

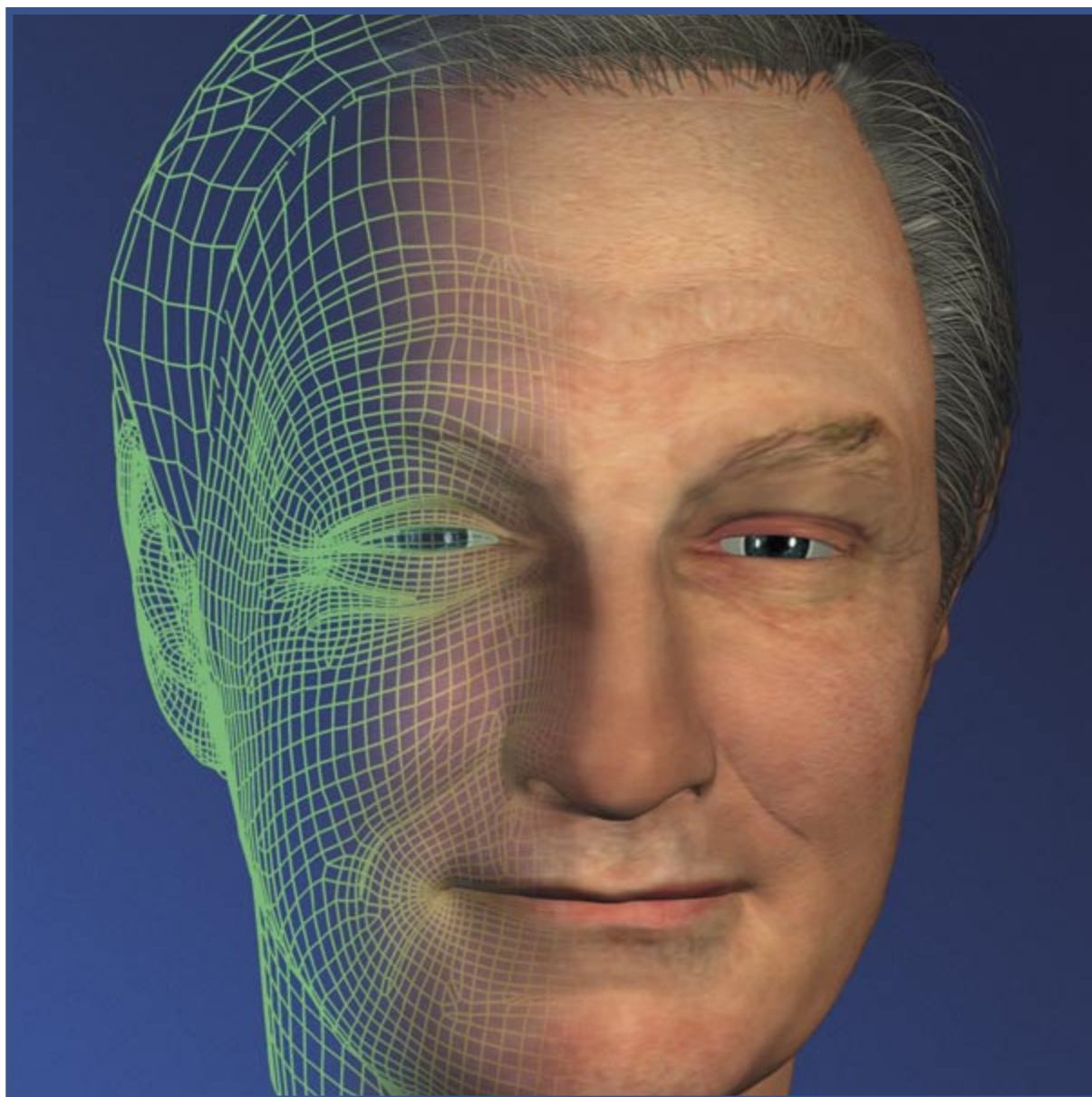
INVESTIGACION *y* CIENCIA

RESISTENCIA CONTRA LOS ANTIBIOTICOS

LASERES DE SEMICONDUCTORES

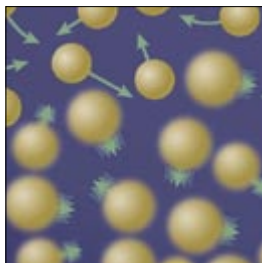
INFORME ESPECIAL: EL FUTURO INCIERTO DEL PETROLEO

Edición española de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**



EL HOMBRE VIRTUAL
MAYO 1998
800 PTAS.

6



El condensado de Bose-Einstein

Eric A. Cornell y Carl E. Wieman

Albert Einstein y Satyendra Nath Bose predijeron hace más de 70 años que justo por encima del cero absoluto la mecánica cuántica haría que los átomos de un grupo resultasen indistinguibles, que se fundieran en un solo átomo gigante. En 1995 los autores crearon por fin esta nueva forma de la materia, que permite la aproximación de lo cuántico a lo cotidiano.

14

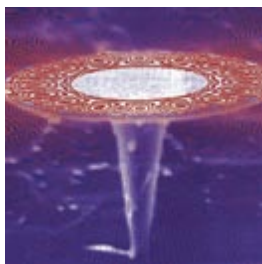


La resistencia contra los antibióticos

Stuart B. Levy

Las bacterias han desarrollado invulnerabilidad frente a estas drogas milagrosas que un día las domaron. Resurge la posibilidad de plagas para las que no exista tratamiento, cuando aún no se atisban los fármacos que podrían suceder a los actuales antibióticos. Si queremos preservar su efectividad, debemos poner coto a su mala utilización y frívolo abuso.

22



Nanoláseres

Paul L. Gourley

Moviéndose en la frontera entre la física y la ingeniería, los investigadores en semiconductores han construido recientemente láseres con dimensiones más pequeñas que las longitudes de onda de la luz que ellos mismos emiten. Estos dispositivos podrían revolucionar las comunicaciones por fibra óptica, la computación y la detección precoz de enfermedades.

40

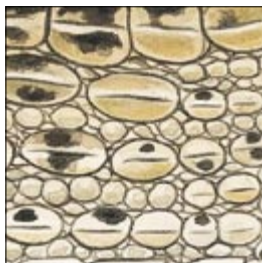


La animación del movimiento humano

Jessica K. Hodgins

En reposo, los personajes de animación informática de las películas y los videojuegos dan la impresión de ser reales; sus movimientos, en cambio, no suelen parecer naturales. La simulación, una técnica que incorpora las leyes de la física, está resolviendo ese problema: se han creado humanos virtuales que corren, montan en bicicleta o saltan desde un trampolín.

48

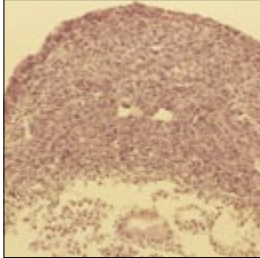


El comercio del caimán

Peter Brazaitis, Myrna E. Watanabe y George Amato

¿Puede el lector distinguir un bolso de “cocodrilo genuino” de otro fabricado con piel de caimán de contrabando? Pocos pueden. Semejante confusión está colocando en peligro de extinción a estos reptiles de un notabilísimo interés ecológico. Los esfuerzos empeñados en lograr una gestión racional de los caimanes quizá sólo sirvan para empeorar las cosas.

56



Antígenos específicos del sexo

Antonio Sánchez, Rafael Jiménez, Miguel Burgos y Rafael Díaz de la Guardia

Hasta una determinada fase de su desarrollo, los embriones mantienen el potencial para diferenciarse en macho o hembra. Considerados antaño responsables de promover la diferenciación testicular embrionaria, están aún por dilucidar la verdadera función y modo de actuación de los antígenos específicos del sexo.

65



INFORME ESPECIAL

¿Se está agotando el petróleo?

Según los sondeos más rigurosos, parece que las fuentes tradicionales de producción mundial de petróleo van a experimentar constantes fluctuaciones durante los próximos diez años. En estos artículos, geoquímicos y expertos de la industria explican los motivos y apuntan las técnicas que podrían amortiguar el golpe de una nueva crisis energética.

Fin de la era del petróleo barato

Colin J. Campbell y Jean H. Laherrère

Minería del petróleo

Richard L. George

Producción de petróleo en el siglo XXI

Roger N. Anderson

Combustibles líquidos a partir del gas natural

Safaa A. Fouda

SECCIONES

4 HACE...

28 PERFILES

30



CIENCIA
Y SOCIEDAD

El alcázar omeya de Amman.

86



JUEGOS
MATEMÁTICOS

Botellas de Klein en vidrio.

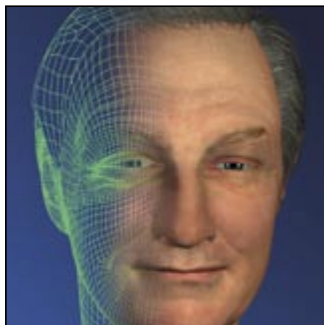
38 DE CERCA

84 TALLER Y LABORATORIO

88 NEXOS

90 LIBROS

96 IDEAS APLICADAS



Portada: Imagen de Lamb & Co.
Composición fotográfica: Slim Films

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-10	Michael Goodman
11	Mark Gerber
12	JILA
14-15	Oliver Meckes; CNRI/SPL/PHOTO RESEARCHERS, INC.; Oliver Meckes; A.B. Dowsett SPL; NIBSC/SPL; CAMB/ A.B. Dowsett; E. Gray SPL; Oliver Meckes; CNRI/SPL (de izquierda a derecha)
16-17	Tomo Narashima (arriba); Dan Wagner (fotografía); Laurie Grace (manipulación digital) (abajo, izquierda); Laurie Grace, fuente: Christopher G. Dowson, Tracey J. Coffey y Brian G. Spratt (abajo, derecha)
18-20	Tomo Narashima
22-23	David Scharf; Sam McCal (inserto)
24	Seng-Tiong Ho
25	Laboratorio Nacional Sandia (izquierda y centro); K.-Y.Lim, G. Petrich y L. Kolodziejski (derecha)
26	Lab. Nac. Sandia; Johnny Johnson (gráfica)
40-41	Jessica K. Hodgins
42-43	Everett Collection (izquierda); Cortesía de Microsoft Motion Capture Group (centro); James O'Brien y Victor Zordan (derecha); Jessica K. Hodgins (abajo)
44-45	Nancy Pollard (abajo izquierda); Sam Odgen, en el Museo de Bellas Artes (fotografías); Lamb & Co. (Alan digital); Wayne Wooten (abajo derecha)
48-49	Frans Lanting, Minden Pictures
50-52	Roberto Osti
53	Don Ashby, Sygma
54	Bryan Christie
56-63	Antonio Sánchez, Rafael Jiménez, Miguel Burgos y Rafael Díaz de la Guardia
65	Bill Ross, Tony Stone Images
66	Corbis-Bettmann
67	UPI/Corbis-Bettmann (izquierda y centro); Bruno Barbey, Magnum Photos (derecha); Jennifer C. Christiansen, fuente: Jean H. Laherrère (gráficas)
68-69	Cortesía de la Sociedad de Exploración Geofísica (arriba izquierda); Jennifer C. Christiansen y Laurie Grace (gráficas); Laurie Grace (abajo)
70-71	L. Grace, fuente: J. H. Laherrère (arriba); L. Grace, fuente: Petroconsultants, Oil and Gas Journal y Servicio Geológico de EE.UU. (abajo, izquierda); L. Grace, fuente: Oil and Gas Journal (derecha)
72-73	Cortesía de Syncrude (arriba); Daniels & Daniels, fuente: Suncor (abajo)
74-75	Daniels & Daniels; Laurie Grace (gráfica)
76-77	Daniels & Daniels (fondo); Laurie Grace, fuente: Schlumberger (abajo izquierda); L. Grace (gráficas)
78-79	Daniels & Daniels; Bevil Knapp (fotografía)
81	Larry Mayer (Liaison International)
82-83	Laurie Grace
84	Richard Jones
85	Richard Jones (arriba); Johnny Johnson (abajo)
86-87	Cortesía de Alan Bennett; Laurie Grace (dibujos)
88	Dusan Petricic
96	Jared Schneidman Design

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *El condensado de Bose-Einstein*; José M^a Valderas Martínez: *La resistencia contra los antibióticos y Nexos*; Julio A. Alonso: *Nanoláseres*; Luis Bou: *La animación del movimiento humano, De cerca y Juegos matemáticos*; Ana M^a Rubio: *El comercio del caimán*; Carmina Fuster: *Fin de la era del petróleo barato*; Manuel Puigcerver: *Combustibles líquidos a partir del gas natural*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio e Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén

EDICIONES José María Valderas, *director*

ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*

PRODUCCIÓN M.^a Cruz Iglesias Capón

Bernat Peso Infante

SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez

EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.^a – 08021 Barcelona (España)

Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie

BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*;

Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*;

W. Wayt Gibbs; Alden M. Hayashi; Kristin Leutwyler;

Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider;

y Glenn Zorpette

Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*

PRODUCTION Richard Sasso

PUBLISHER Joachim P. Rosler

CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.^a
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.150	20.700

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

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

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.^a – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:

Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.^a
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada

Copyright © 1998 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

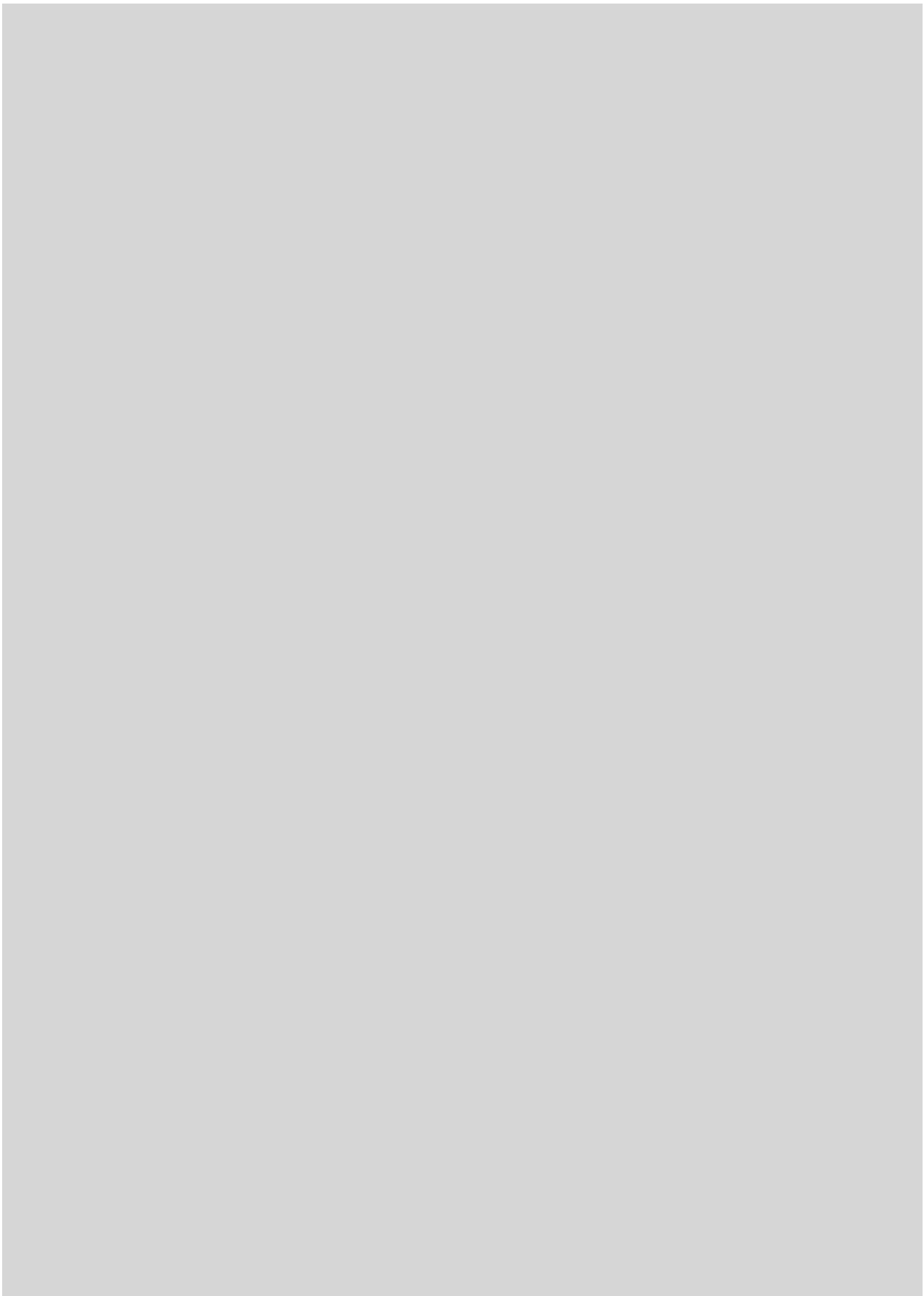
Copyright © 1998 Prensa Científica S. A. Muntaner, 339 pral. 1.^a 08021 Barcelona (España)

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

Filmación y fotogramas reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6^a planta, 3^a puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE...

...cincuenta años

EL FUTURO DEL AMAZONAS. «El Instituto Hileano (del griego "hyle", madera) del Amazonas es una organización para una iniciativa asombrosa. (Hilea es el nombre dado a la región boscosa del Amazonas y el Orinoco.) Su objetivo no es expoliar los bosques vírgenes para arrancarles materias primas o alimentos, sino que se propone algo más sutil y medido. Quiere estudiar la fisiografía, la historia natural y la ecología de la región y desarrollar un proceso merced al cual el hombre aprenda a vivir con armonía y plenitud en su entorno sin luchar contra él. Por sí mismo, civilizar la salvaje y rica Amazonía sería ya un logro gigantesco.»

ORIGEN CÓSMICO. «La Hipótesis de la Nube de Polvo, tal como se llama, sugiere que los planetas y las estrellas se formaron a partir de inmensas agrupaciones de partículas submicroscópicas que flotaban en el espacio. El espacio interestelar, que antes se suponía vacío, aloja una asombrosa cantidad de materia microscópica. Jan Oort, de los Países Bajos, presidente de la Unión Astronómica Internacional, ha calculado que la masa total de ese polvo y gas interestelar es tan grande como toda la de la materia de las mismas estrellas, incluidos todos los sistemas planetarios posibles.

—Fred L. Whipple.»

...cien años

UN GUERRERO AZTECA. «Nuestra ilustración muestra una estatua de terracota. De un metro y sesenta de altura, fue hallada por un indio en una cueva cercana a la ciudad de Tezoco. Desde luego, es anterior a la conquista española. La vestimenta se compone de una guerrera ('uipilli')



Estatua de la anti-güedad mexicana

de mangas muy cortas, un cinturón de algodón ('maxlatl'), polainas y sandalias. La hipótesis de que se trata de la estatua de un jefe o guerrero está reforzada por la armadura de algodón, que Torquemada llama 'icheauhuitl'. Esta ofrecía una protección tan eficaz, que los españoles se apresuraron a adoptarla para defenderse ellos del formidable sable de madera y obsidiana ('maquahutil') de los mexicas.»

PESTE AFRICANA. «En Argelia, los médicos franceses han descubierto una enfermedad que, si los exiguos informes recibidos se prueban ciertos, es tan letal como la peste bubónica que ahora se extiende por la India. Comienza manifestándose porque el paciente muestra unas desmesuradas ganas de dormir. Sus síntomas evocan los provocados en el envenenamiento con láudano. Si al paciente no se le despierta en el acto, no tarda en caer en un estupor al que sigue la muerte. Por sus síntomas los corresponsales de las revistas médicas en Argelia la llaman 'Maladie du Sommeil' (enfermedad del sueño). Dos médicos de la Universidad de Coimbe sostienen que es una patología microbiana.»

GRASA SECA. «Como lubricante, el grafito lo recomienda incluso la sociedad prusiana de inspección de calderas. Pero no sólo debe estar libre de cualquier cuerpo extraño duro, tal como el cuarzo, sino que además debe hallarse en forma de copos; éstos se adhieren a la superficie rugosa del metal y rellenan todas las irregularidades debidas a la manufactura. Según experimentos recientes, la eficacia de ese tipo de grafito triplica la alcanzada por el aceite mineral mejor refinado. Actualmente en el mercado se ofrece sólo el procedente de Ceilán y Ticonderoga (Nueva York).»

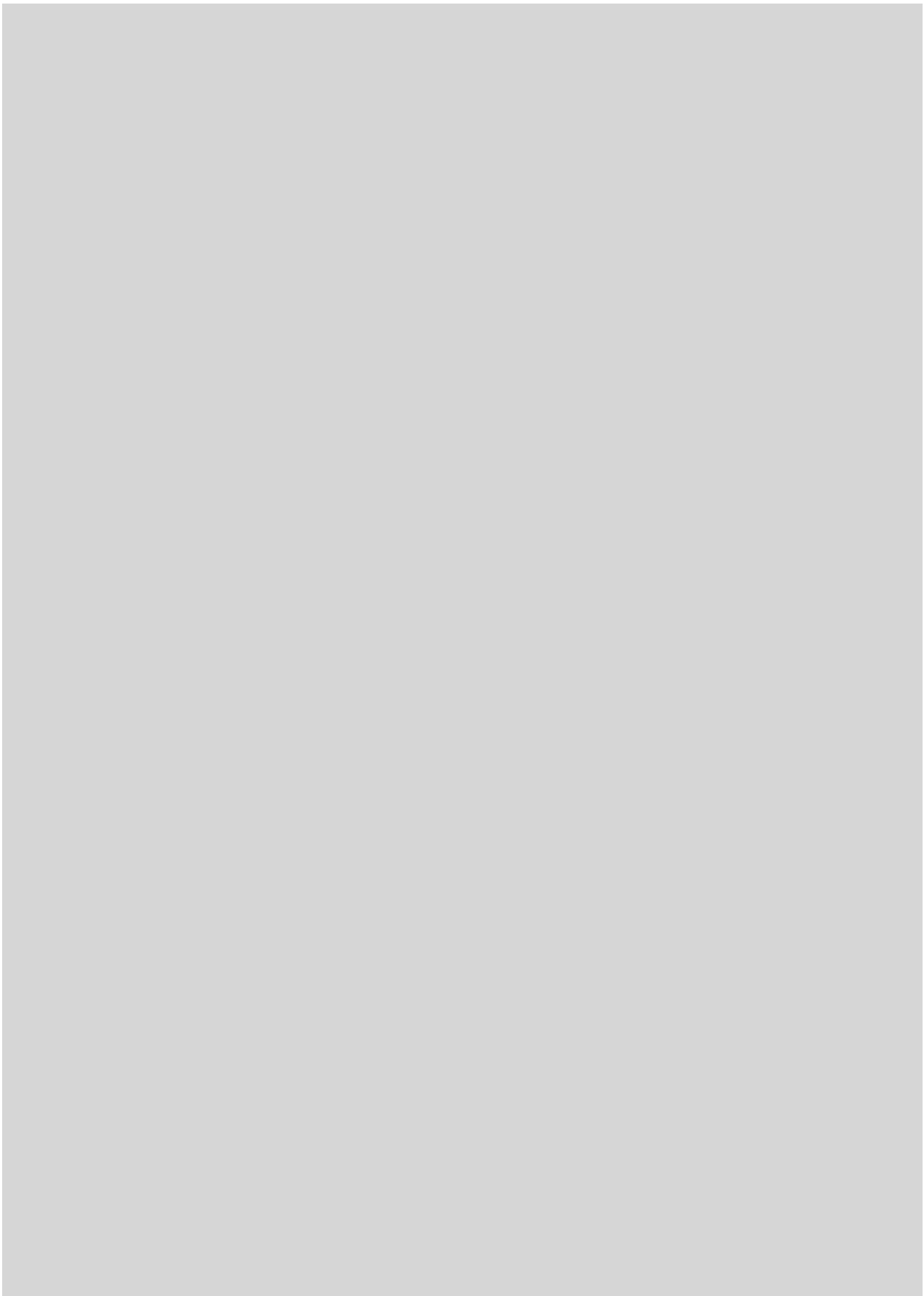
PLACAS DE IDENTIFICACIÓN. «El Departamento de Guerra ha preparado un sistema para identificar a los componentes de los ejércitos estadounidenses que puedan entrar en acción. Los soldados llevarán en torno al cuello una etiqueta de aluminio, que permitirá identificarlos en el campo de batalla. En la última guerra era casi imposible identificar correctamente a las bajas y miles de soldados fueron enterrados en tumbas sin más referencia que el 'no identificado'.»

...ciento cincuenta años

VALLAS DE ALAMBRE. «Esta clase de valla se está empleando mucho en el norte de Illinois. Tenemos noticias de muchos lugares en que se instala cerca de Rock River, uno de ellos con una longitud de más de tres kilómetros. Su precio, por lo que sabemos, es del orden de siete centavos el metro. Se dice que es muy efectiva para el ganado de todo tipo salvo el porcino. Las reses y los caballos en especial, cuando ya han sentido una vez su corte en los morros, rara vez volverán a acercarse a ellas.»

SALVAR EL TRABAJO. «Una manifestación de peones ladrilleros fue dispersada por la policía de Baltimore el jueves, durante un intento de destruir varias máquinas automáticas introducidas en algunos ladrillares, bajo la insensata pretensión de que con esas máquinas los patrones prescindirán de la mano de obra.»

BOLA DE FUEGO. «Numerosos filósofos han creído firmemente que el centro de la tierra era una hoguera muy grande y que los habitantes del globo vivían, se movían y dormían sobre la corteza de un horno inmenso, del que el Vesubio, el Estrómboli y otros volcanes no son sino las chimeneas. Estas opiniones, o la teoría ígnea como se llamó, están cediendo ante otras más racionales. Todos los fenómenos atribuidos al fuego podrían deberse a corrientes electromagnéticas. Terremotos y actividad volcánica podrían resultar de fluctuaciones en corrientes eléctricas de signos opuestos.»



El condensado de Bose-Einstein

*En un laboratorio de Colorado se hizo real hace tres años
un viejo sueño. Gracias a ello, el mundo cuántico
se acercó más al cotidiano*

Eric A. Cornell y Carl E. Wieman

Nuestro grupo de investigación del Instituto Conjunto de la Astrofísica de Laboratorio (o JILA ahora), en Boulder, creó en junio de 1995 una gota, aunque minúscula, maravillosa. Al enfriar 2000 átomos de rubidio hasta una temperatura de menos de 100 milmillonésimas de grado sobre el cero absoluto (100 milmillonésimas de grado kelvin) hicimos que los átomos perdiesen durante 10 segundos su identidad individual y se comportaran como si fuesen un solo “superátomo”. Las propiedades físicas de todos ellos, sus movimientos, por ejemplo, se volvieron idénticas. Este condensado de Bose-Einstein (CBE), el primero observado en un gas, viene a ser el análogo material del láser, con la diferencia de que en el condensado son átomos, no fotones, los que danzan al unísono.

Nuestra gélida y efímera muestra era la realización experimental de una noción teórica que ha llamado la atención desde que hace unos 73 años predijeran su existencia Albert Einstein y Satyendra Nath Bose. A las temperaturas corrientes, los átomos de los gases se dispersan por el contenedor que los guarde. Algunos tienen energías grandes (son veloces); otros, pequeñas. Llevando más allá un trabajo de Bose, Einstein demostró que, si se enfriaba lo bastante una muestra de átomos, una gran parte pasaría al estado de energía más bajo en ese contenedor; matemáticamente: sus ecuaciones de onda individuales —que describen la posición y velocidad de un átomo— se funden en una y los átomos se vuelven indistinguibles entre sí.

El progreso en la creación de condensados de Bose-Einstein ha despertado el interés entre los físicos. Si al principio se comentaba el largo camino recorrido hasta la demostra-

ción de la teoría de Einstein, ahora fascina la ventana que el condensado abre al extraño mundo de la mecánica cuántica, la teoría de la materia basada en el conocimiento de que las partículas elementales, los electrones por ejemplo, tienen propiedades ondulatorias. La mecánica cuántica, que engloba el famoso principio de incertidumbre de Heisenberg, se vale de ellas para describir la estructura y las interacciones de la materia.

Raras veces vemos los efectos de la mecánica cuántica reflejados en la conducta de una cantidad macroscópica de materia. Las contribuciones incoherentes del inmenso número de partículas de cualquier porción de materia oscurecen la naturaleza ondulatoria de la mecánica cuántica; sólo podemos inferir sus efectos. Pero en la condensación de Bose la naturaleza ondulatoria de cada átomo está en fase con la de los demás; y lo está de manera precisa. Las ondas mecanocuánticas atraviesan la muestra entera y se observan a simple vista. Lo submicroscópico deviene macroscópico.

La creación de condensados de Bose-Einstein ha arrojado luz sobre viejas paradojas de la mecánica cuántica. Por ejemplo, si dos o más átomos están en un solo estado mecánico-cuántico, y eso es lo que pasa en un condensado, será imposible distinguirlos, se haga la medición que se haga. Los dos átomos ocuparán el mismo volumen de espacio, se moverán a la misma velocidad, dispersarán luz del mismo color, etc.

En nuestra experiencia, basada en el trato constante de la materia a temperaturas normales, no hay nada que nos ayude a entender esta paradoja. Por un motivo: a las temperaturas normales y a las escalas de magnitud en que nos desenvolvemos,

1. LA TRAMPA ATOMICA enfría a través de dos mecanismos diferentes. Primero seis haces de láser (*rojos*) enfrían los átomos, que al principio están a la temperatura del laboratorio; los acorralan en torno al centro de una caja de cristal donde se ha hecho el vacío. A continuación se apagan los haces de láser y se encienden las bobinas magnéticas (*cobre*). La corriente que fluye por las bobinas genera un campo magnético que encierra aún más a la mayoría de los átomos y deja escapar los que tengan una energía más elevada. La energía media de los átomos restantes decrece; con ello, la muestra se enfría y queda encerrada todavía más estrechamente alrededor del centro de la trampa. Por último, muchos de los átomos adquieren la energía más baja posible según las reglas de la mecánica cuántica y se convierten en una sola entidad: un condensado de Bose-Einstein.

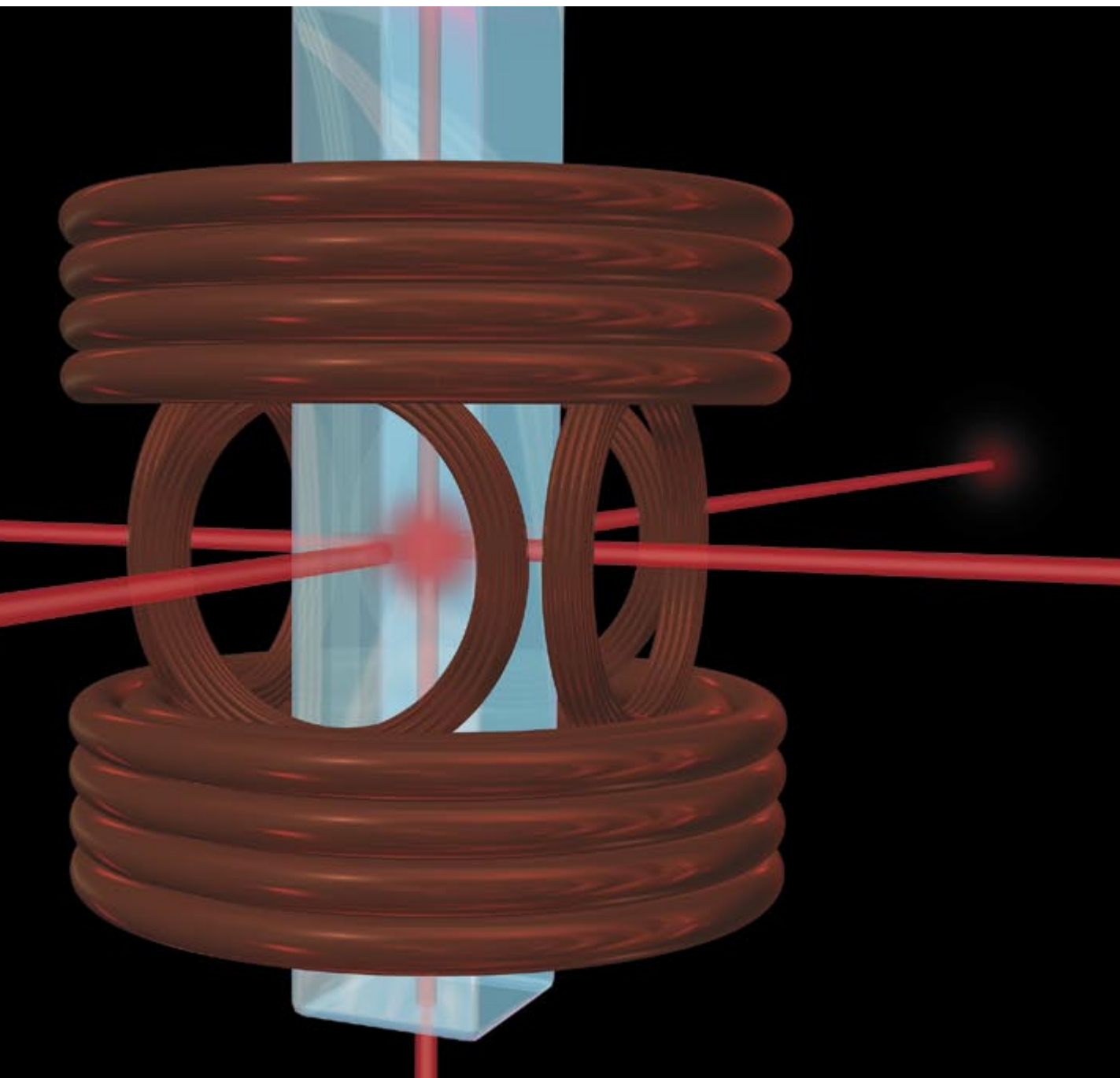
es posible describir la posición y el movimiento de todos y cada uno de los objetos de un conjunto. Las bolas numeradas que suben y bajan en el bombo de la lotería son un modelo del movimiento que la mecánica clásica describe.

A temperaturas bajísimas o a escalas de magnitud pequeñas, la mecánica clásica va perdiendo vigor. La metáfora de los átomos y las bolas de lotería se difumina. No podemos saber la posición exacta de cada átomo, y es mejor imaginarlos como manchas imprecisas. La mancha es

un paquete de ondas, la región del espacio donde cabe esperar que esté el átomo. Conforme un conjunto de átomos se enfría, crece el tamaño de los paquetes de ondas. Mientras cada uno esté espacialmente separado de los demás será posible, al menos en principio, distinguir los átomos entre sí. Pero cuando la temperatura llega a ser lo bastante baja los paquetes de ondas de los átomos vecinos se solapan. Entonces, los átomos “se Bose-condensarán” en el menor estado de energía que sea posible, y los paquetes de ondas se fundirán en

un solo paquete macroscópico. Los átomos sufrirán una crisis cuántica de identidad: ya no podremos distinguir unos de los otros.

La pasión que han despertado los condensados contrasta con la reacción que suscitó en 1925 el descubrimiento de Einstein de su posible existencia. Quizá porque entonces no se podían obtener las temperaturas necesarias —menos de una millonésima de grado kelvin—, se consideró que el hipotético condensado gaseoso no pasaba de ser una mera curiosidad sin trascendencia. Para hacernos una



idea: hasta las profundidades más frías del espacio intergaláctico son millones de veces más calientes que un condensado de Bose.

Pero con los años la condensación de Bose fue ganándose el interés. Se comprendió que podía explicar la superfluidez del helio líquido, que se produce a temperaturas mucho

mayores que la condensación gaseosa de Bose. Por debajo de los 2,2 kelvin la viscosidad del helio líquido desaparece; la fluidez se gana el "super".

Hasta finales de los años setenta la técnica de la refrigeración no permitió pensar en realizar en un gas la idea einsteiniana de un CBE. Investigadores del MIT y de las universidades de Amsterdam, Columbia Británica y Cornell hubieron de enfrentarse a una dificultad fundamental. Para obtener ese CBE tenían que enfriar el gas muy por debajo de la temperatura a la que los átomos se congelarían formando un sólido. Tenían que crear, pues, un gas sobresaturado. Se esperaba que el hidrógeno se sobresaturase porque se sabía que se resistía a la agrupación átomo a átomo que precede a la congelación en masa.

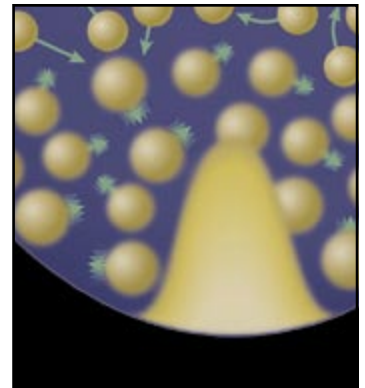
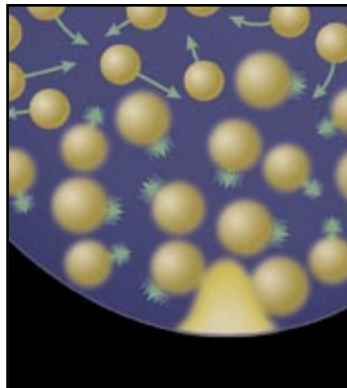
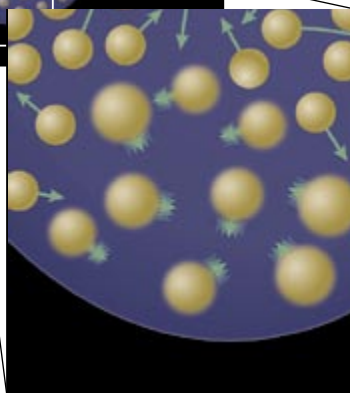
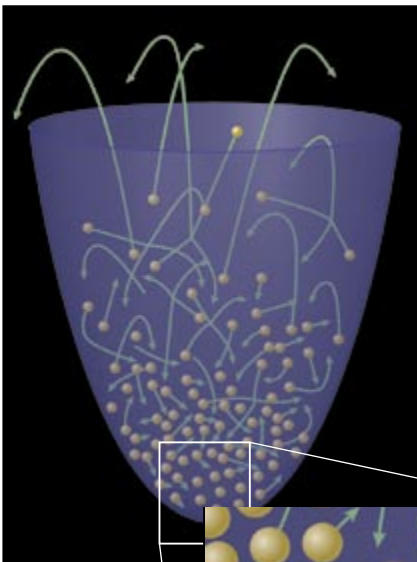
Aunque no lograron un condensado de Bose-Einstein con hidrógeno, sí ampliaron nuestro conocimiento de las dificultades y abrieron sendas que aprovechamos nosotros. Empezamos a sospechar en 1989, inspirados por esos trabajos con el hidrógeno y alentados por los nuestros sobre el uso del láser para atrapar y enfriar átomos alcalinos, que éstos —el cesio, el rubidio, el sodio— eran unos candidatos mucho mejores que el hidrógeno para la producción de un condensado de Bose. Aunque las propiedades de agrupación del cesio, el rubidio y el sodio no son superiores a las del hidrógeno, se transforman antes que éste en un condensado. Como sus átomos son mucho mayores que los del hidrógeno y rebotan unos

en otros con una frecuencia también mucho mayor, se reparten la energía más deprisa y el condensado puede formarse antes de que se produzca el agrupamiento.

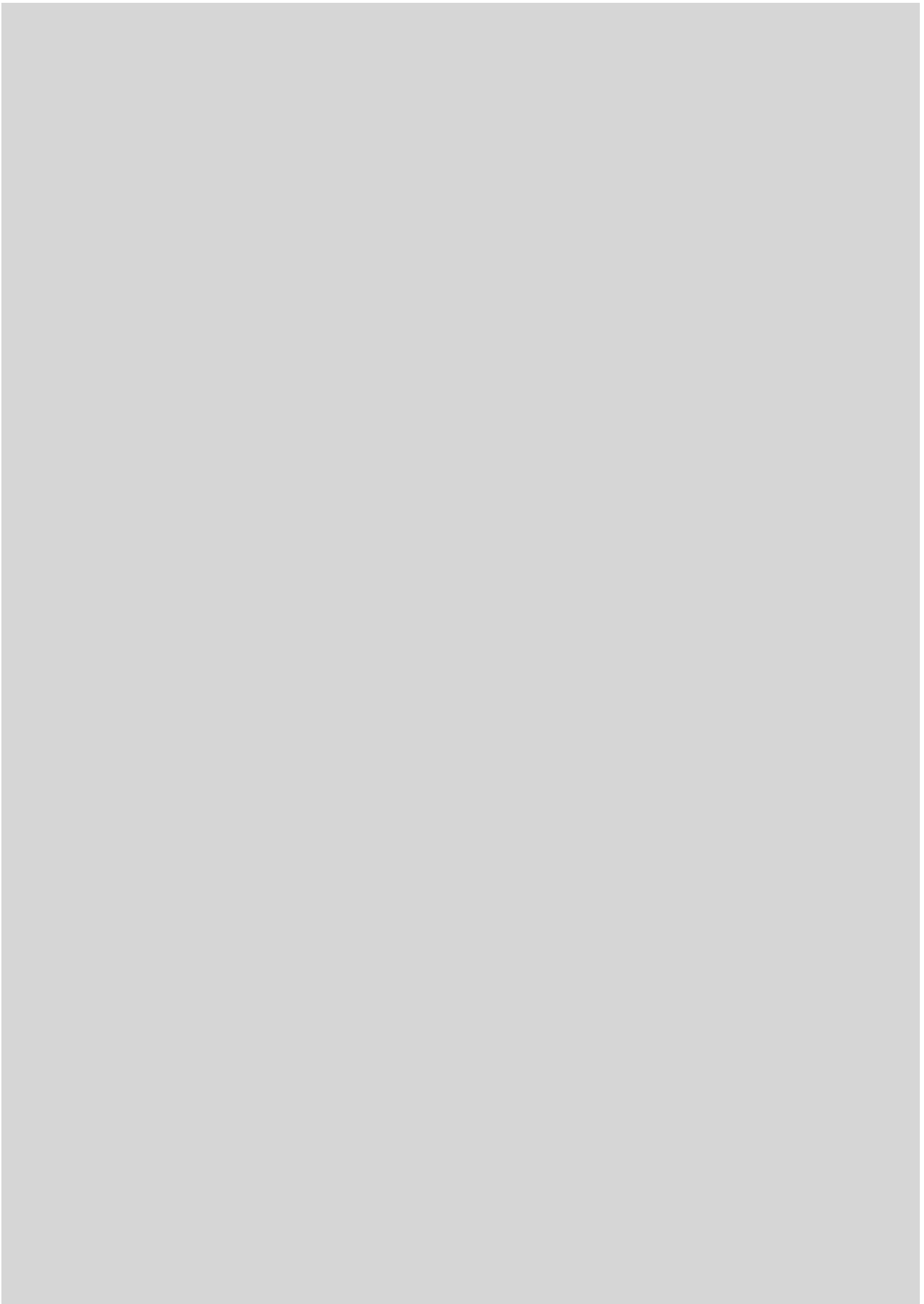
Parecía además que sería hasta cierto punto fácil y barato enfriar muchísimo esos átomos conjugando técnicas disponibles: por un lado, las que enfrían y atrapan átomos de álcalis mediante el láser; por otro, las que elaboraron para atraparlos magnéticamente los que investigaban con el hidrógeno. Comentamos estas ideas con Daniel Kleppner, amigo hoy, maestro ayer, codirector de un grupo del MIT empeñado en obtener condensados con hidrógeno.

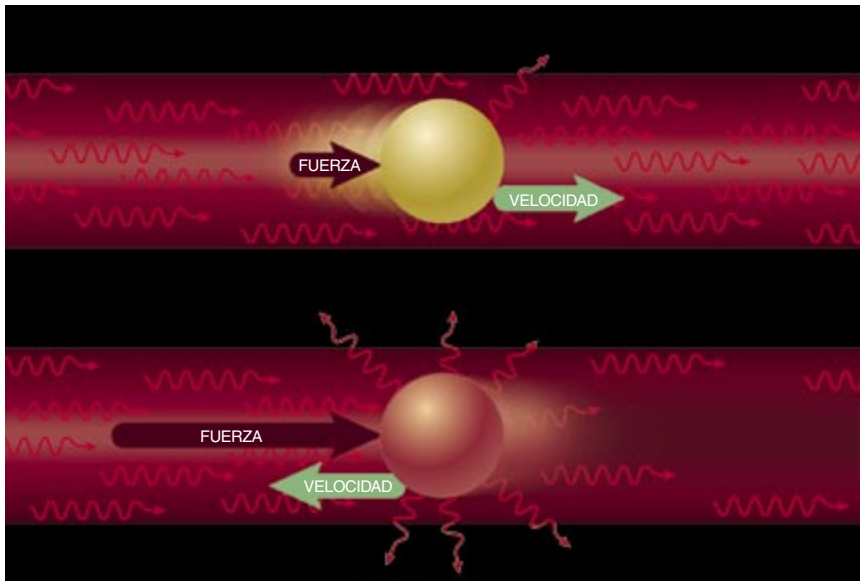
Nuestra hipótesis sobre los átomos alcalinos dio resultado. Sólo unos meses después de que lo lográsemos con el rubidio, el grupo de Wolfgang Ketterle, del MIT, produjo un condensado de Bose con átomos de sodio; ha conseguido después crear uno de 10 millones de átomos. Mientras escribimos esto, hay al menos siete equipos en el tajo. Además del nuestro trabajan con rubidio los de Daniel J. Heinzen, de la Universidad de Texas en Austin, Gerhard Rempe, de la de Constanza, y Mark Kasevich, de Yale; con sodio, además de Ketterle en el MIT, está el grupo de Lene Vestergaard Hau, del Instituto Rowland de Ciencias de Cambridge. En la Universidad Rice, Randall G. Hulet ha creado un condensado con litio.

Todos se sirven de pareja infraestructura. Igual que en cualquier refri-



2. EL ENFRIAMIENTO POR EVAPORACION se efectúa en una trampa magnética, una suerte de cuenco profundo (*en azul*). Los átomos de mayor energía, dibujados con las flechas verdes más largas, escapan del cuenco (*arriba, a la izquierda*). Los que se quedan chocan entre sí con frecuencia y la energía restante se reparte (*a la izquierda*). Al final los átomos se mueven tan despacio y se aglomeran tan apretadamente en el fondo del cuenco, que su naturaleza cuántica se acentúa. Unos paquetes de ondas —región donde es probable que se encuentre cada átomo— se van confundiendo y solapando con los otros (*abajo, a la izquierda*). Por último, chocan dos átomos y uno se queda tan estacionario como permite el principio de incertidumbre de Heisenberg. Se desencadena así una avalancha de átomos que se acumulan en el estado de energía más bajo de la trampa, donde se fusionan creando el condensado de Bose-Einstein (*abajo, en el centro y a la derecha*).





geración, la de los átomos requiere una forma de retirar el calor y otra de aislar de su entorno la muestra a enfriar. Ambas cosas se hacen en dos pasos: primero la fuerza de la luz del láser sobre los átomos los enfría y aísla; luego, se los aísla con campos magnéticos y se los enfría por evaporación.

El corazón de nuestro aparato es una cajita de cristal, rodeada por bobinas de cable. Se crea un vacío perfecto en el recipiente; lo que producimos en realidad es un termo magnífico. E introducimos una mínima cantidad de gas de rubidio. En el centro de la caja se cortan seis haces de luz de láser que convergen en el gas. Esa luz no tiene por qué ser intensa; nos basta así con los láseres de diodo, parecidos a los que hay en los lectores de discos compactos.

Ajustamos la frecuencia de la radiación láser de forma que los átomos la absorban y radien de nuevo fotones. Un átomo puede por segundo absorber y a continuación radiar muchos millones de fotones; cada vez recibe un minúsculo empujón en la dirección por la que se movía el fotón absorbido. Estos empujones son la “presión de la radiación”. El truco para enfriar con el láser es conseguir

que el átomo absorba fotones que viajen en sentido opuesto al de su movimiento, porque así será frenado (enfriado, en otras palabras). Lo logramos ajustando con mucho cuidado la frecuencia de la luz de láser con respecto a la frecuencia de la luz que absorben los átomos.

Nos valemos también de este montaje de luz de láser para “atrapar” los átomos y tenerlos alejados de las paredes del recipiente, que está a la temperatura ambiente del laboratorio. En realidad, atrapar viene a ser parecido a enfriar. En la fase de atrapar átomos nos valemos de la presión de la radiación para oponernos a la tendencia que tienen a irse separando del centro de la celda. Un campo magnético débil sintoniza la resonancia del átomo para que absorba los fotones del haz de láser que apunta hacia el centro del recipiente (recuérdese que se cortan en él seis haces de láser). El efecto final es que la mera fuerza de la luz de láser empuja los átomos hacia una sola zona y los retiene en ella.

Estas técnicas llenan en un minuto nuestra trampa láser con 10 millones de átomos capturados del vapor de rubidio a temperatura ambiente que se introdujo en la caja. Los átomos atrapados están a una temperatura de unas 40 millonésimas de grado sobre el cero absoluto, una temperatura aún 100 veces demasiado caliente para formar un CBE. En presencia de la luz de láser el inevitable golpeteo aleatorio que los átomos reciben de los fotones sueltos impide que se enfríen y adensen más.

ERIC A. CORNELL y CARL E. WIEMAN dirigieron el equipo que produjo el primer condensado de Bose-Einstein en un gas. Cornell está agregado al Instituto Nacional de Pesos y Medidas. Wieman enseña física en la Universidad de Colorado.

3. EL ENFRIAMIENTO POR LASER de un átomo se basa en la presión, o fuerza, de los impactos de los fotones. Los átomos que se mueven contra un haz de láser encuentran una frecuencia de la luz mayor que los que se mueven con él. En el enfriamiento la frecuencia del haz se ajusta de manera que un átomo que se mueva hacia el haz disperse muchos más fotones que otro que se aleje del mismo. En razón de ese proceder lo que resulta es una reducción de la velocidad y, por ende, el enfriamiento de los átomos.

Para superar las limitaciones impuestas por esos impactos aleatorios de fotones apagamos en ese punto los láseres y activamos la segunda etapa del proceso de enfriamiento, la que se basa en la técnica de atrapar magnéticamente y enfriar por evaporación que se desarrolló mientras se perseguía la creación de un condensado con hidrógeno. La trampa magnética aprovecha el hecho de que cada átomo sea un imán minúsculo, sometido por ende a una fuerza cuando se lo pone en un campo magnético. Mediante un control meticuloso de la forma de éste y procurando que sea intenso podemos retener con él los átomos, que se mueven por el campo a manera de bolas en un cuenco profundo. En el enfriamiento por evaporación los átomos de mayor energía escapan del cuenco magnético, y con ello se llevan más que su parte de energía y dejan más fríos a los que se quedan.

Pensemos en un café que se va enfriando. Las moléculas de agua que porten mayor energía saltarán de la taza a la habitación (en forma de vapor), con lo que se reducirá la energía media del líquido sin evaporar. Mientras tanto, incontables colisiones entre las moléculas que siguen en la taza reparten la energía que quede en ésta entre todas ellas. Nuestra nube de átomos magnéticamente atrapados es mucho menos densa que el agua de la taza. El principal problema experimental con el que hubimos de vérnoslas durante cinco años fue, pues, conseguir que los átomos chocasen entre sí las suficientes veces para que compartieran su energía antes de que los liberara de la trampa un choque accidental con uno de los átomos sin atrapar y a temperatura ambiente que quedan en la cajita de cristal.

No hubo un salto espectacular, pero sí pequeños retoques que resolvieron el problema. Así, antes de montar el recipiente y su bomba de