

El interior de los planetas

En laboratorios y ordenadores, la materia comprimida y sometida a ondas de choque se vuelve metálica, engendra diamantes y nos descubre un centro de la Tierra al blanco vivo

Sandro Scandolo y Raymond Jeanloz

Quienes gustan de observar los planetas en el firmamento nocturno, disfrutaron sobremedida en el verano de 2003, cuando Marte pasó más cerca de la Tierra de cuanto lo había hecho en 60.000 años. Pero aun a esa distancia menor, seguía dando una impresión de silencioso misterio. Como todos los planetas, siempre pacíficos e inmutables, distintos de las estrellas que parpadean a su alrededor o de las luces de una ruidosa ciudad. El misterio es real: en ciertos aspectos, sabemos de ellos poco más que nuestros antepasados que les rendían culto. En particular, tenemos pocas pistas sobre cómo es su interior (ni siquiera el de la Tierra).

Lo que sí sabemos es que el interior de un planeta no es un lugar pacífico. De las pruebas existentes podemos inferir que está sometido a presiones de más de un millón de veces la presión atmosférica en la superficie terráquea y que la temperatura en su centro alcanza varios miles de grados centígrados. Cabe imaginarlo como una forja gigante especializada en procesar peculiares composiciones químicas bajo condiciones extremas, desde la simple mezcla de hidrógeno y helio de Júpiter y Saturno, o la mezcla más compleja de “hielos” (de agua, amoníaco y metano) de Neptuno y Urano, hasta las estructuras internas, “sólidas” en su mayor parte (silicatos con hierro en forma sólida y a veces líquida), de los planetas terrestres Marte, Venus y la propia Tierra. Aquí la palabra “sólido” se debe entender en sentido amplio; a lo largo de los tiempos geológicos, los objetos de tamaño planetario constituidos por roca, metal y hielo se deforman y, como pasa en los líquidos, en su interior se produce un transporte por convección. Asimismo, las sustancias que denominamos hielos no son estrictamente sólidas; existen en

forma de gases en la alta atmósfera de los planetas gigantes y en forma de fluidos en su interior.

El interior de los planetas es totalmente inaccesible; lo que sabemos, proviene de medidas indirectas y de su análisis posterior. Por ejemplo, las ondas sísmicas detectadas en la superficie de la Tierra nos dan una información muy rica sobre la estructura interna de nuestro planeta. Del mismo modo, la medida de la masa, los momentos gravitacionales (variaciones en la intensidad de la gravedad en diferentes posiciones por encima y alrededor del planeta), los campos magnéticos y otras magnitudes obtenidas por las sondas espaciales o por observación remota nos permiten inferir los perfiles de densidad y la dinámica interna de todos los planetas del sistema solar. Estimar la presión es bastante fácil, ya que disponemos de ecuaciones fiables que nos permiten calcularla a partir de la masa y la profundidad —las mismas ecuaciones que le indican a un submarinista cuál será el incremento de presión en una inmersión—. La observación de la superficie —por ejemplo, de la composición química y del espesor de la atmósfera— puede arrojar más luz sobre la composición de un planeta.

Desdichadamente, la información que se obtiene tan sólo da para estimaciones burdas. Y es difícil imaginar una sonda capaz de penetrar en la corteza de un planeta más de unos pocos kilómetros y de traernos una muestra del material interior. En su encuentro con Júpiter en 1996, la sonda Galileo se adentró en el planeta gigante hasta una profundidad de 600 kilómetros. Descubrió rasgos inesperados. Pero 600 kilómetros es un mero arañazo en la superficie de Júpiter, cuyo radio es de 70.000 km. La máxima profundidad a la que se ha perforado en la Tierra es de 12 km, tan sólo el

1. ¿QUE HAY EN EL CENTRO DE LA TIERRA? Edgar Rice Burroughs, más conocido como el creador de Tarzán, fue uno de los muchos autores que han imaginado mundos bajo nuestros pies. Esta portada imagina la vida en Pellucidar, el “mundo en el núcleo de la Tierra” de varias novelas que escribió entre 1913 y 1944. Según Burroughs, la corteza de la Tierra tiene sólo un espesor de 800 kilómetros. Más allá hay un vasto interior hueco, accesible por una abertura cercana al polo norte. En ese “ámbito salvaje de la naturaleza sin expoliar” habitaban “dinosaurios, mamíferos enormes y diversas razas inteligentes”. No es precisamente ésa la imagen del núcleo de la Tierra que se desprende de experimentos y mediciones, pero todavía seguimos sin saber mucho del interior de la Tierra y los demás planetas.

0,2 por ciento de la distancia al centro. Y hay todo tipo de razones para pensar que las muestras obtenidas por sondas tan limitadas no son representativas del interior del planeta.

Frustrado por la ausencia de un esfuerzo concertado para enviar sondas a regiones más profundas de la Tierra, David Stevenson, del Instituto Tecnológico de California, hizo recientemente una “modesta propuesta” —en alusión a un famoso texto satírico de Jonathan Swift—: con una fracción del esfuerzo económico necesario para enviar una sonda a una misión espacial, se podría verter en una fractura artificial de la superficie de la Tierra un millón de toneladas de hierro líquido. El hierro fundido, que iría penetrando, lenta e inexorablemente, hacia el centro de la Tierra, arrastraría unas sondas insolubles que enviarían información de primera mano desde las entrañas del planeta. Con esta sugerencia jocosa, Stevenson ha puesto de manifiesto la frustración de los geofísicos deseosos de sondear los misterios de la profundidad de los planetas.

No es el primero al que se le ocurren soluciones imaginativas. Un amplio número de científicos investiga un enfoque totalmente diferente para el estudio del interior de los planetas. En lugar de buscar un acceso directo al corazón de la

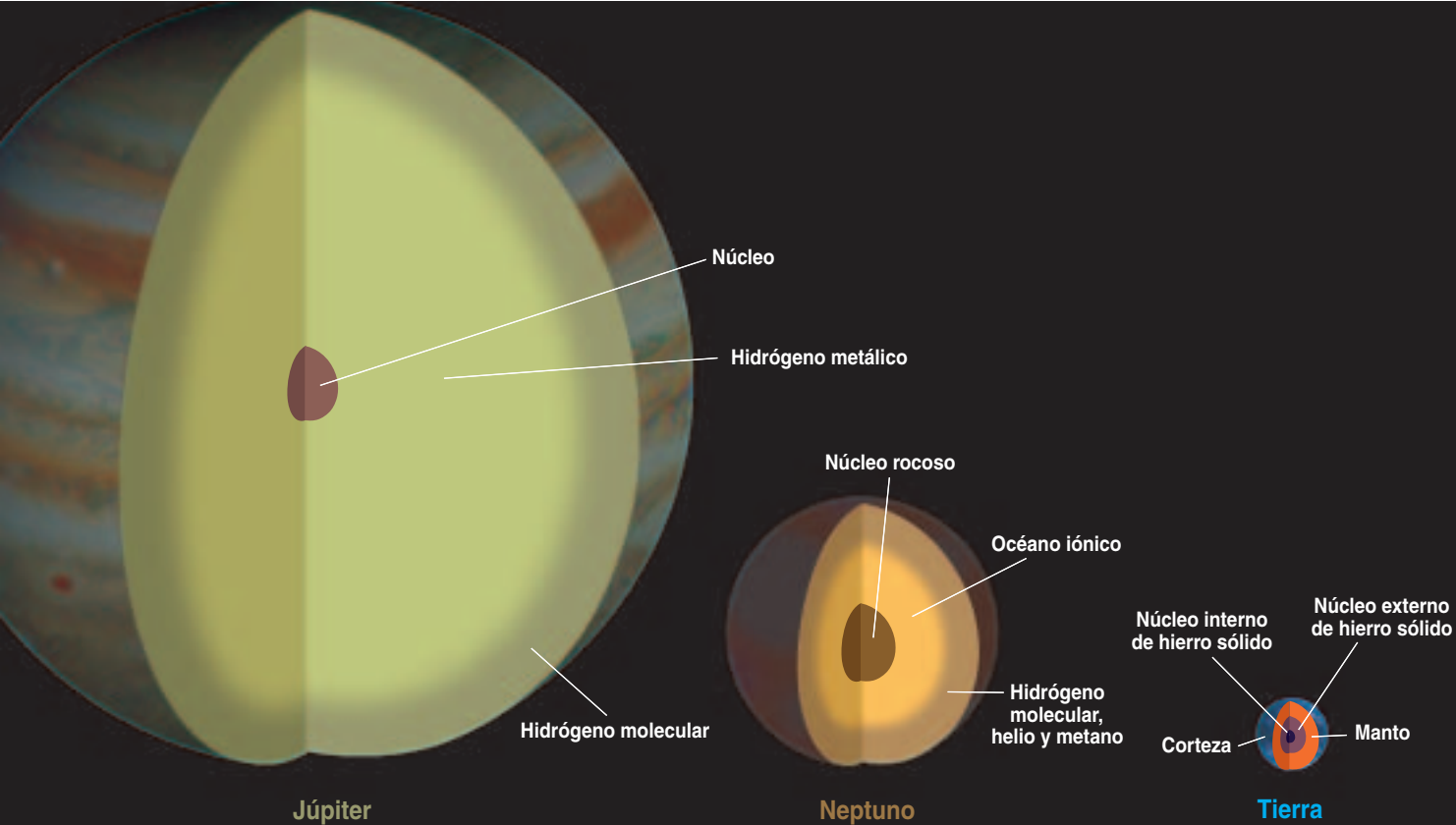


Tierra, desde comienzos del siglo XX se viene intentado simular las condiciones de presión y temperatura que moldean el interior de los planetas. Los micromundos creados en el laboratorio abren una ventana para la observación de la composición, dinámica y evolución de los planetas, e incluso permiten echar un vistazo a la historia del sistema solar y a su evolución hasta la conformación que presenta ahora. No es fácil producir presiones de un millón de atmósferas y temperaturas de unos pocos miles de grados dentro de las paredes de un labo-

ratorio; tampoco lo es mantenerlas, de forma controlada, un tiempo suficientemente largo para que quepa tomar mediciones. Por suerte, los experimentos se pueden complementar con cálculos teóricos basados en las mecánicas cuántica y estadística, que permiten simular a partir de primeros principios las condiciones existentes en las profundidades del interior de los planetas.

Diamantes quebrados

En las oscuras salas del Laboratorio de Geofísica de la Institución Carnegie de Washington, Dave Mao



y Russell Hewley se acercan cada día más a reproducir de forma controlada las condiciones extremas del interior de los planetas. Se valen de pequeñas cámaras o celdas donde unos yunques de diamante crean presiones extremas. Al ser el material más duro conocido, el diamante resulta muy adecuado para la función de comprimir sustancias a presiones de varios millones de veces la atmosférica.

Para llevar a cabo esta tarea se encastran en una potente prensa un par de gemas talladas en forma de brillante, cada una de un peso de un cuarto de quilate aproximadamente. Por desgracia, cuanto mayor es la presión ejercida por los pistones y tornillos, mayor es la probabilidad de que uno de los diamantes de varios milímetros de diámetro que comprimen la muestra falle y se produzca una implosión, con un sonoro estallido.

Mao reconoce que ha roto cientos de diamantes —pequeños, por suerte—. Pero el disgusto causado por el fallo de un diamante resulta más que compensado por la emoción que suscitan los asombrosos descubrimientos que ha logrado con este pequeño artilugio. En el caso de que los diamantes soporten la carga a que se los somete, la presión que se alcanza en el centro de la punta del yunque, de una di-

2. SE SABE QUE LOS GIGANTES GASEOSOS del sistema solar, Júpiter y Saturno, están compuestos del elemento más simple, hidrógeno, mezclado con algo de helio. Los experimentos recientes han confirmado que bajo condiciones de alta presión el hidrógeno se transforma en un fluido metálico. Se cree que el centro de Júpiter contiene un núcleo de roca sometido a presiones extremas. La composición de Urano y Neptuno es más rica: incluye agua, amoníaco y metano. Según experimentos y simulaciones, estas moléculas se disocian, con lo que se crea un océano iónico entre la capa exterior gaseosa y el núcleo sólido. En la Tierra, bajo un manto de rocas de silicatos y óxidos existe un núcleo de hierro, a su vez con un núcleo interior sólido rodeado por una parte exterior líquida.

mensión de varias decenas de micrómetros, bastará para reproducir las condiciones existentes a lo largo de una fracción considerable del radio planetario.

Al comprimir la materia a presiones planetarias, se alteran sus propiedades macroscópicas, incluidas algunas esenciales para la configuración del planeta, como la resistencia mecánica, la viscosidad y la conductividad eléctrica. Las sustancias pueden cambiar de estado bajo una presión extrema; por ejemplo, el agua y muchos otros líquidos se solidifican. En casos más raros puede suceder lo contrario. Los sólidos pueden cambiar de estructura cristalina de manera que se optimice el empaquetamiento de los átomos. Por ejemplo, una sal transparente puede transformarse en un metal negro. Los materiales magnéticos, así el hierro, pierden su magnetismo. Cuanto más alta sea

la presión aplicada, más larga será la lista de sorpresas. Dicho de otra forma, bajo presión extrema el enlace químico cambia tan profundamente, que emerge una nueva tabla periódica: el potasio se transforma en un metal de transición y el oxígeno en un superconductor.

El trabajo de Mao y Hemley se encuadra en un resurgimiento del interés por los experimentos a alta presión. Son miembros de una segunda generación de investigadores en un campo que se creía había alcanzado su madurez hace más de 50 años, con el premio Nobel concedido a su pionero Percy W. Bridgman. Cientos de sustancias han sido comprimidas a presiones que superan las 100.000 atmósferas con el ingenioso aparato de Bridgman. Los sucesores de Bridgman han conseguido nuevos resultados con métodos estáticos de compresión, como la celda de yunque de

diamante, y con métodos de compresión dinámica más refinados, basados en ondas de choque. Tan pronto como se anuncian nuevos récords de presión, se descubren fenómenos inéditos y sorprendentes. En 1976 Mao y Bell rompieron la barrera de un millón de atmósferas. No fue un mero suceso simbólico. Indicaba que ya se podían reproducir las presiones que reinan en el fondo del manto terrestre y en las grandes profundidades de los planetas gigantes.

El hidrógeno metálico

Hacia 1935, Eugene Wigner, uno de los padres de la mecánica cuántica y a la sazón catedrático de la Universidad de Princeton, apuntó que el hidrógeno, gas inerte en condiciones normales, podría transformarse en un sólido metálico parecido al litio o al sodio a presiones lo suficientemente altas. La propuesta de Wigner implicaba que “el elemento número uno”, el ente químico más simple, sólo un electrón ligado a un protón, ofrecía una complejidad notable.

Ya que el hidrógeno constituye hasta el 90% del volumen de Júpiter y Saturno, la aparición de un estado metálico del hidrógeno a alta presión modificaría notablemente nuestra concepción del interior de los planetas. Las corrientes eléctricas que circulan por las regiones metálicas del interior de planetas y estrellas generan, mediante un mecanismo parecido al de una dinamo, los campos magnéticos planetarios y estelares. El campo magnético terrestre se origina en la líquida y metálica parte exterior del núcleo. El campo magnético de Júpiter, medido por el vehículo espacial Voyager, es diez veces más intenso que el de la Tierra, y su perfil, bastante más complicado. Se puede explicar en parte esta complejidad si la fuente del campo se encuentra mucho más alejada del centro, en términos relativos, que en la Tierra. La predicción de Wigner sobre el hidrógeno metálico se basaba en un análisis simplificado del estado fundamental del hidrógeno, pero la presión a la que calculó que se produciría la transición al estado metálico, alrededor de 250.000 atmósferas, correspondía a una profundidad menor

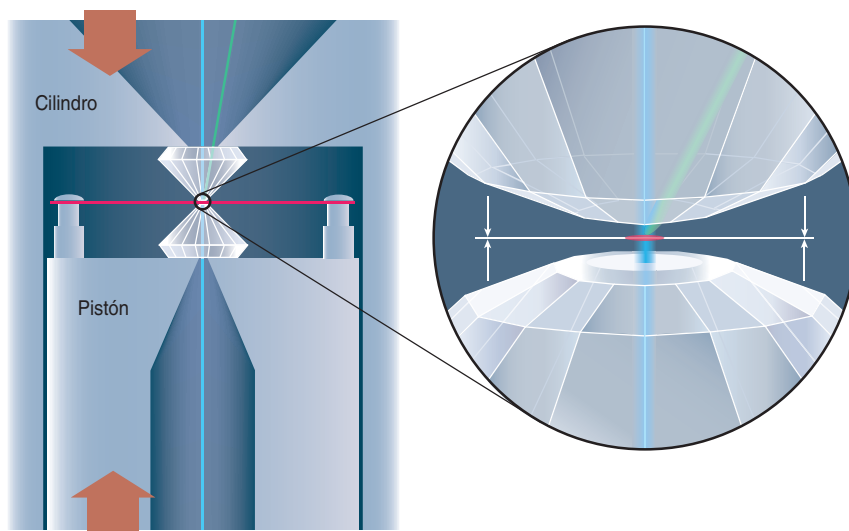
que un veinteavo del radio planetario de Júpiter. En otras palabras, la mayor parte del gran gigante gaseoso del sistema solar tenía que hallarse en estado metálico. Pero ese hidrógeno metálico se tenía que encontrar en estado líquido, no sólido, para que pudiera comportarse como una dinamo.

Los logros conseguidos con la celda de yunque de diamante de Mao y Bell incitaron a los científicos de altas presiones a someter a contrastación la predicción de Wigner y buscar el estado metálico del hidrógeno. Desgraciadamente, un cuarto de siglo más tarde, y casi 70 años tras la propuesta de Wigner, ningún grupo de investigación ha sido capaz de demostrar concluyentemente que haya conseguido transformar el hidrógeno en un sólido metálico bajo compresión estática en el laboratorio, a pesar del enorme esfuerzo realizado.

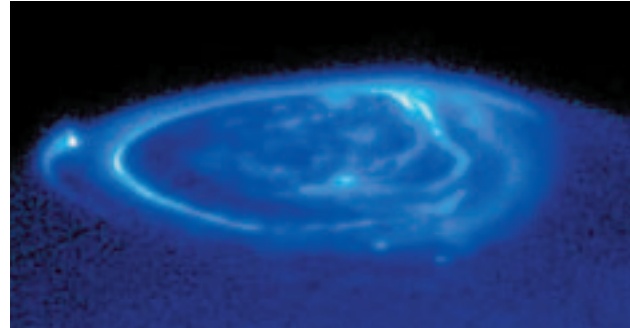
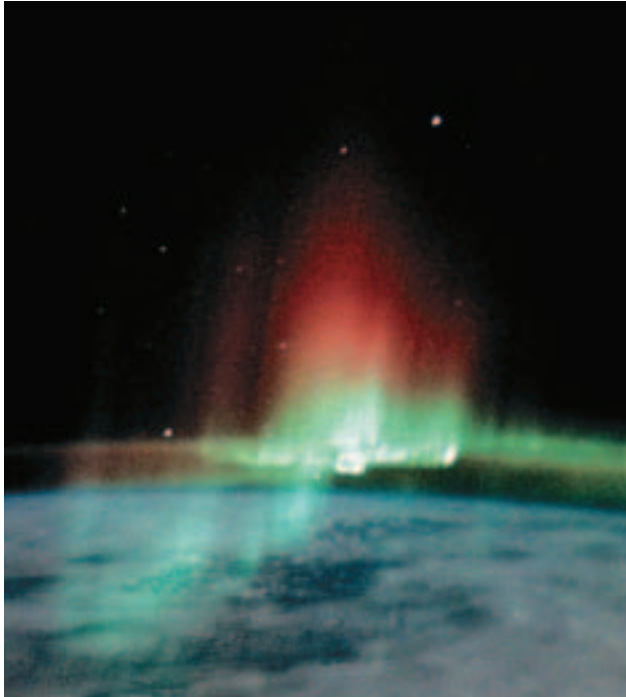
La propuesta de Wigner, probablemente cierta a presiones más altas, resultaba deficiente en lo que se refería a cuándo y cómo se produce la metalización. La explicación que va configurándose se basa en una sutil interacción entre la química y la física.

En la tabla periódica de elementos, el hidrógeno se coloca tradicionalmente en la esquina superior izquierda, justo encima del litio y el sodio. Dimitri Mendeleev alojó los átomos alcalinos —átomos con una sola valencia electrónica— en la columna I de la tabla. El estado atómico del hidrógeno cumple con este criterio. Pero si se añade un electrón a un átomo de hidrógeno se crea un ion bastante estable, criterio que utilizó Mendeleev para colocar átomos tales como el yodo en la columna XVII, en el lado opuesto de la tabla periódica.

La propuesta de Wigner dependía de esta ambigüedad química. A baja densidad, la naturaleza prefiere el estado diatómico del hidrógeno (H_2), en el cual cada átomo de hidrógeno presenta el comportamiento de un elemento de la columna XVII. Sin embargo, con una compresión lo bastante alta el hidrógeno atraviesa la tabla hasta la columna I, donde Mendeleev lo había colocado. Por desgracia, la determinación precisa de cuál es la presión a la que esto ocurre requiere resolver la mecánica cuántica de los electrones y comparar su energía en los dos estados: el diatómico aislante



3. EN UNA CELDA DE YUNQUE DE DIAMANTE se comprime una muestra pequeña de materia entre un par de gemas a presiones cercanas a las que existen en el interior de los planetas: millones de veces la presión atmosférica de la Tierra. En el dispositivo, que viene a tener el tamaño de una caja de pañuelos de papel, un conjunto de pistones y tornillos aplica presiones capaces incluso de romper el diamante, el material más duro conocido. Se dispersa (verde) un haz de láser o de rayos X (azul); se obtiene así información detallada de una muestra diminuta y detectan alteraciones en el material, a menudo muy grandes.



4. AURORAS PLANETARIAS. Los fenómenos luminosos creados por las colisiones de partículas cargadas con la atmósfera hacen visibles las líneas de fuerza magnética generadas por los núcleos planetarios. La Tierra tiene auroras cerca de ambos polos; a la izquierda, se muestra una aurora boreal vista desde una lanzadera espacial. Las auroras de Júpiter son más complejas, como se ve en la imagen superior, obtenida por el Telescopio Espacial Hubble; revelan la magnetosfera más fuerte y poderosa que rodea a Júpiter. La magnetosfera joviana constituye uno de los indicios de que buena parte del interior de ese planeta debe consistir en hidrógeno en estado fluido metálico.

y el monoatómico metálico. Las ecuaciones básicas de la mecánica cuántica acababan de ser propuestas y se habían resuelto para unos pocos casos de la mayor simplicidad, entre ellos el propio átomo de hidrógeno. Mas para resolverlas en casos complejos, como un sólido a alta presión, se necesitaban aproximaciones muy drásticas. El cálculo de la presión de transición que hizo Wigner se quedó muy corto.

Tras depurar la teoría y mediante extrapolaciones a partir de resultados experimentales, se han obtenido nuevas estimaciones: el hidrógeno se metaliza a presiones superiores a 4 millones de atmósferas, justo dentro de lo que pueden las celdas de yunque de diamante. Hoy se cree que la metalización del hidrógeno quizá sea más compleja que un simple salto de un lado a otro de la tabla periódica. En recientes experimentos se ha demostrado que el yodo se transforma en metal mientras permanece todavía en estado diatómico (I_2); se transforma en un sólido monoatómico de tipo alcalino tan sólo a presiones más altas. En otras palabras, el camino al hidrógeno metálico puede que no sea directo, sino que intervenga una secuencia de transiciones que aún no ha sido descubierta.

Choques

Que el hidrógeno se resista a transformarse en metal bajo compresión puso en entredicho nuestra concepción de Júpiter. ¿Y si el hidrógeno

metálico no es ubicuo en Júpiter, sino que se encuentra limitado a aquellas áreas cercanas al núcleo del planeta donde la presión es máxima?

Si se presta atención a la curva que liga temperatura y presión en los distintos planetas conforme a su composición, se atisbará una respuesta (véase la figura 5). El interior de los planetas está sometido a la vez a presiones y temperaturas extremas. Se ha conjeturado que quizá la temperatura pudiera desempeñar una inesperada función en la metalización. No se puede probar mediante experimentos con celdas de yunque de diamante. Es difícil calentar los materiales en el interior de una celda de yunque de diamante, particularmente en el caso del hidrógeno. El hidrógeno caliente tiende a reaccionar con la junta que lo contiene entre las puntas del yunque, así como con los propios diamantes. Debido a esto, la temperatura más alta que se ha alcanzado en una celda de diamante que contuviera hidrógeno sigue siendo inferior a 850 kelvin, aunque con otros elementos se han podido realizar importantes estudios de los efectos combinados de presión y temperatura, como veremos más adelante. (Un grado kelvin, la unidad de la escala absoluta de temperaturas kelvin, es igual a un grado centígrado, pero la escala comienza en el cero absoluto, o sea, a $-273,15$ grados centígrados.)

Efectuar la compresión del hidrógeno mediante ondas de choque

despierta más esperanzas, aunque tropieza con el problema opuesto. Presiones de millones de atmósferas sólo se pueden alcanzar mediante una onda de choque intensa, como las generadas cuando un proyectil metálico o un pulso intenso de luz láser impacta contra una muestra. Pero cuanto más intenso es el choque, más alta la temperatura final de la muestra. Cuando se aplican presiones del orden del millón de atmósferas mediante impacto, el hidrógeno se calienta a temperaturas superiores a 20.000 kelvin, mucho más altas que las calculadas para la profundidad correspondiente en el interior del planeta.

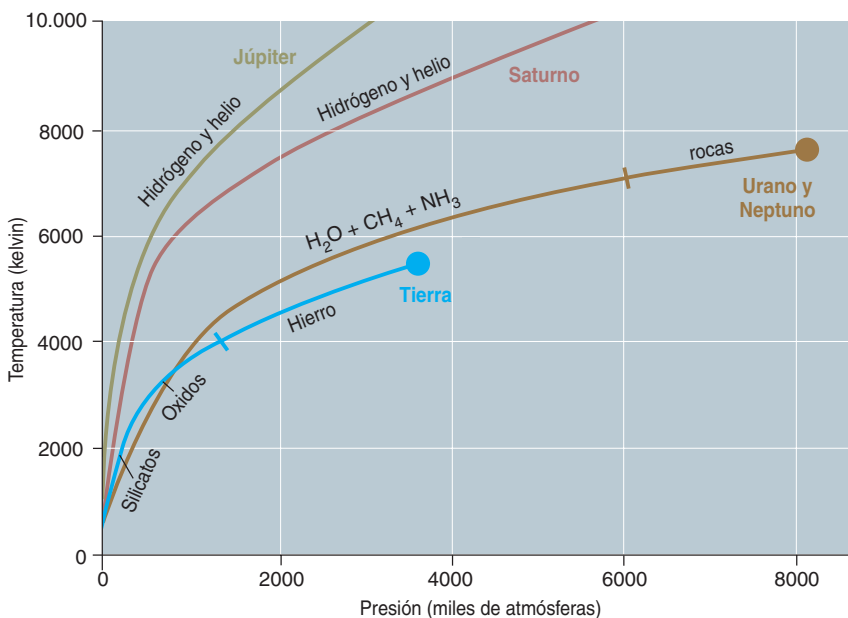
Sin embargo, en 1995 Bill Nellis, Sam Weir, Arthur Mitchel y sus colaboradores, del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, consiguieron diseñar, y que funcionara, un aparato de ondas de choque mejorado gracias a un par de viejos trucos. En primer lugar, enfriaban la muestra que sufriría el choque para incrementar su densidad hasta acercarla al valor que se quería alcanzar. En segundo lugar, diseñaron un aparato donde la onda de choque reverberara entre el proyectil y las paredes de la cámara experimental.

Los cálculos predecían que mediante una onda de choque reverberante se alcanzarían presiones mucho más altas sin que la temperatura aumentase tanto. A diferencia de los experimentos con yunque de diamante, donde la muestra puede man-

tenerse en estado comprimido durante un tiempo ilimitado, en los experimentos de onda de choque las medidas deben realizarse deprisa. En menos de un microsegundo la muestra explota, incinerada en el choque. A pesar de ello, el equipo de Nellis consiguió finalmente medir la conductividad del hidrógeno hasta 1,8 millones de atmósferas y 2900 kelvin, circunstancias muy próximas a las del núcleo de Júpiter. Descubrieron que el hidrógeno pasa al estado metálico a 1,4 millones de atmósferas y 2600 kelvin, menos de la mitad de la presión necesaria, posiblemente, para que se metalice a temperatura ambiente. Ni a Wigner ni a los científicos especialistas en yunque de diamante que buscaban el hidrógeno metálico se les pasó por la cabeza que el efecto de la alta temperatura fuese tan poderoso. Sin embargo, la imagen final de Júpiter que emerge de los experimentos de onda de choque es nítida. La conductividad medida y la nueva estimación de la presión de transición a la fase metálica concordaban con la intensidad y distribución del campo magnético en la superficie de Júpiter. Cada ladrillo del modelo encajaba donde debía: tanto en la escala microscópica del experimento de la onda de choque como en la macroscópica de la generación del campo magnético.

En el cielo con diamantes

Neptuno y Urano se encuentran cerca de la frontera exterior del sistema solar, a unos miles de millones de kilómetros del Sol. No sorprende, por lo tanto, que el primer intento serio de proponer un modelo para el interior de estos planetas comenzara cuando el Voyager II se acercó a ellos, hace menos de 20 años. De todas formas, se venía conjeturando desde hacía mucho, basándose en su densidad y distancia al Sol, que el interior de Neptuno y Urano debe tener una composición más rica que el de Júpiter y Saturno: el agua, el amoníaco y el metano —los “hielos planetarios”—aportarían casi un 80% de la masa de ambos. Los estudios espectroscópicos han revelado concluyentemente la presencia de esas moléculas en la atmósfera exterior de estos planetas, y también en la atmósfera de las estre-



5. NUEVOS EXPERIMENTOS han arrojado luz sobre la interacción entre la temperatura y la presión que crea estados de la materia poco frecuentes en el interior de los planetas. Se piensa que la temperatura desempeña una función importante en los gigantes gaseosos. Según los experimentos de onda de choque, el hidrógeno sometido a altas temperaturas se metaliza a una fracción de la presión necesaria para producir esa transición a temperatura ambiente: respalda las predicciones según las cuales una buena parte de Júpiter se hallaría constituido por hidrógeno metálico. No se cree que las temperaturas alcancen valores tan altos en los interiores de Urano y Neptuno; es más fácil, pues, obtener modelos de ellos mediante experimentos de yunque de diamante y simulaciones por ordenador. Asimismo, las condiciones de presión y temperatura en el centro de la Tierra caen dentro de lo factible en los experimentos con yunque de diamante que incorporan el calentamiento del hierro con láser; sin embargo, los problemas técnicos mantienen vivo el debate sobre la interpretación de los resultados experimentales.

llas pequeñas denominadas “enanas marrones”.

La verdad es que, antes de que se reprodujeran las presiones y temperaturas de Neptuno en el laboratorio, se sabía muy poco sobre el estado de esos hielos moleculares en las circunstancias físicas de las profundidades del planeta. Por ello, asombró que Marvin Ross anunciase en 1981, tras analizar resultados recientes de experimentos con ondas de choque y metano, que en el núcleo de Neptuno quizá existiese una mina gigantesca de diamantes. El metano se compone de un átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno (CH₄), pero Ross argumentó que la compresión a presiones extremas causa la disociación completa de la molécula; los átomos de carbono se agregan de nuevo en su forma más estable en esas circunstancias: el diamante. Aunque no había duda de que éste debía ser el

destino del metano en las regiones más profundas de Neptuno, permanecía abierta la cuestión de si no habría que borrar al metano completamente de la lista de componentes del interior planetario. Hasta 1996 no aparecería un indicio de cuál podía ser la respuesta, pero no se originó ni en experimentos de ondas de choque, ni de yunque de diamante. No vino de experimento alguno, sino de una manera radicalmente distinta de simular el interior de los planetas.

Extraer información sobre la composición a gran escala de un planeta a partir de un choque de una duración menor que una millonésima de segundo, o de una muestra de una millonésima de gramo comprimida a altas presiones, constituyó un paso de gigante para la ciencia planetaria y un ejemplo fascinante de empeño científico. Pero como las leyes de la naturaleza se cumplen

hasta a escala atómica, no hay razón alguna por la que los experimentos no puedan miniaturizarse aún más, hasta el punto de que la muestra conste sólo de unas pocas moléculas. Esta es la escala donde los métodos teóricos disponibles y los medios de computación más modernos resuelven las ecuaciones básicas que gobiernan el comportamiento de los electrones y los átomos, donde proporcionan una imagen detallada de cómo los átomos chocan entre sí, vibran y se comprimen bajo la acción combinada de la presión y temperatura.

La idea de simular el comportamiento de la materia a escala atómica es tan vieja como el propio ordenador. En 1954, Enrico Fermi, Stanislaw Ulam y Jon Pasta captaron lo útil que podía ser para la resolución de las ecuaciones de Newton sobre el movimiento. Resolvieron la dinámica en tiempo real de una colección de masas puntuales que interactuaban entre sí acopladas mediante muelles (se trata de un sistema ideal). Sin embargo, los avances teóricos acerca de las interacciones atómicas (mediante la mecánica cuántica) y, no menos importante, el aumento asombroso de la velocidad de los ordenadores, nos han llevado a un punto en el que la idea de simular el comportamiento de un grupo de átomos a partir de primeros principios —a par-

tir de la resolución exacta de las leyes de la mecánica cuántica y clásica— resulta tan factible como comprimir el material real en una celda de yunque de diamante o en un aparato de ondas de choque.

Así que en 1996 uno de nosotros, Scandolo, se planteó, con sus compañeros de Trieste, simular por ordenador el sino del metano en las condiciones de presión y temperatura del interior de Neptuno.

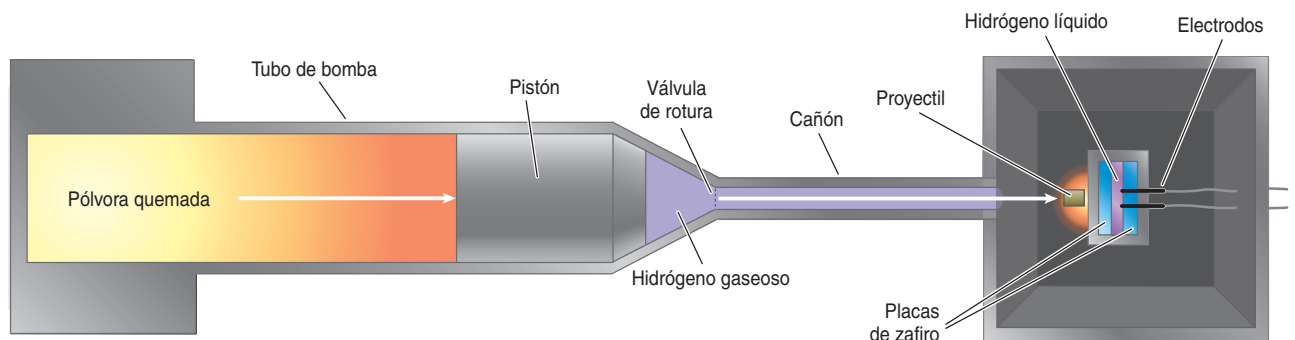
Neptuno virtual

Una simulación del comportamiento del metano en condiciones planetarias no difiere demasiado, conceptualmente, de lo que Fermi, Pasta y Ulam hicieron cuatro décadas antes. El grupo de Trieste tomó un puñado de moléculas —16 fue el máximo que pudimos permitirnos con las supercomputadoras disponibles en ese momento—, las colocó en una celda de simulación e hizo que las posiciones de los átomos evolucionaran según las ecuaciones de Newton, esto es, con una aceleración igual a la fuerza dividida por la masa atómica.

Las ecuaciones de Newton se resuelven en este caso dividiendo el tiempo en intervalos muy pequeños, cada uno menor de un femtosegundo (10^{-15} segundos), calculando las fuerzas en cada etapa y actualizando las posiciones atómicas de acuerdo con ellas. Un picosegundo (10^{-12} segundos) de dinámica requiere ite-

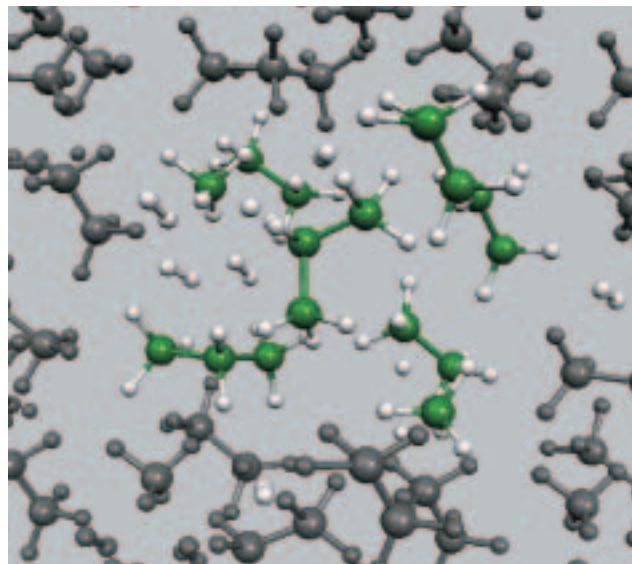
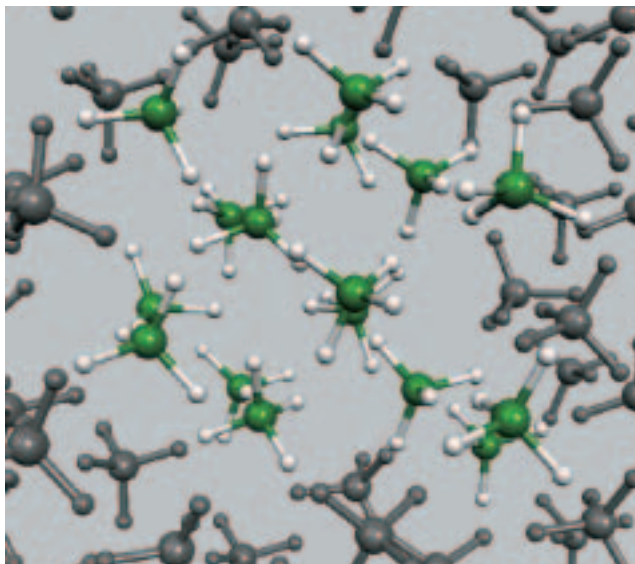
rar esta operación más de mil veces. Necesitamos un supercomputador, en vez de las máquinas rudimentarias de tarjetas perforadas de que disponían nuestros predecesores en los años cincuenta, porque la fuerza ejercida por un átomo no se puede representar en el modelo informático simplemente con un muelle, como hicieron Fermi, Pasta y Ulam. Las interacciones entre átomos se deben a la superposición de sus nubes electrónicas. Los electrones se reajustan instantáneamente con cada cambio de posición de los átomos y, en función de las condiciones externas aplicadas al sistema, mantienen juntos a los átomos como si fueran una especie de pegamento (el enlace químico), o causar su separación, como en el caso de la disociación molecular.

El seguimiento de los reajustes de las nubes electrónicas, y por tanto el cálculo de las fuerzas que actúan sobre los átomos, es una tarea difícilísima que supone resolver la mecánica cuántica de cientos de electrones simultáneamente y repetir la operación tantas veces cuantas lo necesite la dinámica atómica. No fue una sorpresa que se requirieran dos semanas de supercomputador para simular sólo cinco picosegundos de la dinámica “real” de 16 moléculas de metano. Por suerte, las reacciones químicas, así la disociación, ocurren muy rápidamente, de ordinario en tiempos del orden



6. EN LOS EXPERIMENTOS DE ONDAS DE CHOQUE se comprime la materia a alta presión y alta temperatura mediante un pulso de luz de láser o un proyectil que aplasta una muestra. A mediados del decenio de 1990, un equipo del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore construyó un aparato capaz de comprimir por choque una muestra de hidrógeno a una presión de 1.800.000 atmósferas y una temperatura de 2900 kelvin, próximas a las condiciones reinantes en el núcleo de Júpiter. Sus experimentos demostraron que la alta temperatura reduce drásticamente la presión necesaria para

que el hidrógeno pase a estado metálico; se respalda así la idea de que una gran parte de Júpiter consiste en hidrógeno metálico. En la “pistola” de ondas de choque se enfría una muestra de hidrógeno líquido, que se coloca en un contenedor. Los gases calientes de una explosión de pólvora empujan un pistón, que comprime el hidrógeno gaseoso encerrado en el tubo del pistón. Cuando el gas entra a gran velocidad en el cañón, impele un proyectil hacia la muestra. El choque, violento, somete a la muestra, durante un instante, a unas condiciones como las del interior del planeta.



7. ¿PODRÍA ESTAR LLENO DE DIAMANTES el centro de Neptuno? Los experimentos realizados con metano, de fórmula química (CH_4), sugieren que bajo presiones extremas el metano se disocia: sus átomos de carbono se separan de los de hidrógeno. En tales circunstancias cabe esperar que los átomos de carbono se agreguen para crear diamantes, la forma más estable del carbono. Las simulaciones por ordenador avalan esta predicción. Uno de los autores, Scandolo, y sus colaboradores del Centro Internacional de Física Teórica Abdus Salam de Trieste simularon la dinámica de 16 moléculas de metano y encontraron que, en efecto, se forman diamantes en las circunstancias de alta presión y alta temperatura de

Neptuno. Sin embargo, a presiones intermedias el metano se disocia parcialmente y forma cadenas de hidrocarburos. Se muestran en esta figura instantáneas de dicha simulación. A la izquierda, se ven las 16 moléculas de metano originales (un átomo verde de carbono enlazado a cuatro átomos blancos de hidrógeno), para una temperatura y una presión no muy altas. Tras un picosegundo, con una temperatura de 4000 kelvin y una presión de 100 gigapascal (aproximadamente 1 millón de atmósferas), las moléculas se han disociado y re combinado, generándose dos moléculas de metano, cuatro de etano (C_2H_6) y dos de propano (C_3H_8); quedan átomos de hidrógeno sobrantes, presentes sobre todo como moléculas diatómicas.

de los femtosegundos; no se corría, pues, el riesgo de que no llegásemos a observarlas, si es que tenían lugar en nuestro entorno simulado.

En este pequeño mundo virtual encontramos los diamantes de Ross. Las simulaciones confirman que se crean diamantes en las circunstancias propias de las regiones más profundas de Neptuno. Pero los cálculos ofrecieron, fue una sorpresa, un cuadro bien distinto a presiones intermedias, esto es, las correspondientes al grueso del planeta. El metano, en la simulación, en vez de romperse en sus componentes atómicos, se disociaba sólo parcialmente y acababa constituyendo cadenas de hidrocarburos, cadenas de dos o tres átomos de carbonos rodeados de átomos de hidrógeno. Este descubrimiento reforzó la idea de Ross de que había que eliminar el metano de la lista de “hielos”. La química a las profundidades de Neptuno tenía que ser más compleja que lo que se había pensado hasta entonces. En particular, la producción de hidrocarburos en el interior

planetario explicaría la anómala abundancia de alguna de estas sustancias observada en la atmósfera del planeta, donde podrían haber sido arrastradas desde el interior por corrientes convectivas.

La confirmación experimental directa de la formación de hidrocarburos y diamantes a partir del metano a condiciones planetarias se produjo tan sólo tres años después, en 1999, en un experimento de yunque de diamante realizado en Berkeley por uno de los autores (Jeanloz) con Robin Benedetti y otros colaboradores. Se produjeron verdaderos diamantes en un baño de hidrocarburos fluidos cuando se calentó una muestra de metano a 2500 kelvin y se la comprimió por encima de 200.000 atmósferas en la celda de diamante.

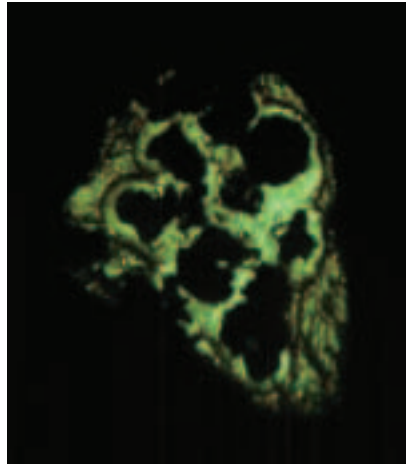
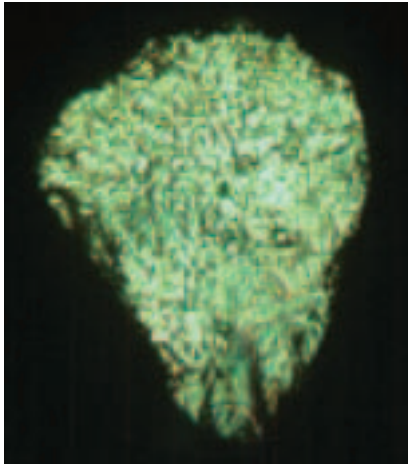
Este valor de la presión ni siquiera llega a la predicha por el ordenador para la disociación del metano; quizá no pueda, pues, encontrarse metano en absoluto en las profundidades de Neptuno. Estos hallazgos tienen consecuencias adicionales.

El proceso de separación del metano en hidrógeno que sube y diamantes que se hunden, desprende probablemente una energía gravitacional que actúa como motor de los movimientos convectivos del interior fluido del planeta. La cantidad de esta energía debe de ser grande, equiparable al exceso de calor que parece escapar del interior de Neptuno, una vez descontado el calor recibido del Sol, según indican sus emisiones infrarrojas.

Un debate acalorado

Nuestro viaje virtual al interior de los planetas nos devuelve finalmente a la Tierra. Aunque se trata del planeta mejor estudiado, su interior sigue siéndonos muy desconocido. Acceder a él es casi imposible. Sin embargo, guarda información clara sobre cómo se formó nuestro planeta y cómo evolucionó a lo largo del tiempo geológico; de ahí los decenios de experimentos de alta presión.

Una de las preguntas más inmediatas es: ¿qué temperatura alcanza su interior profundo? El calor del



8. LA CONFIRMACION EXPERIMENTAL de que se podían formar tanto hidrocarburos como diamantes a partir de metano en condiciones planetarias vino de un ensayo con yunque de diamante, realizado en la Universidad de California en Berkeley por Jeanloz y sus colaboradores. Se muestran aquí unas fotomicrografías de una muestra de metano, tomadas antes (*izquierda*) y después de comprimirla y calentarla con láser en una celda de diamante. En las mediciones espectroscópicas de absorción de infrarrojos, tomadas posteriormente, la señal del metano se difumina; la sustituyen unas bandas de absorción características del carbono con enlace doble o triple, típico de los hidrocarburos. En el centro del haz del láser, donde el calentamiento es más intenso, se manifiesta la presencia de diamantes.

manto y del núcleo de la Tierra causa la actividad geológica, desde las erupciones volcánicas a los movimientos de los continentes, pasando por los terremotos y el depósito de minerales. Gran parte de este calor es el remanente de la formación de nuestro planeta hace 4500 millones de años (algo de calor se origina también en la desintegración espontánea de isótopos radiactivos naturales de plomo, torio y uranio). Sigue impulsando la evolución geológica de la Tierra.

La forma más directa de contestar a esa pregunta consiste en determinar la temperatura de fusión del material a alta presión del núcleo de la Tierra. La medición de las ondas sísmicas que atraviesan el interior de la Tierra demuestra que la parte externa del núcleo es líquida (con una viscosidad comparable a la de los océanos), mientras que el aumento de presión con la profundidad hace que la interna se solidifique. Por tanto, la interfaz entre el núcleo interno y el externo debe encontrarse a la temperatura de congelación (o, si se prefiere, de fusión) del material del núcleo a esa profundidad. Habida cuenta de la naturaleza fluida del interior pro-

fundo, medidas sísmológicas y ecuaciones de mecánica de fluidos valen para calcular la presión en esta frontera: 3,25 millones de atmósferas.

Puede asimilarse la Tierra a una prensa enorme que nos daría la temperatura de congelación a alta presión de la aleación del núcleo, si pudiésemos insertarle un termómetro. Parece lógico, pues, que se piense en construir una prensa en el laboratorio para medir las temperaturas de fusión y congelación de las aleaciones pertinentes a presiones de entre 3 y 4 millones de atmósferas. Si esto fuera posible, cabría determinar la temperatura de la frontera entre el núcleo interno y el externo y, mediante una modesta extrapolación, estimar la temperatura en el mismo centro del planeta.

Michael Brown, por entonces doctorando de la Universidad de Minnesota, comenzó a frecuentar el Laboratorio Nacional de Los Alamos al final de los setenta para trabajar con Robert McQueen, experto en los experimentos con ondas de choque. Brown y McQueen demostraron que el hierro se funde cuando se le somete mediante ondas de choque a presiones de unos 2.500.000 atmósferas mediante téc-

nicas creadas en ese laboratorio. Descubrieron que, aunque la velocidad del sonido en el hierro aumenta cuando se somete éste a altas presiones, cae bruscamente al llegar a los dos millones y medio de atmósferas, tal y como cabía esperar en la fusión, para aumentar de nuevo si se le aplican al hierro fundido presiones aún más altas.

Estos resultados, publicados en 1982, eran comparables a los de la sísmóloga danesa Inge Lehman, que descubrió el núcleo interno en 1936 al determinar que la velocidad de las ondas sísmicas se incrementa abruptamente a una profundidad que ahora identificamos como la interfaz entre las regiones sólida y líquida del núcleo.

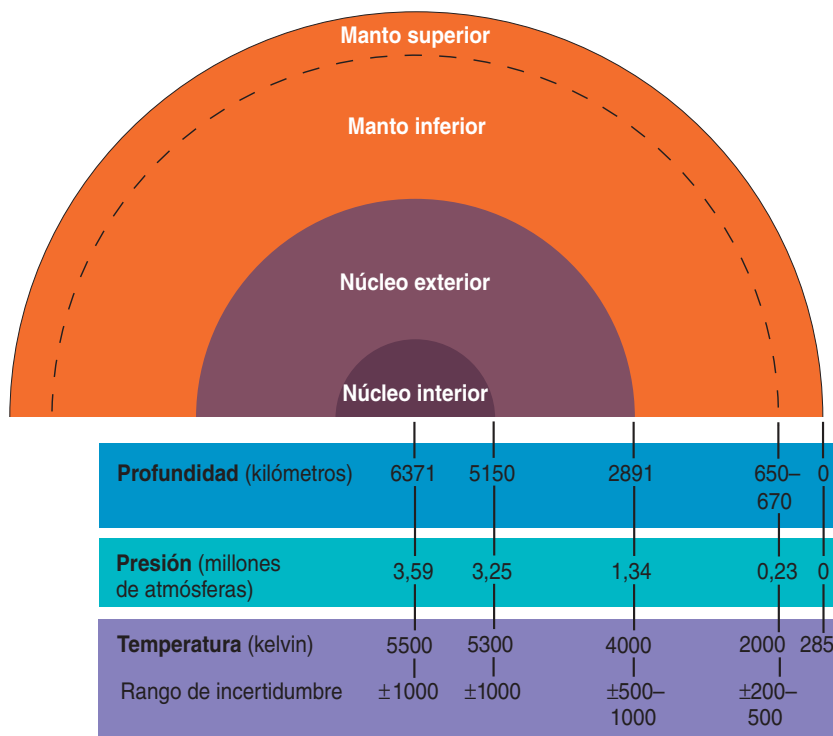
No era nada sencillo medir la temperatura en los experimentos de choque de Los Alamos. A pesar de ello, el descubrimiento de la transición de fusión a altas presiones fue un avance muy importante que estimuló a otros investigadores. Felizmente, a diferencia del hidrógeno, es posible calentar el hierro en una celda de yunque de diamante con un haz de luz láser. A los pocos años, Quentin William y Jeanloz medían en la Universidad de California en Berkeley la temperatura del hierro a alta presión. Lo calentaron primero con láser; a partir del espectro luminoso emitido por la muestra medimos la temperatura con los mismos métodos que utilizan los astrónomos para determinar la temperatura de la superficie de las estrellas. Los resultados fueron sorprendentes: en vez de fundirse a unos 3000 kelvin, como era de esperar, parece que el hierro necesita temperaturas más cercanas a los 4000 kelvin para fundirse a la presión de un millón de atmósferas.

Al mismo tiempo, Thomas Ahrens, Jay Bass y sus colaboradores del Caltech consiguieron medir con el mismo método que el grupo de Berkeley la temperatura del hierro cuando ondas de choque lo comprimían hasta 3 millones de atmósferas. También encontraron que la temperatura de fusión del hierro a 2,5 millones de atmósferas era sorprendentemente alta, alrededor de 6500 kelvin; concordaba con los experimentos de celda de diamante con calentamiento por láser.

Pero todavía quedaban problemas sin resolver. En primer lugar, un láser no puede calentar uniformemente una muestra dentro de una celda de diamante. Sólo el centro del punto caliente en el foco del láser alcanza la temperatura máxima, que va disminuyendo hasta la temperatura ambiente a menos de 0,1 mm del centro. La muestra está al “blanco vivo” en el centro; y en una corta distancia, al “rojo vivo” y apagada. Quien diseñe un experimento para medir el espectro de una pequeña muestra comprimida entre diamantes de cierto grosor se enfrenta a un problema técnico difícil. La parte más interesante de la muestra está a alta temperatura. Brilla tanto, que resulta difícil saber si se ha fundido o no.

De forma similar, también había problemas técnicos en la interpretación de los resultados de las ondas de choque, ya que la muestra de hierro caliente ha de mantenerse confinada a altas presiones el tiempo suficiente para que se mida la temperatura de forma fiable. Es necesario abrir una ventana en la parte posterior de la muestra; altera la presión y la temperatura conseguidas durante el choque. Más aún, el experimento finaliza tan pronto, que incluso una muestra a la temperatura de fusión quizá no tenga tiempo de fundirse. Para conseguir la fusión, la temperatura podría incluso pasar de largo de la de fusión; así, se obtendrán medidas reproducibles que serán, sistemáticamente, demasiado altas.

El acuerdo entre los experimentos estáticos y dinámicos indicaba que se habían superado estas dificultades. Sin embargo, las temperaturas de fusión encontradas, mucho más altas de lo esperado, motivaron que otros intentaran reproducir los resultados. Enseguida surgieron problemas. Durante los años noventa varios grupos de Alemania, Suecia y los EE.UU. dieron temperaturas de fusión diferentes según fueron variando los parámetros experimentales. Las publicaciones científicas expusieron la controversia: se contaba con razones tanto a favor como en contra de que se hubiese descubierto una nueva forma cristalina del hierro a alta presión. Con el fin de entender y poner orden en esta



9. SIGUE EL DEBATE SOBRE cuál es exactamente la temperatura en la frontera entre el núcleo exterior líquido y el núcleo interior sólido de la Tierra. Las presiones en las fronteras entre las capas interiores de la Tierra se conocen a partir de pruebas sismológicas y de otra índole; sin embargo, los intentos de simular la temperatura en el núcleo han dado resultados variopintos. Se va admitiendo que el centro de la Tierra está tan caliente como la superficie del Sol: a una temperatura entre 5000 y 6000 kelvin. Se presentan en esta figura temperaturas estimadas a partir de experimentos recientes de alta presión. Para una estimación más precisa de la temperatura de la frontera entre el núcleo interno y el externo, seguramente habrá que disponer de un modelo mejor del origen y evolución del interior profundo, que deberá establecer el papel de los componentes de aleación que alteran el punto de fusión del hierro.

enorme y confusa colección de nuevos datos, los grupos implicados han venido refinando sus métodos y aplicando herramientas aún más depuradas.

Nuestro conocimiento de la frontera entre el núcleo interno y el externo sin duda evolucionará a medida que se apliquen nuevos métodos para comprobar estos hallazgos y se perfeccionen las técnicas de laboratorio para disminuir la incertidumbre experimental. Aún tienen que desarrollarse patrones de calibrado que midan temperaturas entre los 3000 y los 5000 kelvin (no digamos ya la temperatura de fusión).

Puede que nos falte poco para llegar a lo que buscamos. El núcleo de la Tierra no es de hierro puro, sino que contiene aproximadamente un 10% (en peso) de otros com-

ponentes. Si se compara la densidad del núcleo exterior, que se deduce de los datos sismológicos, con los del hierro puro comprimido por choque a presiones y temperaturas análogas, la densidad del núcleo resulta alrededor de un 10% menor. Aun cuando se conociera con precisión la temperatura de fusión del hierro puro entre 2 y 4 millones de atmósferas, tendríamos todavía que corregir el efecto de los contaminantes en la temperatura de fusión. En las aleaciones, con frecuencia disminuye la temperatura de congelación; por eso se le echa sal al hierro para que se funda. La verdadera temperatura de congelación en la frontera entre los núcleos interno y externo puede ser inferior en 1000 kelvin, o más, a la del hierro puro.

COSMOLOGIA

INVESTIGACION CIENCIA

ha publicado sobre el tema, entre otros, los siguientes artículos:

El remolcador de asteroides,
de R. L. Schweickart, E. T. Lu,
P. Hut y C. R. Chapman
Enero 2004

La nueva Luna,
de Paul D. Spudis
Febrero 2004

Galaxias en colisión,
de Lourdes Verdes-Montenegro
Marzo 2004

La sinfonía cósmica,
de Wayne Hu y Martin White
Abril 2004

Los planos de la creación,
de Michael A. Strauss
Abril 2004

**Cuando la aceleración
cambió de signo,**
de Adam G. Riess
y Michael S. Turner
Abril 2004

Salir de la oscuridad,
de Georgi Dvali
Abril 2004

Vientos en los planetas gigantes,
de Agustín Sánchez Lavega
Mayo 2004

Spirit, el robot explorador,
de George Musser
Mayo 2004



Prensa Científica, S.A.

Pero es imposible conocer la composición exacta de la aleación del núcleo. Su estado presente es el resultado del proceso de formación y de la evolución posterior a lo largo del tiempo geológico. Hay muchas ideas en pugna: se han propuesto como posibles elementos de la aleación del núcleo el carbono y el azufre, el oxígeno e incluso el hidrógeno. En la actualidad se están llevando a cabo estudios de alta presión sobre estas aleaciones. Ya está claro que la adición de hidrógeno o azufre puede reducir bastante la temperatura de fusión del hierro, pero no sucede lo mismo con otros componentes. Se necesitará un buen modelo del origen y evolución del interior profundo de la Tierra antes de que podamos determinar las composiciones relevantes, estudiarlas en el laboratorio y contar con una buena estimación de la temperatura en las profundidades de los planetas.

Por lo tanto, la incertidumbre actual sobre la composición del núcleo va en paralelo a la incertidumbre que proviene de los resultados experimentales. Aunque un tanto dispersos, por lo general concuerdan. Parece muy probable que para contestar las grandes preguntas sobre el centro de la Tierra haya que entretener la investigación del núcleo y de las aleaciones, de manera que un conocimiento mejor de la evolución y composición del núcleo impulse la realización de nuevos experimentos que determinen el comportamiento de las aleaciones a altas presiones

Un calor que no cesa

Pero todos estos experimentos ya han cambiado radicalmente nuestro conocimiento del interior de la Tierra. Antes de los experimentos de ondas de choque y de celda de yunque de diamante, la estimación de las temperaturas del núcleo no pasaba de conjetura. Se creía que caían entre los 500 y los 4300 kelvin; hoy casi se ha doblado el valor estimado, y lo situamos entre los 5500 y 6000 kelvin. La incertidumbre es tan grande como siempre —alrededor de 1000 kelvin en ambas direcciones—, pero los efectos de la composición de la aleación y de las incertidumbres experimentales se han desglosado en estima-

ciones que ahora se basan en mediciones.

Parece que la temperatura en el centro de nuestro planeta es similar a la de la superficie del Sol, tan caliente que resplandece. En primer lugar: ¿cómo se calentó hasta tal punto nuestro planeta? ¿Cómo ha sido capaz de retener tanto calor? El rocoso manto de la Tierra se revuelve, en tiempos geológicos, como una salsa espesa. Pero la llama es muy floja: se piensa que sólo hay un calentamiento por radiactividad natural, más bien modesto, a gran profundidad. Entonces, ¿por qué no se ha enfriado aún la Tierra? ¿Por qué siguen siendo tan vigorosos los procesos geológicos? Quizá no nos esperen las mayores sorpresas en los misteriosos planetas del firmamento, sino en el que tenemos hirviendo y burbujeando bajo nuestros pies.

Los autores

Sandro Scandolo pertenece al Centro Internacional de Física Teórica Abdus Salam (ICTP) de Trieste. Allí ejecuta simulaciones de transiciones de fase a alta presión en sistemas covalentes, moleculares y metálicos, e investiga la ciencia de superficies, los polímeros y la óptica no lineal. **Raymond Jeanloz** es profesor de ciencias terrestres y planetarias y de astronomía de la Universidad de California en Berkeley, donde su grupo estudia la naturaleza y evolución del interior de los planetas, así como de las propiedades de los materiales a alta presión.
© *American Scientist Magazine*.

Bibliografía complementaria

MELTING AND CRYSTAL STRUCTURE OF IRON AT HIGH PRESSURE. G. Shen, H. K. Mao, R. J. Henley y M. L. Rivers en *Geophysical Research Letters*, volumen 25, págs. 373-376; 1998.

DISSOCIATION OF CH₄ AT HIGH PRESSURE AND TEMPERATURE: DIAMOND FORMATION IN GIANT PLANET INTERIORS? L. R. Benedetti, J. H. Nguyen, W. A. Caldwell, H. Liu, M. Kruger y R. Jeanloz en *Science*, vol. 286, págs. 100-102; 1999.

METALIZAR EL HIDRÓGENO. W. J. Nellis, en *Investigación y Ciencia*, págs. 48-55; julio 2000.