



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Fue un descubrimiento extraño el que hicieron los chinos: cuando, con ciertas piedras, frotaban una aguja de hierro varias veces y luego la suspendían, la aguja señalaba siempre en dirección norte-sur. En seguida se dieron cuenta que de este modo se podía construir un instrumento útil para la navegación: habían descubierto el **compás magnético**. Los historiadores todavía discuten si los chinos realmente emplearon este instrumento por primera vez en el año 2500 a.C. o recién en el 271 d.C. El registro escrito más antiguo sobre la

aproximaran al coloso. Los primeros conocimientos elementales se deben a William Gilbert, quien luego fuera médico personal de la reina Isabel I de Inglaterra. Su escrito "Sobre el imán", publicado en Londres en 1600, constituye un hito de la literatura científica mundial. La obra brinda la primera explicación racional para la misteriosa propiedad de la aguja del compás que permite orientarnos hacia el norte: la Tierra misma es magnética. En sus experimentos, Gilbert utilizó un imán esférico como modelo. Moviendo una pe-

La magia del campo magnético

Investigar el centro de la Tierra

utilización de la brújula en Europa data del año 1195 d.C. A principios del siglo XIV, esta "maravillosa aguja" se transformó en uno de los elementos más importantes que permitió descubrir el mundo a los navegantes portugueses, españoles y, más adelante, también a los ingleses. Independientemente de que se tratara de Colón, Magallanes u otros aventureros por completo desconocidos, ningún capitán emprendía una gran travesía por los mares del mundo sin llevar una brújula a bordo.

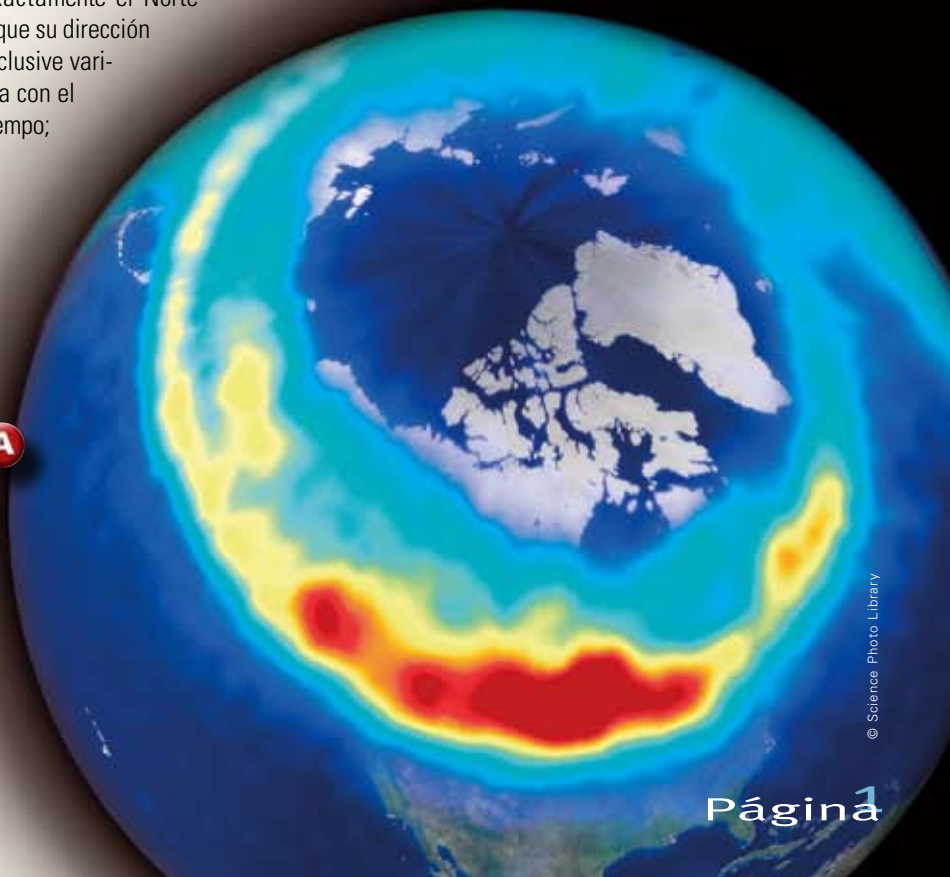
AGUJAS CON SENTIDO DE ORIENTACIÓN

Durante mucho tiempo, la fuerza que orienta la aguja imantada permaneció como un enigma ante los sabios. En un principio, los europeos creían que una enorme montaña magnética emplazada en el Norte del planeta era responsable. Por eso, se advertía encarecidamente a los capitanes de los barcos - que en su mayoría eran de hierro- que no se

queña aguja de compás sobre su superficie reproducía el comportamiento del compás en la Tierra. Casi cien años más tarde, finalmente se confeccionó el primer mapa del **campo magnético terrestre**. Mostraba líneas que se parecían al campo de una gran barra magnética. En ese entonces, a los científicos les resultaba extraño que en la Tierra hubiera muchos sitios en los cuales la aguja del compás no indicara exactamente el Norte y que su dirección inclusive variara con el tiempo;



▶ Las auroras boreales se producen por la colisión entre partículas del viento solar y moléculas gaseosas de la atmósfera terrestre. El fenómeno se produce, principalmente, cerca de los polos donde el campo magnético terrestre protege de manera insuficiente a nuestro planeta de las radiaciones cósmicas, porque las líneas del mismo están dispuestas de forma casi vertical. El campo magnético es particularmente efectivo donde sus líneas describen una línea paralela a la superficie de la Tierra, es decir, en el Ecuador. Vistas desde el espacio, las auroras boreales conforman un gran anillo que rodea el Polo Norte. Las zonas más activas se señalan de color rojo; la actividad disminuye del amarillo al azul.

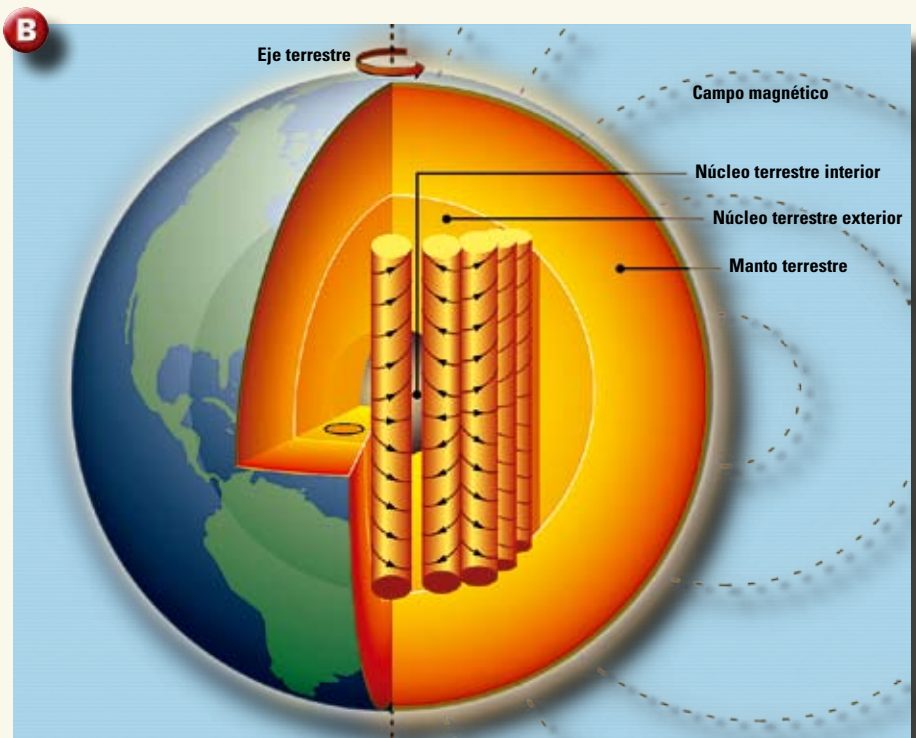


→ si bien era leve, esta variación podía medirse claramente en el transcurso de una década. Hoy es sabido que la intensidad del campo magnético terrestre disminuyó en casi un 10% durante los últimos 160 años (desde entonces es posible determinar esta magnitud) y que el campo entero cambia de polaridad varias veces en el transcurso de millones de años: el norte magnético se traslada al polo sur y viceversa (**véase el recuadro de la pág. 3**).

HIERRO LÍQUIDO BAJO PRESIÓN

La estructura interna de la Tierra, que entretanto han dilucidado los geofísicos con ayuda de mediciones sismológicas, explica todo en detalle (**Fig. B**). De acuerdo con las mediciones, el 90% del **núcleo terrestre** está compuesto por hierro. En el interior de nuestro planeta reinan temperaturas por encima de los 3.000 grados Celsius. Si bien el punto de fusión del hierro en la superficie terrestre es de 1.539 grados, el núcleo interno de la Tierra es sólido debido a la elevada presión. Pero a su alrededor se encuentra hierro líquido que es calentado por el núcleo sólido. En el límite entre la fase sólida y la líquida, el hierro caliente asciende, se vuelve a enfriar para luego descender otra vez en otro sitio generando turbulencias. Aunque ya sólo por el mero hecho de que los imanes pierden sus propiedades magnéticas a altas temperaturas, los científicos concluyen que el núcleo de hierro de la Tierra no actúa simplemente como un enorme imán permanente.

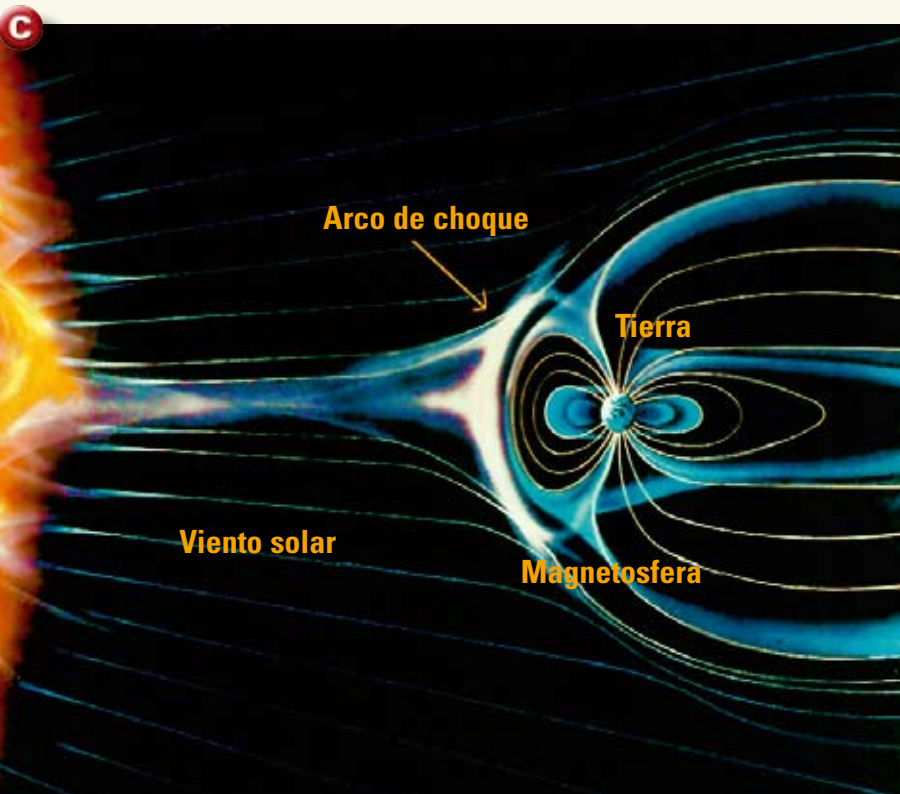
En 1831, Michael Faraday descubrió la **inducción electromagnética** y, con ello, los fundamentos de una **dinamo**: si movemos un



► De acuerdo con el modelo, debido a la rotación de la Tierra, el hierro líquido del núcleo es obligado a realizar movimientos en tirabuzón, paralelos al eje terrestre.

conductor eléctrico en un campo magnético, fluirá una corriente eléctrica. Y a la inversa: donde fluya una corriente eléctrica se generará un campo magnético. El descubrimiento puso a los investigadores en la pista correcta para explicar cómo se forma el campo magnético de la Tierra: en los albores de la historia de nuestro planeta, es probable que el viento solar haya generado un campo magnético débil a su alrededor. Debido a los movimientos del hierro líquido en el núcleo terrestre, se indujo una corriente eléctrica. Al

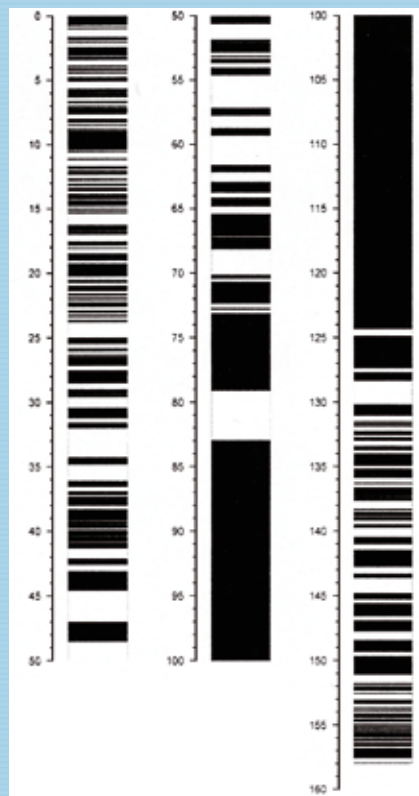
igual que en una **dinamo técnica** como, por ejemplo, el alternador de un auto, la corriente y el campo magnético se intensificaron mutuamente, hasta que se formó la "dinamo terrestre". El campo magnético terrestre nos protege de las potentes radiaciones energéticas del espacio (**Fig. C**) y no sólo permitió exitosos viajes a los navegantes de siglos pasados, sino también a una serie de organismos que cuentan con un "sentido magnético" entre los que se encuentran insectos, aves, peces, mamíferos y bacterias.



EL SECRETO DE LA GEODINAMO

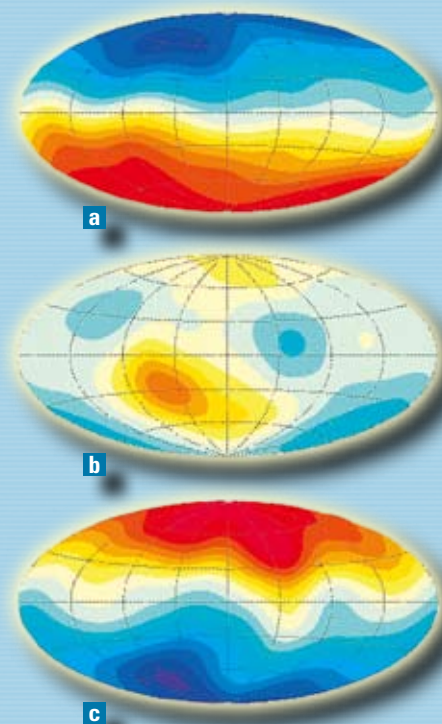
Aún así, seguía faltando claridad sobre un aspecto: una **dinamo técnica** sólo funciona mediante una compleja disposición de bobinas y contactos de rozamiento. Por el contrario, el núcleo de la Tierra es prácticamente una gran esfera conductora de electricidad, en la que todas las piezas están en cortocircuito eléctrico. Entonces ¿cómo funciona una **dinamo homogénea** de semejantes

► El sol irradia continuamente ondas electromagnéticas -una parte de las cuales representan el espectro visible, es decir luz- como así también partículas, sobre todo electrones y protones, que conforman el viento solar. Este interactúa con el campo magnético terrestre conformando la magnetosfera. Por acción del viento solar, las líneas del campo del lado diurno se compactan fuertemente, mientras que del lado nocturno se expanden mucho en dirección al espacio. Ante este obstáculo, la magnetosfera forma un arco de choque frente al viento solar, cuya velocidad se reduce de supersónica a subsónica.



► A partir de los análisis de rocas se sabe que, en el pasado, el campo magnético de la Tierra cambió varias veces su polaridad (las fases de polaridad normal/actual se indican en negro, las de polaridad invertida en blanco). Los intervalos entre los cambios de polaridad varían dentro de límites amplios, desde apenas algunas decenas de miles hasta diez millones de años. Algunos periodos más extensos se caracterizan por frecuentes cambios de polaridad, otros por relativamente pocos.

► Los investigadores han realizado el seguimiento de una posible secuencia de inversión en la polaridad mediante simulaciones computarizadas: el "flujo magnético" (hacia el interior de la Tierra representado en rojo, y en azul desde el interior hacia afuera) disminuye a lo largo de varios siglos (a). Luego se disuelve la estructura bipolar normal del campo magnético. En el punto de inflexión de la repolarización se da un mosaico débil, pero geoméricamente complicado, con más de dos polos magnéticos (b). Finalmente, se forman nuevos polos con símbolo invertido (c). No está claro por qué sucede esto. La última repolarización ocurrió hace unos 780.000 años. Si continúa la presente disminución del campo magnético, la próxima sucedería en un futuro cercano – en términos geológicos –, aunque seguro no antes de que transcurran otros 1.500 años.



características? Los científicos encontraron una respuesta a esta pregunta mediante simulaciones de computadora: mientras que en una dinámica técnica resulta decisivo por dónde pasan o se colocan los conductores, en el núcleo terrestre el flujo del hierro debe presentar determinadas formas relativamente complejas. Por ejemplo, es muy fácil generar un campo magnético si los flujos de hierro se mueven como si describieran trayectorias en forma de tirabuzón.

En el Instituto Max Planck para la Investigación del Sistema Solar, con sede en Katlenburg-Lindau, Ulrich Christensen se dedica desde hace unos ocho años a la investigación de la **geodinamo**. Fue uno de los primeros investigadores del mundo que logró modelarla mediante computadoras. Christensen recuerda su estadía de investigación en los EE.UU. en 1997 con una sonrisa en el rostro: "Los primeros modelos de la geodinamo requerían varios meses de cálculo en las mejores supercomputadoras. Pero como nuestro grupo de trabajo sólo contaba con computadoras pequeñas, en un principio no creíamos que pudiéramos hacer grandes contribuciones a la investigación de la geodinamo". Christensen y sus colegas se limitaron a modelos sencillos

que realizaban en una pequeña estación de trabajo: "Nos imaginamos el núcleo de la Tierra como una esfera virtual de hierro líquido y la hicimos rotar dentro de un campo magnético". De esta manera, los científicos querían analizar los mecanismos básicos de la generación del campo magnético terrestre. "No teníamos grandes esperanzas de que con ello pudiéramos desarrollar un modelo para una dinámica que se retroalimentara", recuerda el director del Instituto Max Planck.

JUEGO DE COMPUTADORA EXITOSO

Los investigadores tuvieron suerte. Por casualidad, en su experimento virtual eligieron parámetros que repentinamente intensificaron el campo magnético, como ser la velocidad de rotación de la esfera y la viscosidad del hierro. "Sin embargo, en los primeros intentos el sistema colapsaba cada vez que desconectábamos el campo magnético externo", relata Christensen. A pesar de los contratiempos, los científicos no se resignaron y finalmente vieron retribuida su tenacidad. Lograron establecer las condiciones para que su dinámica virtual funcionara sin campo magnético externo. Con una capacidad de análisis de datos muy inferior a la de otros grupos, los investigadores habían creado un modelo

para la geodinamo. "Y, puesto que este modelo era relativamente sencillo, pudimos aprender mucho sobre los mecanismos responsables de generar el campo magnético de la Tierra", dice Christensen.

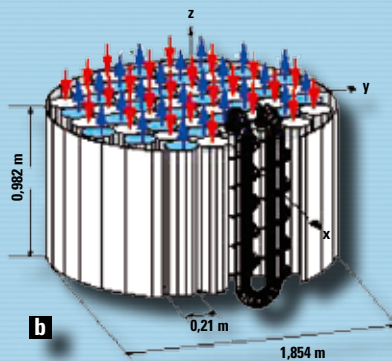
Pero ni siquiera una simple dinámica de bicicleta produce luz sin que alguien pise los pedales. De modo que surge la siguiente pregunta: ¿qué impulsa a la gigantesca dinámica terrestre? ¿De dónde proviene la energía necesaria? El investigador abordó este problema con computadoras mucho más potentes. Éstas proveyeron datos mucho más precisos sobre la intensidad del campo magnético terrestre, su variación en el tiempo y sobre su gran estructura espacial en la superficie del planeta. Pero a pesar de todos los progresos informáticos, Ulrich Christensen y sus colegas deben seguir haciendo algunas concesiones. Así, para que los complejos modelos matemáticos no demanden tiempos de cálculo muy extensos, aumentan, por ejemplo, la viscosidad del hierro líquido en su núcleo terrestre virtual. De este modo, solamente se generan movimientos líquidos de grandes proporciones que se pueden calcular con mayor rapidez que la gran cantidad de pequeños torbellinos esperables en la turbulencia

GEODÍNAMO EN EL LABORATORIO

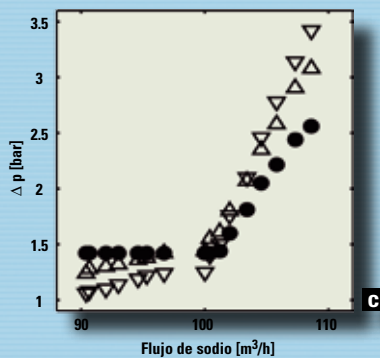
La dínamo de la Tierra se considera homogénea, puesto que todas sus "piezas" están en cortocircuito eléctrico. Esto se puede modelar en el laboratorio mediante el experimento de la dínamo de Karlsruhe. Se bombea sodio líquido (punto de fusión = 98 °C) a velocidades crecientes por tubos de acero inoxidable (a + b) que se tocan entre sí; cuanto más rápido fluye el sodio, tanto mayor es la presión que deben generar las bombas. Pero a partir de cierta velocidad, la presión se incrementa mucho más rápido que al comienzo del experimento (c). Este es el momento en que arranca la dínamo. A partir de ahora, la energía cinética del sodio también se transforma en energía magnética que las bombas deben generar en forma prácticamente adicional. En base al aumento de presión adicional, los investigadores calculan la cantidad de energía necesaria para generar el campo magnético.



a



b



c

→ lenta corriente del núcleo terrestre real. "Con esto se plantea la pregunta acerca de si estos modelos son lo suficientemente realistas como para recurrir a ellos a fin de calcular la demanda energética de la dínamo terrestre", explica el geofísico.

UNA MEGA CENTRAL ELÉCTRICA EN EL INTERIOR DE LA TIERRA

La respuesta no la dio un experimento virtual, sino uno real en el Centro de Investigaciones de Karlsruhe que dirige Ulrich Müller. Junto con Andreas Tilgner del Instituto de Geofísica de la Universidad de Gotinga, los investigadores del Instituto Max Planck evaluaron los resultados. El denominado Experimento de la Dínamo de Karlsruhe (véase el recuadro de la pág. 4) permite operar una dínamo homogénea en el laboratorio. Para ello, se bombea una tonelada de sodio líquido por un sistema de tuberías de acero de un metro de altura. Puesto que ambos materiales son buenos conductores eléctricos y los tubos se tocan, todas las partes están en cortocircuito, igual que en la geodínamo homogénea. Además, los tubos

contienen chapas deflectoras conformadas de tal manera que el sodio líquido fluye por los tubos en trayectorias espiraladas. De esta forma se genera el flujo complejo que los investigadores sospechan se produce en el núcleo de la Tierra, pero no era tenida en cuenta en sus modelos informáticos.

El resultado: el valor de la demanda energética calculado previamente por los investigadores en la computadora para la misma estructura de ensayo, realmente coincide con la energía necesaria para impulsar la dínamo homogénea en el laboratorio. "Las complejas turbulencias y corrientes que generamos con el experimento de la dínamo de Karlsruhe no influyen en la demanda energética de la dínamo homogénea", explica Christensen, "y esto significa que con nuestros modelos computarizados podemos esperar datos realistas para la geodínamo".

De acuerdo con estos cálculos, la dínamo de la Tierra engulle entre 200.000 y 500.000 megavatios, equivalentes a la potencia de varios centenares de centrales eléctricas

grandes. Para un gigantesco sistema como el de la Tierra, esto no representa mucho. Por eso, los científicos infieren que la demanda energética es satisfecha por el lento enfriamiento del núcleo terrestre y no consideran que en el núcleo sea necesaria una fuente especial de energía, por ejemplo, en base a la desintegración radioactiva de oligoelementos (por ejemplo potasio). Una parte importante de la energía entregada por el núcleo se debe a que el sólido núcleo interno crece constantemente, porque el hierro líquido se va "congelando". De este modo, los átomos de hierro pierden energía de movimiento que queda disponible para impulsar la geodínamo.

MÁS ANTIGUO DE LO PENSADO

Con sus cálculos, Ulrich Christensen y su equipo también pudieron hacer un aporte importante a la discusión sobre la edad del núcleo sólido de la Tierra. Según cálculos anteriores, los expertos estimaban que la demanda energética de la geodínamo superaba tres a diez veces los valores calculados por los investigadores del Instituto Max Planck. Según estos datos, el núcleo interno de la Tierra también habría crecido tres a diez veces más rápido y, por lo tanto, sólo tendría mil millones de años. Sin embargo, los análisis de rocas demuestran que el campo magnético terrestre existe, por lo menos, hace tres mil millones de años. En tal caso, antes de la formación del núcleo sólido de la Tierra, un mecanismo totalmente distinto tendría que haber impulsado la geodínamo: una suposición poco realista. "Según nuestros cálculos, el núcleo de la Tierra se enfría mucho más despacio de lo que se suponía hasta ahora", explica Christensen. "Por ende, el núcleo interno tendría una antigüedad de entre 2.500 y 3.500 millones de años. Y esto coincide bastante bien con los resultados obtenidos a partir del análisis de rocas".

PIE DE IMPRENTA

Sociedad Max-Planck, Departamento de Información y Relaciones Públicas, Hofgartenstraße 8, 80539 München / e-mail: presse@gv.mpg.de

Redacción: Dra. Christina Beck

Texto: Ute Hänslér

Traducción: Astrid Wenzel

Diseño: www.haak-nakat.de

La versión en español se hizo con el apoyo del DAAD y con fondos del Ministerio de Relaciones Exteriores de Alemania.

DAAD Deutscher Akademischer Austausch Dienst Servicio Alemán de Intercambio Académico

200 AÑOS BICENTENARIO ARGENTINO

Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva Presidencia de la Nación



SIEMENS

BASF The Chemical Company