



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

**N**uestros ancestros ya sabían que no puede haber vida sin Sol. Los antiguos griegos creían que el dios Helios conducía, al alba, su carro de sol por el cielo para que hubiera luz y calor. ¿Cuál es el fenómeno real que nos permite creer, al igual que los griegos, que el fuego solar arderá eternamente? Durante largo tiempo, los pensadores más inteligentes cavilaron en vano al respecto. En 1852 Hermann von Helmholtz llegó a la tremenda conclusión de

protones y dos neutrones (**véase el recuadro de la p. 2**). Los neutrones surgen de los protones. En el transcurso de este proceso, los positrones, las antipartículas de los electrones, se llevan la carga eléctrica positiva excedente. Pero esta reacción de fusión necesita altísimas temperaturas. Para el sol no es un problema generarlas, ya que la temperatura que prevalece en su centro es de aproximadamente 15 millones de Kelvin (K). En este pro-

## Un sol en el tanque

Cómo los investigadores de la fusión atrapan el fuego solar

que el sol se apagaría tras 3021 años. El famoso físico partió de la reacción del gas oxihidrógeno como fuente de energía, una mezcla de hidrógeno y oxígeno, en la cual el oxígeno reacciona químicamente con el hidrógeno para formar agua. Recién en el año 1938, el físico germano-norteamericano Hans Bethe, posteriormente premio Nobel, resolvió el misterio: la fuente del calor solar no son los procesos de combustión química, sino principalmente la fusión de núcleos de hidrógeno que luego forman núcleos de helio. Esta **fusión nuclear** libera aproximadamente cuatro millones de veces más energía que la reacción del gas oxihidrógeno. Por suerte y gracias a esta enorme eficiencia, el sol se las arreglará para existir otros 4.500 millones de años con sus reservas de combustible.

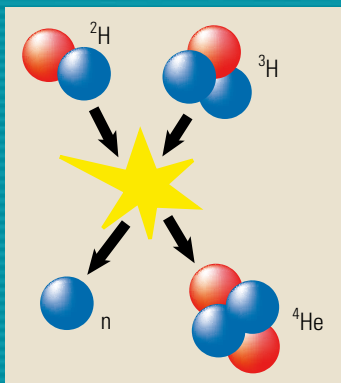
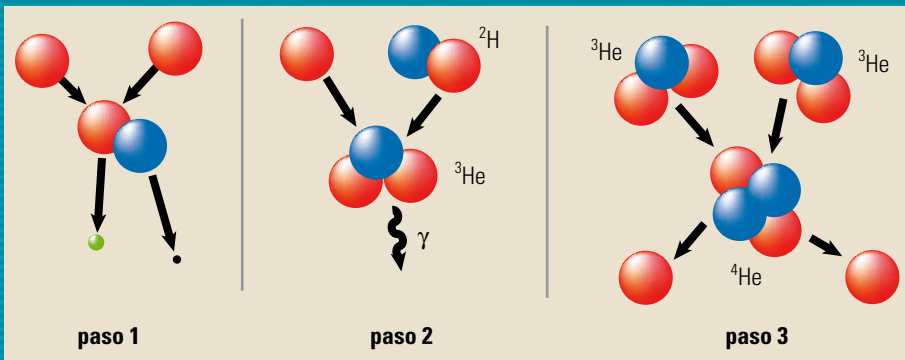
Al mismo tiempo, en su interior se producen varias reacciones de fusión del hidrógeno, un gas particularmente liviano. Predomina aquí una reacción llamada "reacción protón-protón 1", en la que cuatro núcleos de hidrógeno (protones) se fusionan, mediante pasos intermedios, en un núcleo de helio constituido por dos

protones, los núcleos de los átomos livianos se separan totalmente de sus electrones y forman un gas caliente compuesto de partículas cargadas eléctricamente, llamado **plasma**. Además, en el interior del sol existe una enorme presión debido a la poderosa fuerza gravitacional. Esto significa que 200.000 millones de atmósferas terrestres comprimen el plasma de tal manera que un centímetro cúbico de éste pesaría casi lo mismo que 20 cubos de hierro del mismo tamaño en la Tierra.

Únicamente en tan extremas condiciones, los protones superan su resistencia a la unión por fusión. Es normal que se repelen debido a que poseen la misma carga eléc- →

▼ El sol produce energía fusionando núcleos atómicos.





▲ **a** En la reacción "protón-protón-1", en el sol se fusionan primero dos protones (color rojo) formando un núcleo de deuterio, es decir hidrógeno pesado ( $^2\text{H}$ ). En este proceso (paso 1), primero se transforma un protón en un neutrón (azul); al mismo tiempo, un positrón (verde) "dispone" de la carga eléctrica excedente y un neutrino (negro) compensa el balance de energía y el impulso (giratorio). En el paso 2, un protón y un núcleo de deuterio ( $^2\text{H}$ ) se fusionan formando un núcleo de helio-3 ( $^3\text{He}$ ). Un cuanto de rayos gama vuelve a corregir el balance de energía y de impulsos. En el tercer paso se fusionan dos núcleos de  $^3\text{He}$  formando helio-4 ( $^4\text{He}$ ). Los dos protones excedentes quedan disponibles para otras reacciones de fusión.

◀ **b** En el reactor de fusión, cada núcleo de deuterio ( $^2\text{H}$ ) se fusiona con un núcleo de tritio ( $^3\text{H}$ ) formando un núcleo de helio ( $^4\text{He}$ ); (protones en rojo; neutrones en azul). En este proceso se libera un neutrón (n) con una energía equivalente a 14.100 millones de electrovoltios.

© Gráfico: Roland Wengenmayr

→ trica, pero en el tórrido interior del sol, los protones circulan a tan alta velocidad que, a pesar de todo, pueden colisionar. El calor en ese micromundo, no es otra cosa que energía cinética, en la que los protones se acercan como máximo a  $10^{-15}$  metros (equivalentes a un femtómetro [*fm*] o a una billonésima parte de un milímetro) y en ese "punto de inflexión" comienza a predominar la **energía nuclear**. Si bien esta fuerza, la más intensa de la física, sólo tiene un corto alcance, supera la potencia de la energía eléctrica. Por lo tanto, la energía nuclear también puede conectar los protones rebeldes, formando núcleos atómicos. Sin ellos no habría átomos, ni sería posible nuestra existencia. Además, la densidad del plasma solar comprimido proporciona suficiente cantidad de colisiones y así mantiene caliente al "horno solar de fusión".

En la mitología griega, Prometeo robó el fuego que llevaba Helios en su carro de sol para obsequiárselo a los humanos. Investigadores como el recientemente fallecido Lyman Spitzer, pueden ser considerados los descendientes modernos de Prometeo. En una disertación ofrecida el 11 de mayo de 1951, el astrónomo estadounidense de la Universidad de Princeton delineó cómo trasladar el fuego solar a la Tierra. Tuvo la crucial idea de cómo —en nuestro planeta— confinar y asegurar el plasma en un recipiente con sus millones de grados, y hacer así posible una fusión nuclear controla-

da. Todo contacto físico con la pared del recipiente sería fatal, ya que el plasma se enfriaría repentinamente y la sensible reacción de la fusión se detendría de inmediato.

Spitzer propuso que el plasma levitara en un confinamiento magnético. Esto es posible porque el plasma se compone de partículas eléctricamente cargadas, y los campos magnéticos ejercen fuerza sobre las cargas eléctricas. De este modo, Spitzer bosquejó el principio básico de los futuros reactores de fusión o termonucleares. Pero las fuerzas magnéticas tienen la desventaja de ser bastante débiles. Sólo pueden mantener confinado un plasma extremadamente delgado, que es casi 250.000 veces más fino que el grosor del aire a nivel del mar. Por eso, el plasma caliente en reactores de gran tamaño nunca superaría la presión que tiene el aire en un neumático de bicicleta. Parece que no es tan fácil copiar el sol.

### NÚCLEOS DE HIDRÓGENO CALIENTES

Lo mismo rige para la reacción de fusión. En un reactor artificial, la reacción solar protón-protón se desarrollaría de manera demasiado lenta. Pero, por suerte, la naturaleza permite reacciones de fusión alternativas y una de ellas es particularmente apta para su aplicación técnica. Con lo cual, los físicos del plasma lograron iniciar la primera fusión termonuclear controlada en la década de 1990. Lo hi-

cieron en el instituto de investigaciones europeo JET (*Jet European Torus*) en Abingdon, Gran Bretaña y en el reactor TFTR (*Tokamak Fusion Test Reactor*) de la Universidad de Princeton en EE.UU. Esta reacción por fusión alternativa necesita dos tipos de hidrógeno pesado como combustible: estos son el **isótopo de hidrógeno** llamado **deuterio**, cuyo núcleo contiene un neutrón y un protón, y el **tritio**, todavía más pesado, con un núcleo formado por un protón y dos neutrones. Un núcleo de deuterio y de tritio se fusionan para formar un núcleo de helio (**recuadro, Fig. b**). Pero la reacción sólo funciona por encima de los 100 millones de Kelvin, y de manera ideal a 300 millones de Kelvin. Sólo entonces, los pesados núcleos de hidrógeno logran suficiente velocidad para fusionarse de manera eficiente. Temperaturas entre diez y veinte veces más altas que las del sol parecerían ser una meta inalcanzable, pero hace tiempo que son rutina en los actuales experimentos con plasma. La central de investigaciones *ASDEX Upgrade* en el Instituto Max-Planck de Física del Plasma de Garching ya superó los 250 millones de Kelvin.

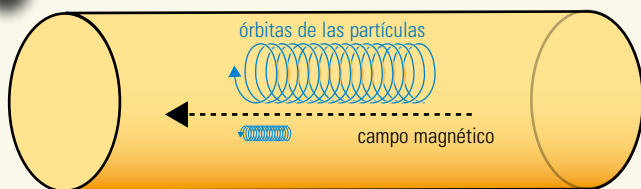
Al fusionarse el deuterio con el tritio se forma un núcleo de *helio* que arrastra aproximadamente el 20% de la energía liberada. Con lo cual suma temperatura al plasma que corría peligro de enfriarse. El 80% restante de la energía de fusión se la lleva el neutrón. Como partícula eléctricamente neutra se escapa del confinamiento magnético y golpea la pared del reactor. En el futuro, en una central termoeléctrica, los neutrones transferirán a un refrigerante —como agua o helio— la mayor parte del calor generado por fusión. Luego, la energía térmica será trasladada por esta vía a las turbinas y sus respectivos generadores eléctricos (**Fig. B**), igual que en las centrales eléctricas convencionales. La energía del neutrón equivale a 14,1 millones de electrón-voltios o lo que es lo mismo a  $2,3 \times 10^{-12}$  Joule. Este valor, que a primera vista parece ínfimo, es enorme si lo comparamos con la combustión química, porque un gramo de combustible puede producir aproximadamente 90 megavatios/hora de energía térmica en un reactor de fusión. Para lograr lo mismo por la vía convencional es necesario quemar ocho toneladas de petróleo, o bien once toneladas de carbón. Aunque no sólo las ínfimas cantidades de combustible necesario son una de las ventajas de la **fusión nuclear**. Otra de ellas es que este tipo de fusión no libera dióxido de carbono, uno de los elementos que

afecta el clima, sino que su residuo o "ceniza" es el helio, un gas inofensivo.

Al neutrón le cabe una tarea más, ya que tiene que calentar tritio en la pared del recipiente del reactor -el segundo componente combustible. El tritio es radioactivo; su periodo de semidesintegración es de 12,3 años. Por eso, el futuro reactor de fusión tendrá que elaborarlo en un circuito cerrado y consumirlo de inmediato. La "materia prima" para el tritio es **litio**. El litio, tercer elemento de la tabla periódica y el más liviano de todos los metales, se introduce en la pared del reactor. Si allí un neutrón bombardea el núcleo del isótopo litio-6, este último se descompone en un núcleo de helio y en el codiciado tritio.

El gran desafío es el confinamiento magnético de los dos isótopos de hidrógeno del plasma: deuterio y tritio. Al construir el confinamiento de campos magnéticos para el plasma, los investigadores de la fusión aprovechan que las partículas de plasma cargadas - protones y electrones - son forzadas por las fuerzas electromagnéticas a seguir órbitas helicoidales alrededor de las líneas del campo magnético (Fig. C 1). Guiadas por un campo magnético apropiadamente diseñado, como si estuvieran sobre rieles, las partículas pueden mantenerse alejadas de las paredes del recipiente del plasma. Para que el confinamiento sea "estanco" es necesario que las líneas del campo magnético dentro del recipiente toroidal de plasma formen anillos cerrados y anidados, igual que las líneas de los anillos de crecimiento del tronco de un árbol (Fig. C 2).

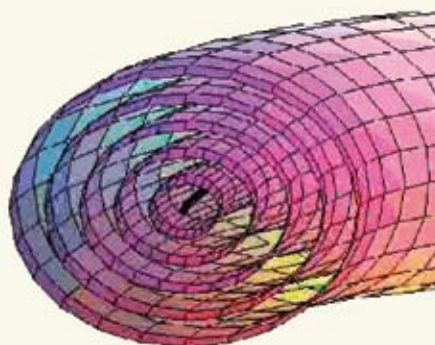
**C**



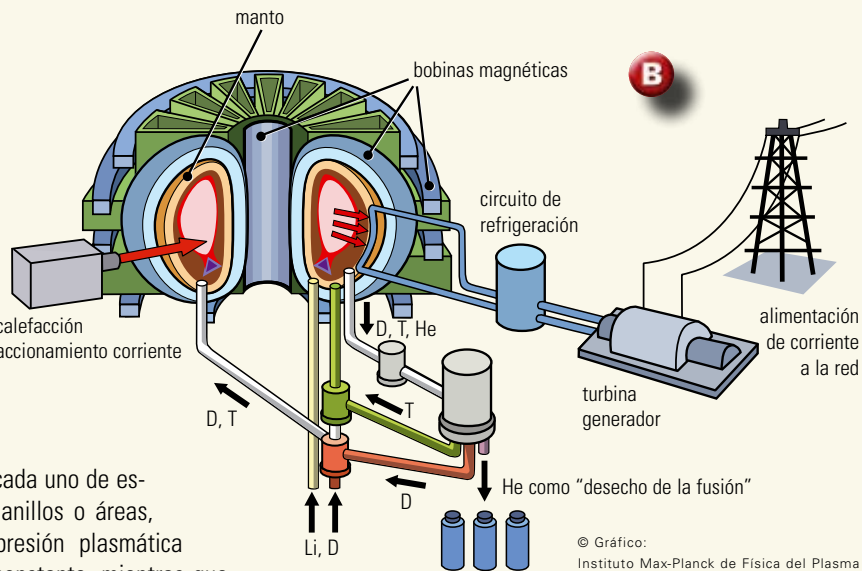
© Gráfico: Roland Wengenmayr

▲ **1** Las partículas de plasma eléctricamente cargadas se mueven a lo largo de las líneas del campo magnético (flecha negra) describiendo órbitas helicoidales. El radio de la espiral depende de la masa de la partícula: los protones más pesados describen espirales más amplias que los electrones.

► **2** Las superficies magnéticas aparecen anidadas, sin transiciones, igual que los anillos de crecimiento del tronco de un árbol. De este modo se evitan componentes del campo que indican hacia fuera y guiarían a las partículas de plasma hacia las paredes. De llegar estas allí no se podrían alcanzar las elevadas temperaturas de combustión.



© Gráfico: Instituto Max-Planck de Física del Plasma



© Gráfico: Instituto Max-Planck de Física del Plasma

En cada uno de estos anillos o áreas, la presión plasmática es constante, mientras que entre uno y otro anillo - desde el centro caliente hacia afuera - la presión va disminuyendo.

### TORSIÓN DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS

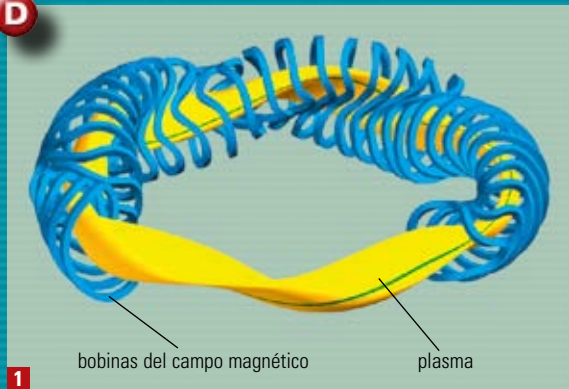
Sin embargo, los "tubos magnéticos" anidados perderían las partículas de plasma en sus extremos, con toda su preciosa energía térmica. Por eso se cierran formando un anillo (toroide). La fuerza de atracción del campo magnético es más fuerte del lado interior del anillo que en su exterior, debido a que allí las líneas del campo se comprimen más. La compresión arrojaría el plasma fuera del anillo. Para evitar esto los físicos torsionan el campo magnético sobre sí mismo una vez más. Las líneas del campo envuelven en forma helicoidal los "anillos de crecimiento", conduciendo de este modo las partículas de plasma una y otra vez desde el campo magnético más débil del anillo

más externo de vuelta al campo magnético más denso -confinando el plasma. Lograr este fenómeno requiere de un complejo

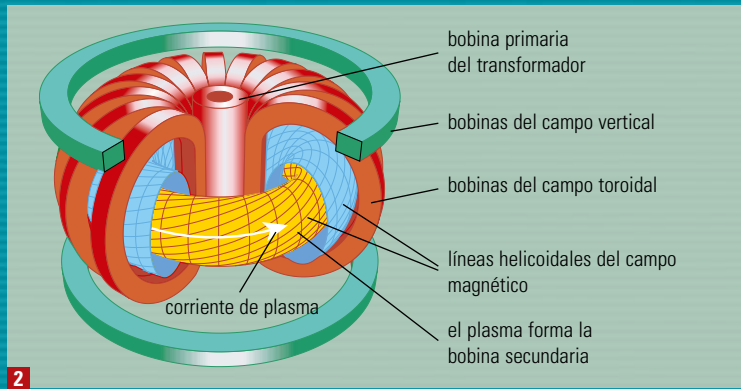
▲ Esquema de una futura central termonuclear del tipo Tokamak. En el manto que envuelve el recipiente de vacío donde está el plasma, los neutrones calientan el tritio que contiene el litio agregado. Después, el tritio es separado y mezclado con el plasma (T: tritio; D: deuterio; He: helio; Li: litio).

ordenamiento de bobinas magnéticas. Los investigadores de la fusión, que en las décadas de 1950 y de 1960 trabajaron en reactores estelares o "Stellarator" (del lat. *stella*: estrella), no tuvieron éxito en sus esfuerzos. Recién hoy, las supercomputadoras son capaces de calcular la geometría de las bobinas de manera tan precisa que los reactores estelares *Stellarator* están nuevamente en carrera para el desarrollo de un reactor de fusión (Fig. D 1). En estos momentos, en el Instituto de Partículas de Greifswald del Instituto Max-Planck de Física del Plasma se está gestando el *Stellarator* Wendelstein-7X, que demostrará que estos reactores son confiables para confinar el plasma caliente.

Sin embargo, un principio que compite con el antes mencionado "ha tomado la delantera": es el **Tokamak** (Fig. D 2). El nombre proviene del ruso ("*Torioidalnaya kamera s magnetyimi katushkami*") y significa en español "cámara toroidal de bobinas magnéticas". Mientras los reactores "*Stellarator*" crean el confinamiento magnético únicamente con bobinas exteriores, en los Tokamak, el plasma conduce la corriente eléctrica que ayuda a constituir una parte del confinamiento. La corriente eléctrica crea un campo magnético torsional que vira en forma helicoidal a su alrededor, manteniendo unido al plasma como si fuera un tubo o manguera. También funciona como calentador del plasma. El Tokamak tiene una estructura más sencilla que el *Stellarator*. Por



1 En un Stellarator, la confinación magnética es generada por un único sistema de bobinas, sin una corriente longitudinal en el plasma y sin transformador. Con lo cual, los Stellarator son aptos para operación continua. Al prescindir de la corriente plasmática toroidal, la torsión helicoidal de las líneas del campo forzadamente sólo se logra mediante bobinas magnéticas externas (azul). Estas deben constituir una torzada formando un „anillo“ de plasma (amarillo) torsionado hacia adentro, con cinco vértices.



2 Para establecer el confinamiento magnético, un Tokamak necesita tres campos magnéticos superpuestos: primero, un campo de forma toroidal, generado por las llamadas bobinas del campo toroidal, y que forma un anillo de plasma (amarillo). En segundo lugar, el campo de una corriente que fluye en el plasma (flecha blanca), inducida por una bobina de transformador (en el centro). En el campo combinado (superficies toroidales anidadas en azul y amarillo), las líneas del campo circulan describiendo un recorrido helicoidal. De este modo se logra la torsión necesaria de líneas del campo para el confinamiento del plasma y la estructuración de campos magnéticos. Y en tercer lugar, el Tokamak necesita un campo vertical que fije la posición de la corriente en el plasma (bobinas que forman el campo vertical, en verde).

© Gráfico: Instituto Max-Planck de Física del Plasma

→ eso ayudó a que la fusión de plasma lograra altas temperaturas. Como transformador sólo induce corriente en el plasma, pero únicamente mientras se modifica la intensidad de la corriente en su bobina primaria. De manera que, contrariamente al *Stellarator*, tiene que trabajar con pulsos. Para la operación de una central eléctrica, esto no es muy práctico, aunque un pulso perdure durante horas. Por eso, los físicos del plasma investigan un modo de operación alternativo: los campos electromagnéticos de alta frecuencia deben compensar los altibajos de los pulsos de tal manera que en el plasma fluya corriente continua (DC). El factor decisivo es un confinamiento magnético perfecto, que aisle lo mejor posible el plasma caliente y no permita que se enfríe. Los científicos del Instituto Max-Planck de Garching desarrollaron algunas ideas importantes al respecto. Ahora, estas ideas confluyen en la construcción del enorme reactor experimental internacional ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), en español Reactor Termonuclear Experimental Internacional, (las siglas ITER también significan “el camino” en latín) que se está construyendo en Cadarache, sur de Francia. El ITER probablemente entre en “combustión” en 2020, para generar en primera instancia más energía para la fusión que la consumida para calentar el plasma. La meta es obtener diez veces más energía. De lograrse, hacia 2035 le seguiría el proyecto DEMO (DEMONstration Power Plant): un prototipo de central termonuclear que generará electricidad por termofusión. A mediados de este siglo serían factibles las primeras centrales termonucleares de uso

comercial. En tal caso, se habrá creado una fuente de energía inagotable para la humanidad que cubriría la creciente demanda de electricidad mundial sin liberar peligrosos gases de invernadero. La reserva de combustible sería gigantesca, porque apenas 0,08 gramos de deuterio y 0,2 gramos de litio alcanzarían para cubrir la demanda actual de energía de una familia durante un año. El deuterio se encuentra en el agua pesada ( $D_2O$ ), presente en forma natural en todos los océanos. El litio es uno de los minerales que encontramos prácticamente en toda la corteza terrestre. El abastecimiento energético dejaría de ser un motivo de conflictos geopolíticos.

### POCA RADIOACTIVIDAD

Pero cada forma de generación de energía tiene su precio: las centrales nucleares albergan combustibles fisionables con fuerte irradiación radioactiva, el uso de combustibles fósiles hace peligrar el equilibrio climático, las grandes represas hidroeléctricas y las granjas eólicas alteran los paisajes. En la fusión termonuclear el corazón del recipiente del reactor es radioactivo. Los volúmenes de combustible son relativamente ínfimos y la delicada reacción de fusión no puede “escaparse”. A diferencia de la reacción en cadena de la fisión nuclear, el sistema de fusión se asegura a sí mismo: si el campo magnético se interrumpe y el plasma toca la pared del reactor, este último se enfría súbitamente y la reacción de fusión se interrumpe. La pared del recipiente supera el incidente casi sin sufrir daños, porque la densidad del plasma es mí-

nima. El peor escenario imaginable sería la fuga de tritio del reactor. La cantidad sería ínfima, pero el tritio, que se desintegra rápidamente puede ocasionar cáncer. Por eso, los planificadores de esta futura central termonuclear se toman muy en serio la posibilidad de un accidente, aunque sus consecuencias no podrían compararse ni remotamente con un accidente en una central nuclear. El bombardeo constante durante años con neutrones “activará” radioactivamente una parte del recipiente del reactor, situación que afecta a determinadas aleaciones del acero, donde los oligoelementos se transforman en isótopos radioactivos. Las partes de la pared del reactor deberán ser almacenadas durante cientos de años hasta que la **radioactividad** desaparezca. Los investigadores quieren morigerar este problema desarrollando nuevos materiales. Y para ello todavía tienen por delante una buena cantidad de años.

### 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:** Roland Wengenmayr

**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

**explora**  
Un Programa CONICYT

