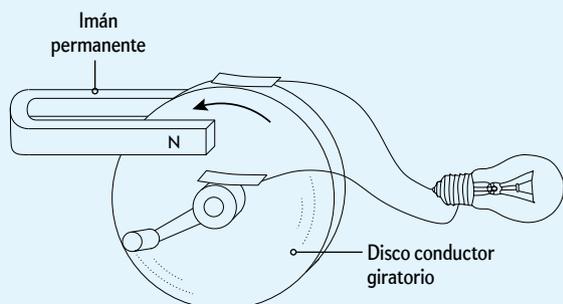
Para ilustrar la idea, reemplazemos el imán de nuestro dispositivo por

una bobina (abajo, derecha). Si en la bobina circula una corriente, aparece un campo magnético que puede desempeñar el papel del imán. El resultado es una dinamo: el giro del disco genera una corriente eléctrica que, a su vez, crea un campo magnético, el cual (si la bobina está enrollada en el sentido adecuado) reforzará el campo inicial. Una amplificación semejante sería la que produce un campo magnético a escala planetaria.

Sin embargo, surge la clásica pregunta del «huevo y la gallina»: ¿qué fue primero, el campo magnético o la corriente eléctrica? En realidad, se trata de una pregunta con trampa. Por encima de una determinada velocidad de rotación del

disco conductor, se amplificará cualquier corriente o campo magnético, por pequeños que sean. Esto es lo que se denomina una inestabilidad, y hay diversos fenómenos que pueden aportar el detonante (como el efecto termoelectrónico o una fuente externa de campo magnético).

Encontramos un ejemplo más familiar de inestabilidad en el «efecto Larsen»: por encima de una determinada amplificación, cualquier sonido, por pequeño que sea, es recogido por el micrófono y amplificado por el altavoz, y aumenta hasta volverse estridente. El origen del sonido inicial es irrelevante: a partir de cierta amplificación, el efecto se produce de manera sistemática.



¿Está perdiendo el norte la Tierra?

El campo magnético lleva mucho tiempo sirviéndonos de referencia. Las brújulas que empleamos para orientarnos apuntan invariablemente al norte, o al menos a una zona próxima al polo norte geográfico? De ser así, cabría pensar que el campo magnético es inmutable. Sin embargo, no lo es.

Los registros geológicos muestran que la orientación del campo magnético se ha invertido en numerosas ocasiones a lo largo de la historia de la Tierra. Pero, aun sin llegar a una situación tan extrema, el polo norte magnético no permanece inmóvil: en los últimos veinte años se ha desplazado varios cientos de kilómetros. Se trata de un fenómeno perfectamente normal.

A fin de proporcionar mapas precisos del campo magnético, incluso cerca del polo norte, el modelo magnético mundial (WMM), que normalmente se revisa cada cinco años, se actualizó con un año de antelación en 2019. ¿Debería inquietarnos que el polo norte magnético se desplace actualmente unos 55 kilómetros al año, frente a los menos de 10 kilómetros al año de hace cinco décadas? ¿Constituye tal aceleración un signo de que se está produciendo algún fenómeno excepcional en el núcleo terrestre? ¿Se avecina una inversión de la polaridad del campo magnético? Nada de eso.

La Tierra presenta tres polos norte distintos. El primero, el polo norte geográfico, señala la posición del eje de rotación del planeta. El segundo, el polo norte geomagnético, indica la posición del gran imán dipolar que sirve para caracterizar, en primera aproximación, el campo magnético terrestre (el polo norte geomagnético corresponde en la actualidad al polo sur de dicho imán imaginario). Está cerca del polo norte geográfico —hecho que confiere su utilidad a la brújula— y, por construcción, en las antípodas del polo sur geomagnético. El tercer polo es



PELLIZCANDO ligeramente el mantel, la canica puede rodar bastante lejos. Este fenómeno equivalente explica por qué el polo norte magnético se desplaza tan rápido.

el polo norte magnético, el lugar donde la aguja de una brújula que pudiera orientarse libremente según sus tres ejes adoptaría una posición perfectamente vertical, como para decirnos: «¡Es aquí!».

Actualmente el polo norte magnético se desplaza a una velocidad de unos 55 kilómetros al año

El polo magnético tiene en cuenta toda la complejidad del campo, que posee componentes «multipolares» que lo diferencian de un simple dipolo. Por lo tanto, los polos magnéticos norte y sur no tienen por qué estar exactamente uno en las antípodas del otro.

Este último polo, el magnético, es el que despierta mayor interés. Si bien es cierto que sus movimientos son complejos y difíciles de predecir, se restringen a una región bien delimitada, próxima al polo geográfico (*mapas*). En una zona extensa (*azul claro*), el campo magné-

tico es prácticamente vertical. El polo norte magnético (*círculo rojo*) se desplazó deprisa entre 2000 y 2019. Sin embargo, el área de color claro y el polo norte geomagnético (*cuadrado rojo*) apenas se movieron.

El polo norte magnético experimenta grandes desplazamientos en respuesta a variaciones muy pequeñas del campo magnético. Es algo parecido a lo que pasa con una canica puesta sobre una servilleta: al levantar ligeramente la tela (*imagen*), la canica rueda lejos.

En cambio, la estructura del campo magnético en el polo sur parece presentar más restricciones, las cuales limitan la deriva del polo sur magnético: este se desplaza menos de 10 kilómetros al año, sin signo alguno de aceleración. Así que no hay motivos para preocuparse por una inversión inminente.

Eso no quiere decir que los rápidos movimientos del polo norte magnético carezcan de interés. Nos informan sobre la dinámica del campo magnético y los movimientos del hierro líquido en el seno del núcleo terrestre.



En 2006, el tercer experimento, denominado VKS y realizado en Cadarache, Francia, permitió obtener una dinamo autoexcitada en un flujo turbulento con pocas restricciones. Dos discos situados en los extremos de una cavidad cilíndrica agitaban el sodio líquido al girar en sentidos opuestos. El experimento permitió observar por primera vez en un laboratorio inversiones de polaridad espontáneas y comprender mejor cómo se producen a escala planetaria.

Las ecuaciones de Elsasser demuestran que este cambio de polaridad es posible: si un flujo puede mantener un campo magnético con una determinada polaridad, también puede, sin necesidad de modificarlo, mantener el campo de polaridad opuesta. Por el contrario, la cuestión de la transición entre las polaridades ha supuesto un misterio durante mucho tiempo. El experimento VKS puso de manifiesto el papel de la simetría: el campo magnético generado por los dos discos que rotan en sentidos opuestos solo se invierte si se rompe la simetría del flujo, es decir, si los discos no giran a la misma velocidad.

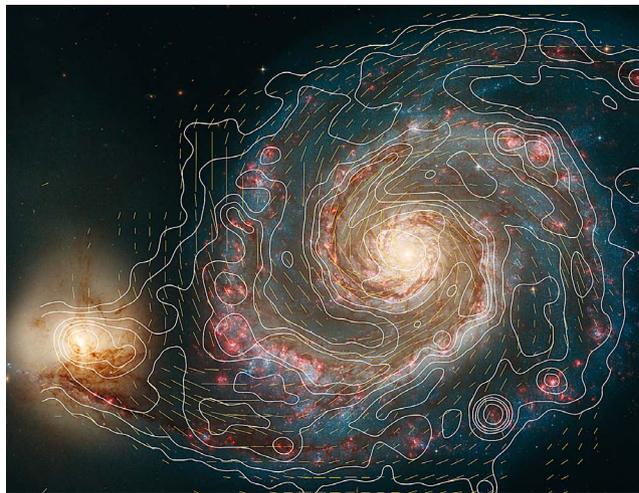
En 2009, junto a François Pétrélis, de la Escuela Normal Superior de París, y otros dos colaboradores, modelicé la dinámica de la inversión en un sistema de dimensión baja (con pocos grados de libertad). Logramos reproducir los aspectos esenciales de la inversión del campo magnético terrestre: una lenta disminución de la intensidad del campo (que no llega a desaparecer del todo, sino que se vuelve caótico), seguida de una inversión rápida de polaridad y, finalmente, un rápido restablecimiento de la intensidad. Los recientes trabajos de Brad Singer sobre los registros geológicos, mencionados anteriormente, han confirmado este proceso en la última inversión del campo geomagnético.

DESAFÍOS TÉCNICOS

En el experimento VKS, los discos giratorios que generaban el flujo eran de hierro, un material que puede imanarse, lo que podría contribuir a la generación de un campo magnético y afectar a los resultados. Varios equipos de investigación tratan de realizar experimentos con geometrías más similares a la de la Tierra y sin emplear hierro.

Por ejemplo, Daniel Lathrop, de la Universidad de Maryland, llevó a cabo un proyecto basado en un recinto esférico de tres metros de diámetro en rotación. Sin embargo, debido a las dificultades técnicas, no obtuvo resultados. Cary Forest, de la Universidad de Wisconsin-Madison, prepara un experimento que utilizará plasma en vez de un metal líquido. Por último, en Dresde, la plataforma DRESHDYN (acrónimo en inglés de Instalación de Sodio para Estudios Termohidráulicos y de Dinamo de Dresde) permitirá estudiar distintas configuraciones, entre ellas una dinamo de 2 metros de diámetro impulsada por movimientos de precesión.

En los próximos años, estos experimentos deberían ayudarnos a comprender mejor el fenómeno de la dinamo autoexcitada. Pero el reto no se limita al geomagnetismo. En su artículo de 1919, Larmor se centró sobre todo en el campo magnético del Sol. La estrella, cuyo diámetro es cien veces mayor que el de la Tierra, genera un campo magnético organizado de una intensidad comparable a la del campo terrestre (unos 10 gauss para la estrella y 0,5 para la Tierra), salvo en las regiones de las manchas solares, donde puede alcanzar varios miles de gauss. Otra diferencia es que la polaridad del campo magnético solar se invierte de forma casi periódica, cada once años. De hecho, gran parte de los objetos astrofísicos producen un campo magnético. Es el caso de la mayoría de los planetas del sistema solar, aunque no todos:



EL CAMPO MAGNÉTICO de una galaxia polariza la luz de esta o de otras fuentes más lejanas. Analizando esa luz es posible cartografiar el campo magnético, como se muestra aquí para la galaxia M51.

Venus, por ejemplo, carece de campo magnético [véase «Campos magnéticos en el cosmos», por Eugene N. Parker; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1983].

DINAMOS GALÁCTICAS

Las galaxias también generan un campo magnético del orden de un microgauss (un millón de veces menos intenso que el de la Tierra). De nuevo, el efecto dinamo es la única explicación para el origen de ese campo organizado a gran escala. Su fuente son los movimientos del medio interestelar vinculados a la rotación de la galaxia y a las ondas de choque provocadas por las explosiones de supernova. El estudio de los diferentes campos magnéticos no es sencillo, dado que interactúan entre sí. Por ejemplo, el viento solar interactúa con la magnetosfera terrestre, originando las espectaculares auroras boreales. A lo largo de cien años, los investigadores han comprendido muchos aspectos de la dinamo terrestre, pero aún quedan preguntas por responder sobre la Tierra y otras partes del universo. 

PARA SABER MÁS

- The origin of the Earth's magnetic field: fundamental or environmental research?** Emmanuel Dormy en *Europhysics news*, vol. 37, n.º 2, págs. 22-25, marzo de 2006.
- Strong-field spherical dynamos.** Emmanuel Dormy en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 789, págs. 500-513, febrero de 2016.
- Turbulent geodynamo simulations: a leap towards Earth's core.** Nathanaël Schaeffer et al. en *Geophysical Journal International*, vol. 211, n.º 1, págs. 1-29, octubre de 2017.
- Self-exciting fluid dynamos.** Keith Moffatt y Emmanuel Dormy. Cambridge University Press, 2019.
- Turbulent convective length scale in planetary cores.** Céline Guervilly et al. en *Nature*, vol. 570, págs. 368-371, junio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

- La geodinamo en el laboratorio.** Ulrich Müller y Robert Stieglitz en *lyC*, mayo de 2002.
- La geodinamo.** Gary A. Glatzmaier y Peter Olson en *lyC*, junio de 2005.
- El motor de la dinamo terrestre.** Dominique Jault, Daniel Brito, Philippe Cardin y Henry-Claude Nataf en *lyC*, abril de 2006.