

EL INTERIOR DE LOS PLANETAS • LIPOTOXICIDAD Y DIABETES

# INVESTIGACION *y* CIENCIA

SEPTIEMBRE 2004  
5,50 EURO

Edición española de  
**SCIENTIFIC  
AMERICAN**

## DOPAJE GENICO

**CASSINI-HUYGENS  
EN SATURNO**

**DETECCION  
DE LA ENFERMEDAD  
DE LAS VACAS LOCAS**

**CONTAMINACION  
DE LOS RIOS  
POR METALES PESADOS**

**EL MISTERIO  
DEL MANUSCRITO VOYNICH**



3

HACE...

50, 100 y 150 años.

4

APUNTES

Astronomía...

Ecología...

Sida...

Medicina...

Política científica.

32

CIENCIA Y SOCIEDAD

Neurociencias,

fármacos para la memoria...

Resistencia a los antibióticos...

Narices electrónicas...

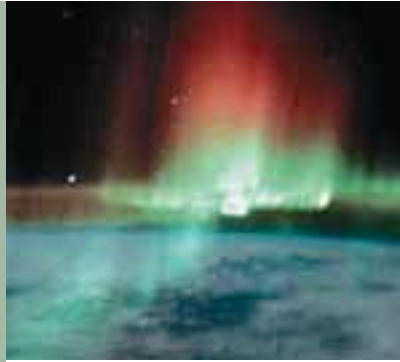
Paleoamericanos y amerindios.



40

DE CERCA

Diversidad bacteriana en el hielo  
antártico y alpino.



6

## El interior de los planetas

*Sandro Scandolo y Raymond Jeanloz*

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.

18

## Dopaje génico

*H. Lee Sweeney*

La terapia génica quizá llegue a reparar la fuerza muscular perdida por la edad o la enfermedad. Los atletas de elite verían entonces en ella un medio para mejorar su rendimiento. Pero, ¿podrá el dopaje génico cambiar la naturaleza del deportista?

26



## Contaminación de los ríos por metales pesados

*Enrique Navarro Rodríguez y Sergi Sabater*

Los biofilms algales constituyen unos valiosos indicadores del estado ecológico del sistema fluvial y de los efectos ejercidos por metales pesados. La acción de estos tóxicos puede ser modulada por factores físicos, químicos y biológicos.

50

## Cuando el metano regulaba el clima

*James F. Kasting*

Hoy los metanógenos medran sólo en los intestinos de los rumiantes y otros ambientes anóxicos. En el pasado remoto, sin embargo, gobernaron el clima de nuestro planeta.

58

## Lipotoxicidad y diabetes

*Gema Medina-Gómez, Chris Lelliott  
y Antonio Vidal Puig*

La diabetes mellitus, una alteración del metabolismo de la glucosa, podría venir desencadenada por lípidos. Al actuar como factores tóxicos, los ácidos grasos intervienen en la progresión de la enfermedad.



42

## Cassini-Huygens en Saturno

*Jonathan I. Lunine*

Tras un viaje de siete años, la nave espacial Cassini-Huygens empieza a desvelar los misterios de Saturno, de sus anillos y de su luna gigante, Titán.



66

## Detección de la enfermedad de las vacas locas

*Stanley B. Prusiner*

Nuevas pruebas permiten una pronta identificación de la presencia de priones patógenos, los agentes responsables de la enfermedad. Varios compuestos ofrecen la esperanza de un tratamiento.



74



## El misterio del manuscrito Voynich

*Gordon Rugg*

Un nuevo análisis de un críptico documento pergeñado hace más de cuatro siglos induce a pensar que no se trata sino de un galimatías.

80

## Pantallas de película orgánica

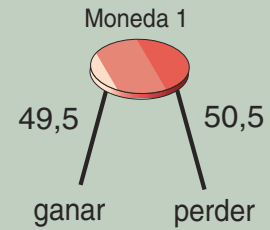
*Webster E. Howard*

Con materiales orgánicos fotoemisores se fabrican pantallas electrónicas de mayor luminosidad y rendimiento, que pronto alcanzarán la ligereza y flexibilidad del plástico.

86

## JUEGOS MATEMÁTICOS

Democracia ineficiente, por Juan M.R. Parrondo



88

## IDEAS APLICADAS

Submarinos furtivos, por Mark Fischetti



90

## TALLER Y LABORATORIO

Digitaciones viscosas: generación de fractales en un fluido, por Marc Boada



93

## LIBROS

Electricidad, del torpedo al contador doméstico.



# INVESTIGACION CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.<sup>a</sup> Valderas Gallardo  
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella  
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez  
Laia Torres Casas

PRODUCCIÓN M.<sup>a</sup> Cruz Iglesias Capón  
Albert Marín Garau

SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez  
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia  
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado  
Olga Blanco Romero

EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup>  
08021 Barcelona (España)  
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413  
www.investigacionyciencia.es

## SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie  
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina  
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting  
NEWS EDITOR Philip M. Yam  
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix  
SENIOR EDITOR Michelle Press  
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs  
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley,  
Graham P. Collins, Steve Mirsky,  
George Musser y Christine Soares  
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt  
GENERAL MANAGER Michael Florek  
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL  
Dean Sanderson  
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER  
Gretchen G. Teichgraber  
CHAIRMAN John Sargent

## DISTRIBUCION

### para España:

#### LOGISTA, S. A.

Aragoneses, 18  
(Pol. Ind. Alcobendas)  
28108 Alcobendas (Madrid)  
Tel. 914 843 900

### para los restantes países:

#### Prensa Científica, S. A.

Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup>  
08021 Barcelona  
Teléfono 934 143 344

## PUBLICIDAD

GM Publicidad  
Edificio Eurobuilding  
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.<sup>a</sup> planta  
28036 Madrid  
Tel. 912 776 400  
Fax 914 097 046

Cataluña:  
QUERALTO COMUNICACION  
Julián Queraltó  
Sant Antoni M.<sup>a</sup> Claret, 281 4.<sup>o</sup> 3.<sup>a</sup>  
08041 Barcelona  
Tel. y fax 933 524 532  
Móvil 629 555 703

## COLABORADORES DE ESTE NUMERO

### Asesoramiento y traducción:

Juan Bartolomé: *El interior de los planetas*; Esteban Santiago: *Dopaje génico*; M.<sup>a</sup> Rosa Zapatero: *Cassini-Huygens en Saturno*; Manuel Puigcerver: *Cuando el metano regulaba el clima*; José A. García de Jalón y Mercedes Jaime Sisó: *Detección de la enfermedad de las vacas locas*; Luis Bou: *El misterio del manuscrito Voynich*; J. Vilardell: *Hace..., Apuntes e Ideas aplicadas*



Portada: Pete Saloutos, *Corbis*

## SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.  
Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup>  
08021 Barcelona (España)  
Teléfono 934 143 344  
Fax 934 145 413

### Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

### Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro  
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

Copyright © 2004 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2004 Prensa Científica S. A. Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup> 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X

Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

## ...cincuenta años

**¿QUÉ ES EL CALOR?** «El calor es energía desordenada. Así, en dos palabras, se explica la naturaleza del calor. En el resto de este artículo se intenta explicar la explicación. —Freeman J. Dyson»

**ELEMENTOS CÓSMICOS.** «Tienta suponer que todos los elementos químicos conocidos son el resultado de síntesis a partir del hidrógeno producidas, mediante procesos termonucleares, en el interior de las estrellas. ¿Por qué el hidrógeno debería ser el elemento primigenio a partir del que se forman los demás? Si este enigma no es lo bastante difícil, he aquí otro aún más arduo: ¿Cómo cobró existencia el mismo hidrógeno? No podemos eludir la cuestión dando por sentado que el hidrógeno siempre existió. A través de procesos al parecer irreversibles, el hidrógeno se convierte incesantemente en otros elementos. Pese a ello, es el elemento que más abunda en el universo. Debemos, pues, suponer que su antigüedad es finita, ya que de haber existido desde siempre, hoy ya se habría consumido por completo. —Fred Hoyle»

## ...cien años

**UN CABALLO QUE PIENSA.** «Apenas pasa un día sin que en la prensa no se lea algo acerca de la maravillosa capacidad mental de 'Hans, el listo', 'der Kluge Hans', como se conoce al semental de Herr Von Osten. Pero una investigación llevada a cabo por científicos parece indicar que el animal es realmente lo que su propietario pretende, un cuadrúpedo inteligente capaz de efectuar cálculos aritméticos sencillos. El doctor Heinroth, del Jardín Zoológico de Berlín, lo ha interrogado en su establo, y ha recibido unas respuestas tan claras y precisas como las que dio en presencia de Von Osten.» [Nota de la redacción: Hans debía de limitarse a reaccionar a las sutiles señales inconscientemente emitidas por los presentes en la prueba.]

**LA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO.** «La producción mundial de petróleo de 1903 se sitúa en 20 millones de toneladas, de los que más de la mitad proceden de Rusia y el resto de Estados

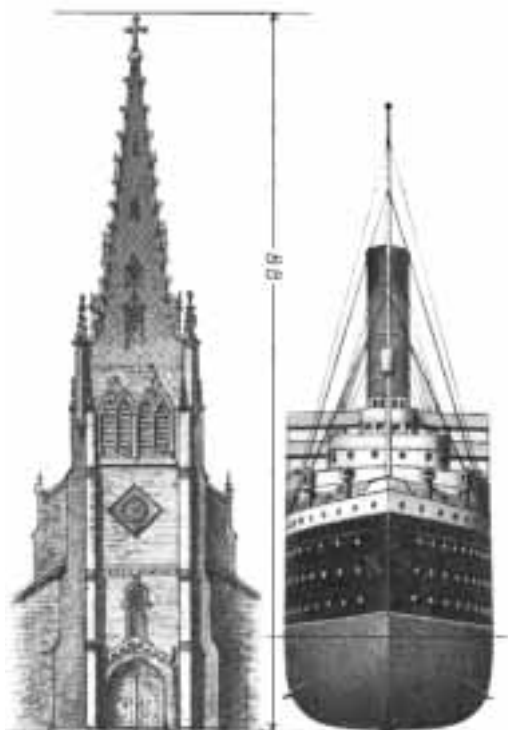
Unidos, Canadá y Borneo. La demanda excede largamente de la producción actual.»

**LOS NUEVOS BARCOS DE CUNARD.** «De los objetos relativos a la navegación que se muestran en la exposición de St. Louis, el que más atención atrae es la maqueta de los nuevos vapores con turbinas de 40.000 toneladas, capaces de navegar a 25 nudos, de la Compañía de Vapores Cunard. Si el nuevo barco de línea se colocase junto a la Iglesia de la Trinidad de Nueva York, su chimenea llegaría hasta la mitad de la aguja —ese antiguo patrón para medir grandes alturas—, que se levanta hasta los 88 metros (véase ilustración).»

**DIABLOS VELOCES.** «La marca de velocidad para un automóvil con tracción propia ha sido batida por los señores L. L. Whitman y C. S. Carris, que han viajado por tierra firme desde San Francisco hasta Nueva York en un biplaza Franklin con motor de cuatro cilindros y 10 caballos de potencia refrigerado por aire. Cubrieron los 7200 kilómetros en 33 días sin percances graves. Que un vehículo de este tipo, con un motor refrigerado por aire, haya podido romper todas las marcas de los viajes transcontinentales, por carreteras, pistas y montañas, cruzando entre arbustos eriales sin caminos, ha sorprendido a los automovilistas.»

## ...ciento cincuenta años

**Acción de gusanos.** «Bajo la ciudad de Berlín, en Prusia, hay una turbera muy profunda. El profesor Ehrenberg, caballero cuyas exploraciones de los misterios de la vida microscópica lo han situado en una elevada posición entre los científicos de la época, afirma que esa turba, a la profundidad de cinco metros, hierve de vida infusoria; miríadas de incontables animales microscópicos allí viven, pululan y mueren. El incesante movimiento de esos pequeños seres hace que toda la masa de la turba se halle en un movimiento constante, aunque imperceptible. En Berlín, las casas son a veces propensas a agrietarse y resquebrajarse de modo sobremanera curioso, pese a estar construidas sobre cimientos que parecen estables. El profesor Ehrenberg cree que ello se debe al esfuerzo conjunto de infinitos millones de minúsculas formas de vida.»

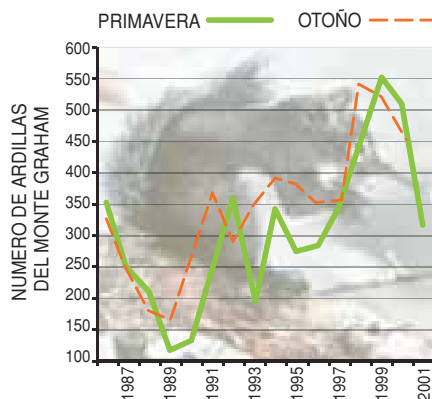


El nuevo transatlántico junto a la Iglesia de la Trinidad.

## ASTRONOMIA

### Mount Graham

El monte Graham, en el sudeste de Arizona, forma parte de los montes Pinalenos, pertenecientes al Bosque Nacional de Coronado. Alberga un observatorio astronómico. En 1993 se inauguraban allí el radiotelescopio Heinrich Hertz y el Telescopio Vaticano de Tecnología Avanzada, y ahora está a punto de entrar en funcionamiento el Gran Telescopio Binocular, con dos espejos de 8,4 metros. Pero el monte Graham es singular de por sí, lo que ha constituido una fuente permanente de problemas para el observatorio. Los bosques de sus cimas son antiquísimos: los apaches de San Carlos lo consideran sagrado. A los conservacionistas les preocupa la posible extinción de una subespecie de ardilla roja endémica y exclusiva del lugar. No debe extrañarnos, pues, que menudearan los litigios. Ahora todos se han encontrado ante un enemigo común, mu-



La población de las ardillas del monte Graham oscila cerca de la extinción.

cho más poderoso. A finales de junio sendos rayos prendieron dos incendios en el monte, que en los días siguientes se acercarían mucho a los telescopios. Han ardido unas 12.000 hectáreas. El incendio parece que ha afectado sólo a una parte pequeña del hábitat —unas 4000 hectáreas— de las apenas 300 ardillas del monte Graham que subsisten. El observatorio ha tenido más suerte que el del monte Stromlo australiano, cuya destrucción se contaba en un apunte de marzo de 2003. Ha sobrevivido intacto. El supervisor del condado

de Graham pretende desde hace tiempo abrir al público el refugio de las ardillas, 700 hectáreas en torno al observatorio donde está vedada toda actividad. El fuego, declaraba, ha debido de perjudicar a las ardillas; cabe esperar pues “que ahora sea más factible levantar la prohibición”.

## ECOLOGIA

### Salmones contra salmones

El tamaño de los salmones creados por ingeniería genética puede llegar a septuplicar el de los salmones naturales. Inquieta que aquéllos pudieran convertirse en una competencia mortal para éstos, si se escapan de las piscifactorías. En experimentos de laboratorio realizados en Canadá se ha descubierto que la amenaza se materializa cuando escasean los alimentos. Los peces transgénicos se volvieron agresivos por la comida y crecieron más que otros congéneres, transgénicos también, que recibían una dieta suficiente. A la vez, los salmones naturales criados en piscinas que convivían con ejemplares transgénicos perdieron tamaño respecto a sus iguales criados en piscifac-



torias donde no sufrían la competencia de los supersalmones. Cuando se administraban raciones cortas, los salmones naturales criados en piscinas que convivían sólo con otros salmones naturales sobrevivían e incluso ganaban peso. Pero en las piscifactorías que contenían animales de ambos tipos o sólo transgénicos, la población mermaba o incluso se extinguía, por desnutrición o canibalismo. Los científicos advierten de que su estudio experimental podría no reflejar lo que ocurriría en ecosistemas naturales más complejos.

—Charles Choi

Así de grande: el tamaño importa mucho entre los salmones.

## SIDA

### Lo bueno y lo mejor, enemigos de lo necesario

El gobierno de Sudáfrica ha rechazado que, para disminuir la probabilidad de que se infecte el hijo, se medique a las embarazadas contagiadas de HIV con una sola dosis del antirretroviral nevirapina. Propone a cambio un tratamiento de 28 semanas que administra ese producto junto con el antirretroviral AZT. Usar sólo nevirapina, recuerda, puede aumentar la resistencia del

virus a los medicamentos que necesitará la madre cuando desarrolle el sida. La OMS, no obstante, defiende la primera opción mientras no sea viable la segunda, más perfecta sin duda. Al igual que el presidente de la Sociedad Internacional del Sida, parece no tener dudas de que es mejor salvar de la infección, por ahora, a los niños que mantener intactas las posi-

bilidades de que sus madres sigan vivas más adelante. El gobierno sudafricano tiene en su deber el turbio antecedente de la simpatía del presidente Mbeki por las teorías de Duesberg, que desvinculan el sida del HIV. ¿Abdica de su responsabilidad de proporcionar lo que

tendría a su alcance con la excusa de que prefiere algo que sabe que no va a poder ofrecer? ¿Adoptan las organizaciones internacionales una solución mediocre para eludir el deber de curar sin acepción de personas y enfrentarse a quienes lo impiden?

## MEDICINA

### El origen de los grupos sanguíneos

La sangre del grupo A presenta anticuerpos contra el grupo B, la del grupo B contra el A, el grupo O, que carece de los antígenos A y B, posee anticuerpos contra ambos grupos, y el AB, que tiene los antígenos de A y de B, carece de anticuerpos contra A y B. Oscura es, sin embargo, la razón de que tales grupos existan sin cambios desde hace más de 13 millones de años. Se sabe que la prevalencia de los grupos varía con la geografía. El matemático Robert Seymour ha avanzado una interesante hipótesis. La prevalencia de los diversos tipos, propone, refleja la prevalencia local de las infecciones víricas o bacterianas. Hace poco, se ha descubierto que el virus del sarampión recibe de los hematíes una especie de "impronta". Si la recibe de los glóbulos rojos del tipo A, los anticuerpos anti-A, presentes en la sangre de tipo B, podrán identificarlo y destruirlo más fácilmente. Lo



mismo ocurre, podría pensarse, con muchos otros tipos de virus. Entonces, quien tuviera sangre del grupo O, con anticuerpos anti-A y anti-B, se hallaría más protegido que el resto de la población contra las infecciones víricas. Pero si así fuese, la humanidad entera contaría con sangre de tipo O. Se cree que las bacterias reequilibran la situación. Como se adhieren a glúcidos de las células epiteliales específicos de cada grupo sanguíneo, evolucionan de manera que infecten preferentemente a quienes porten el grupo sanguíneo más común. Por lo tanto, mientras las infecciones víricas fomentan el predominio del tipo O, las bacterias lo limitan. De ahí que el grupo O sea el más común allá donde ha habido en el pasado una elevada mortandad por virus patógenos; en cambio, donde escasea, fueron las enfermedades bacterianas las más acerbadas.

## POLITICA CIENTIFICA

### Catástrofes administrativas

En mayo de 2003, el ministro de ciencia del Reino Unido hablaba ante la Regia Sociedad de Londres acerca de Beagle 2, el módulo de aterrizaje británico que enseguida saldría hacia Marte a bordo de la sonda Mars Express de la ESA, la Agencia Europea del Espacio. Se felicitaba de que se hubiese construido en un "tiempo brevísimo". Es, decía, "una prueba de la capacidad de la ingeniería del Reino Unido y de la categoría mundial de su ciencia". El Reino Unido "reforzaba su reputación de socio preferido por los proyectos internacionales." En la Navidad de ese mismo año, Beagle 2 desaparecía en Marte sin dejar rastro. En julio de 2004, Colin Pillinger, alma y ejecutor de la misión, tenía que defenderse ante una comisión de la Cámara de los Comunes de quienes mantenían que la gestión había sido propia "de aficionados". David Southwood, director de programas científicos de la ESA, hacía una extraña comparación: "Pillinger es un Beckham". Tiene imaginación a raudales y atrae al público, pero "no por eso se es un buen gestor". "No sé", decía, "si Beckham valdría para gestor." El



El Beagle 2, desprendido ya de la Mars Express, muy cerca de su fin.

"tiempo brevísimo" (y el presupuesto escaso) con que se contó para preparar la misión parece que llevó a descuidar aspectos cruciales de la seguridad, en especial los paracaídas de descenso. La atmósfera de Marte resultó más tenue en el momento del aterrizaje de lo que se pensaba, pero el robot Spirit de la NASA, con un presupuesto mucho más generoso, aterrizó sano y salvo unos días después, pese a que detectó también ese enrarecimiento. En otras partes del mundo, los problemas administrativos ofrecen un cariz un tanto distinto. Un piquete de miembros del Instituto de Cibernética de Batumi, ciudad del estado ex-soviético de Georgia, ha impedido a unos funcionarios el acceso al edificio que había sido sede del Instituto. El año pasado, el teniente de alcalde había desalojado de allí "sin fundamento legal alguno", según la agencia Batuminews, a esos científicos que ahora protestan. El teniente de alcalde fue detenido una semana antes de la intervención del piquete; se le acusa de una apropiación indebida de fondos "descomunal".

# 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



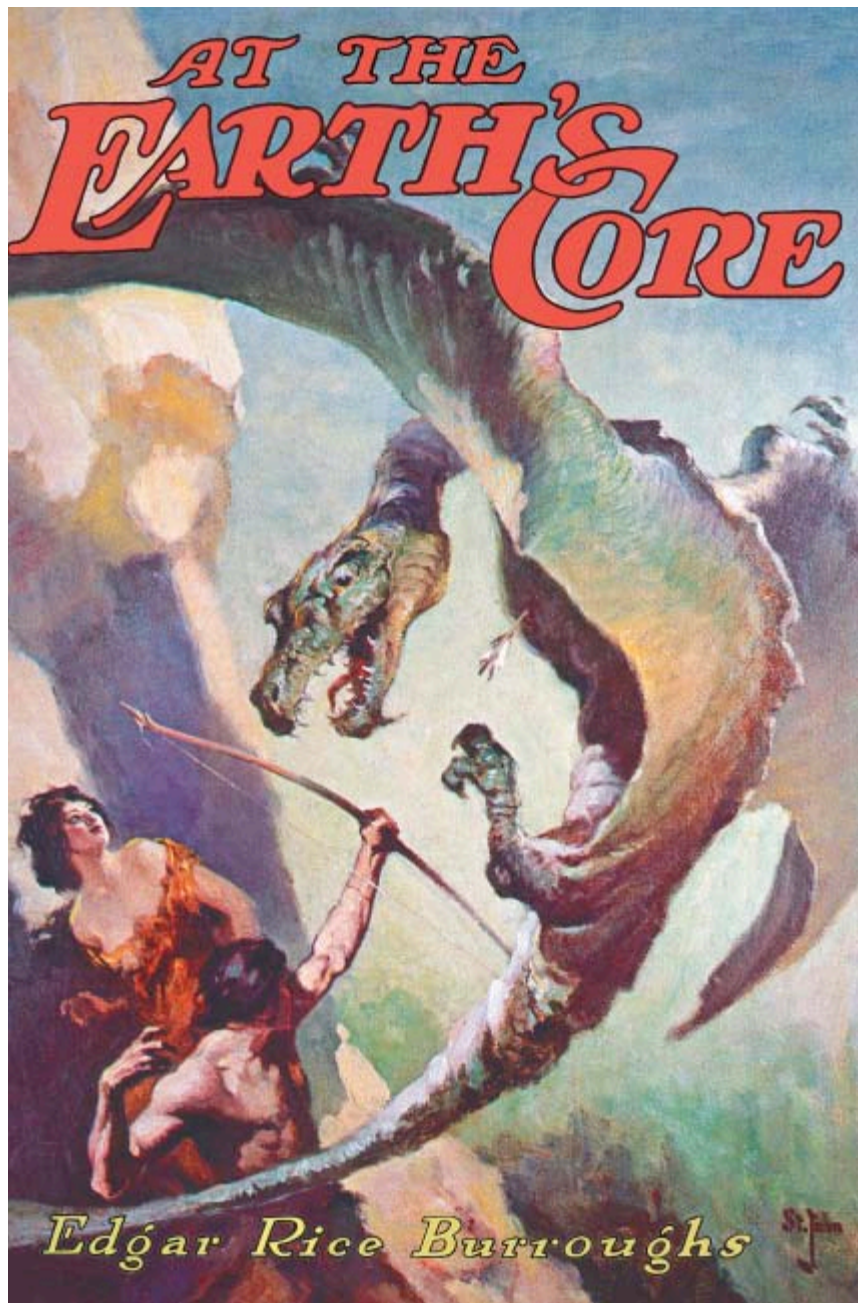
1. ¿QUE HAY EN EL CENTRO DE LA TIERRA? Edgar Rice Burroughs, más conocido como el creador de Tarzán, fue uno de los muchos autores que han imaginado mundos bajo nuestros pies. Esta portada imagina la vida en Pellucidar, el “mundo en el núcleo de la Tierra” de varias novelas que escribió entre 1913 y 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 exiliar” 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 jocosas, 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

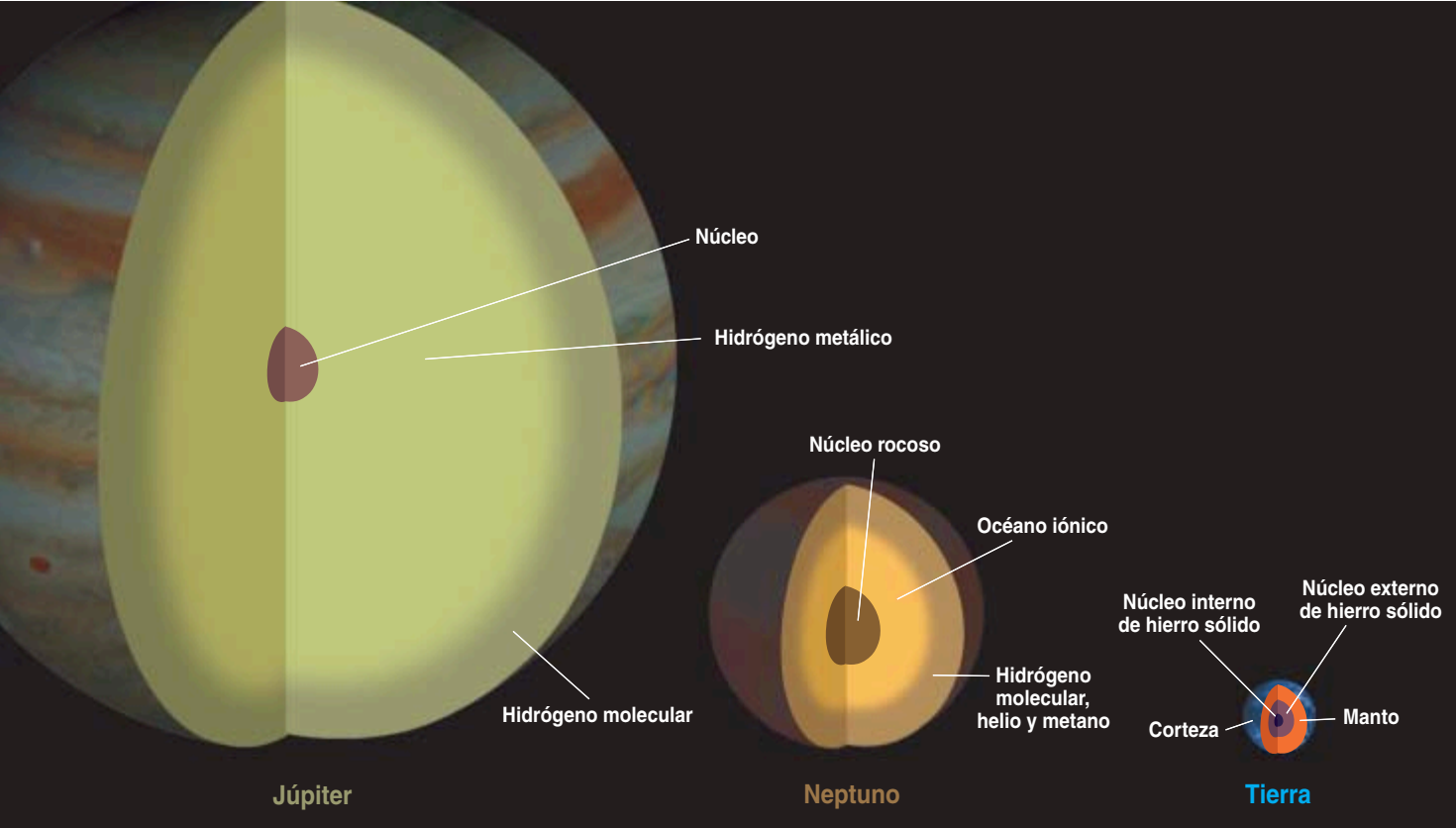


Tierra, desde comienzos del siglo XX se viene intentado simular las condiciones de presión y temperatura que moldean el interior de los planetas. Los micromundos creados en el laboratorio abren una ventana para la observación de la composición, dinámica y evolución de los planetas, e incluso permiten 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

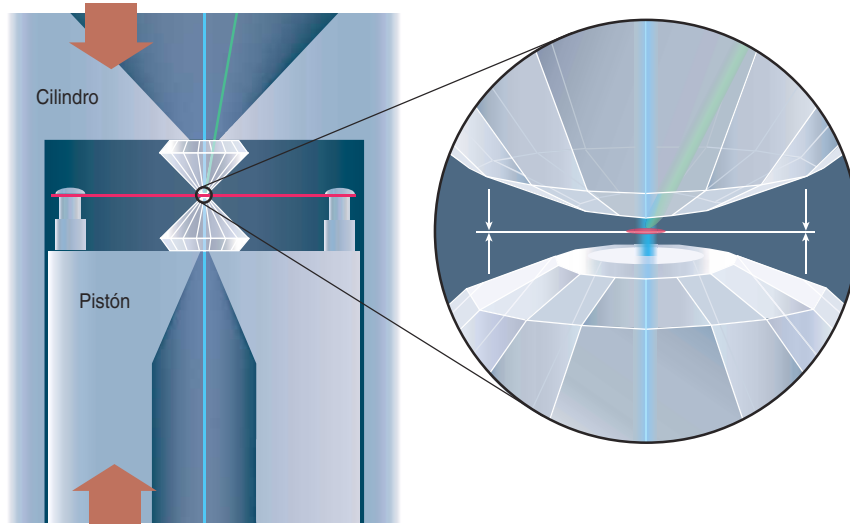
que un veinteavo del radio planetario de Júpiter. En otras palabras, la mayor parte del gran gigante gaseoso del sistema solar tenía que hallarse en estado metálico. Pero ese hidrógeno metálico se tenía que encontrar en estado líquido, no sólido, para que pudiera comportarse como una dinamo.

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.

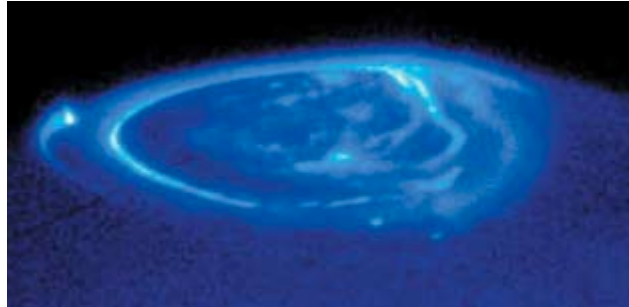
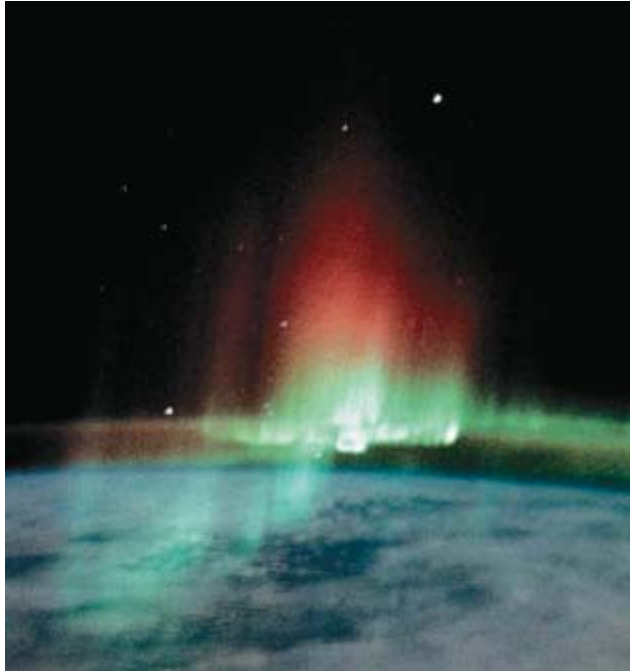
La propuesta de Wigner, probablemente cierta a presiones más altas, resultaba deficiente en lo que se refería a cuándo y cómo se produce la metalización. La explicación que va configurándose se basa en una sutil interacción entre la química y la física.

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.

## Chokes

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-

LANZADERA ESPACIAL. CORTESÍA DE LA NASA (izquierda); TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE. CORTESÍA DE LA NASA/ESA Y JOHN CLARKE (derecha)