

# INVESTIGACION *y* CIENCIA

ENERO 2000  
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de  
**SCIENTIFIC  
AMERICAN**

¿Se obtendrá la ley  
unificadora  
de la **física**?

¿Retrasaremos  
el proceso  
de **envejecimiento**?

¿Qué es  
la **conciencia**?

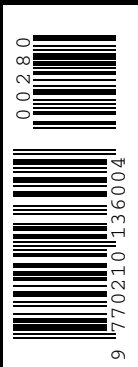
¿Cómo surgió  
el **universo**?

¿Descubriremos  
los secretos  
escondidos  
de los **genes**?

¿Hay vida  
**extraterrestre**?



**LA CIENCIA  
ASI QUE PASEN  
50 AÑOS**



# LA CIENCIA ASI QUE

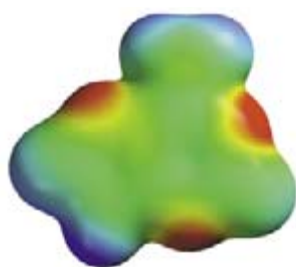
## SECCIONES

**4**  
**HACE...**  
50, 100 y 150 años.

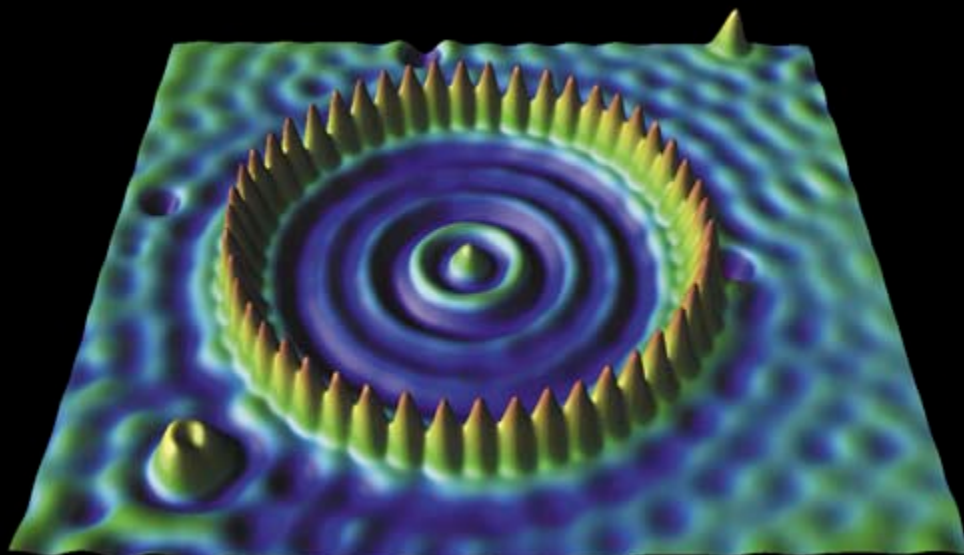
**28**  
**PERFILES**  
Margaret D. Lowman:  
en el dosel del trópico.



**30**  
**CIENCIA Y SOCIEDAD**  
Premios Nobel de 1999...  
Replicación del ADN...  
Nacimiento de nebulosas  
planetarias... *Bacillus*  
*thuringiensis*... El desfronde  
en pinares...  
El proyecto IVORY.



**40**  
**DE CERCA**  
Vida en la oscuridad.



## La ciencia del nuevo milenio

*John Maddox*

6

Igual que ocurrió en las postrimerías del siglo pasado con el decurso de la ciencia en nuestra centuria, los principales avances que nos esperan ni siquiera los sospechamos.

## La unificación de la física

*Steven Weinberg*

14

Los experimentos deberían permitir completar el modelo estándar de la física de partículas, pero una teoría unificada de todas las fuerzas puede requerir ideas completamente nuevas

## Exploración del universo

*Martin Rees*

22

Los cosmólogos desentrañarán en el siglo XXI el misterio del nacimiento de este universo. Quizá prueben incluso que hay otros mundos

## El código de la vida, descifrado

*Francis S. Collins*  
*y Karin G. Jegalian*

42

El estudio de la totalidad de los genes de varios organismos nos ofrecerá respuesta para algunas de las cuestiones más apasionantes sobre la vida.



# PASEN 50 AÑOS

## Bases genéticas y ambientales de la conducta

*Frans B. M. de Waal*

48

¿Está el comportamiento humano determinado por aspectos genéticos o por el entorno? Es hora de abandonar la dicotomía.

## Influencia del hombre sobre el clima

*Thomas R. Karl y Kevin E. Trenberth*

54



¿Cuánta alteración causamos en el clima? La respuesta puede llegar hacia el año 2050 pero sólo si todas las naciones del mundo se comprometen desde ahora en la vigilancia del clima a largo plazo.

## ¿Podemos retardar el envejecimiento?

*Michael R. Rose*

60

Si bien es posible en teoría, no se conseguirá con un único elixir. Los futuros tratamientos contra el envejecimiento tendrán que contrarrestar simultáneamente muchos procesos bioquímicos degenerativos.



## Creación cerebral de la mente

*Antonio R. Damasio*

66

Durante mucho tiempo, filósofos y neurólogos se han preguntado acerca de la naturaleza de la mente consciente. Una mejor comprensión de las funciones del cerebro debería conducirnos a una respuesta definitiva.

## ¿Existe vida en otro lugar del universo?

*Jill C. Tarter  
y Christopher F. Chyba*

72

Nadie lo sabe. La búsqueda de vida extraterrestre no ha sido tan concienzuda como se pudiera creer. Tal situación está a punto de cambiar.



## El apogeo de los robots

*Hans Moravec*

78

Hacia el 2050 los "cerebros" basados en computadores que ejecutan 100 billones de instrucciones por segundo empezarán a rivalizar con la inteligencia humana.

## SECCIONES

87  
**LIBROS**

Historia Natural...  
Literatura y Ciencia.



## 92 JUEGOS MATEMÁTICOS

¡Defended el Imperio Romano!,  
por Ian Stewart

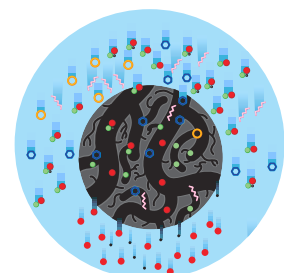


94  
**NEXOS**

A vueltas con el ozono,  
por James Burke

96  
**IDEAS APLICADAS**

Filtros de agua,  
por Louis A. Bloomfield





Portada: Space Channel/  
Philip Saunders

## PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7-8	Centro Espacial Johnson, NASA
9	A. Barrington Brown
10	Centro de Investigación de Almaden, IBM
12	Cortesía de <i>Nature</i>
15	Alfred T. Kamajian
16-17	Johnny Johnson
18-19	Slim Films ( <i>arriba, izquierda</i> ); Johnny Johnson
20	Slim Films
23	Virgo Consortium (J.M. Colberg, H.M.P. Couchman, G. Efstathiou, C. S. Frenk, A. Jenkins, J. A. Peacock, F. R. Pearce y S.D.M. White
24-25	Alfred T. Kamajian
26	Pat Rawlings
43	Everard Williams, Jr.
44-45	Bryan Christie
46	Bryan Christie con la colaboración de John Logsdon
49	Thomas Wanstall
50	Sovfoto/Eastfoto
52	Frans Lanting
53	Catherine Marin
55	CORBIS/AFP
56	Robert Pickett, David Muench, Jim Zuckerman y Corbis ( <i>izquierda, de arriba abajo</i> ); Chinch Gryniewicz ( <i>fotografía</i> ), Laurie Grace ( <i>gráfica</i> )
57	NOAA/Laboratorio de Fluidos Dinámicos y Geofísica
58	Neil Rabinowitz
59	Cortesía del Centro Nacional de Datos Climáticos
60-61	Jerry Gay
62	Laurie Grace
63	Marc Wexler ( <i>izquierda</i> ), Peter Ginter ( <i>derecha</i> )
64-65	Christoph Blumrich ( <i>dibujos</i> ), Laurie Grace ( <i>gráficas</i> ); Robert K. Moyzis ( <i>telómeros</i> )
67	Slim Films
68	Dimitry Schidlovsky
69-70	Hanna Damasio
71	Remi Benali
72-73	SETI@HOME, Universidad de California en Berkeley
74	Seth Shostak, Instituto SETI
75	Instituto SETI
76	Ron Miller ( <i>arriba</i> ), Laboratorio de Propulsión a Chorro/NASA ( <i>abajo</i> )
77	Instituto SETI
79	Peter Menzel
80	Jesse Easudes
81	Space Channel/Philip Saunders/ Gordon Chapman
82	Frog Navigation Systems
83	Peter Menzel
84	Hans Moravec
85	Peter Menzel

## COLABORADORES DE ESTE NUMERO

### Asesoramiento y traducción:

Xavier Roqué: *La ciencia del nuevo milenio*; Néstor Herrán: *La unificación de la física*; Juan Pedro Campos: *Exploración del universo*; Esteban Santiago: *El código de la vida, descifrado*; Marcos Díaz y José F. Bartolomé: *Bases genéticas y ambientales de la conducta*; Manuel Puigcerver: *Influencia del hombre sobre el clima*; Ana M.<sup>a</sup> Rubio: *¿Podemos retardar el envejecimiento?*; Margarita Martí e Ignacio Morgado: *Creación cerebral de la mente*; Luis Bou: *¿Existe vida en otro lugar del universo?* y *Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Perfiles y Nexos*; J. Vilardell: *Hace... e Ideas aplicadas*

## INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén

EDICIONES José María Valderas, *director*

ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*

PRODUCCIÓN M.<sup>a</sup> Cruz Iglesias Capón

Bernat Peso Infante

SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez

EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup> – 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, *Senior Associate Editor*; Timothy M. Beardsley y Gary Stix,

*Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line*

*Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Steve Mirsky,

Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson

y Glenn Zorpette, *Editors*; Graham P. Collins; Marguerite Holloway

y Paul Wallich, *Contributing Editors*

PRODUCTION William Sherman

CHAIRMAN Rolf Grisebach

PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Joachim P. Rosler

## SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.

Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup>

08021 Barcelona (España)

Teléfono 93 414 33 44

Fax 93 414 54 13

### Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta. 52,89 euro	16.000 pta. 96,16 euro
Extranjero	11.150 pta. 67,01 euro	20.700 pta. 124,41 euro

### Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro

Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

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

## DISTRIBUCION

### para España:

#### LOGISTA, S. A.

Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)

28108 Alcobendas (Madrid)

Tel. 91 484 39 00

### para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.

Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup> – 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.<sup>a</sup>

08021 Barcelona

Tel. 93 321 21 14

Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

Copyright © 1999 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2000 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

Filmación y fotocopios reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª 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

**LA ONU CONTRA LA DESTRUCCIÓN EN MASA.** «Sé que hay personas cuyos esfuerzos parecen orientarse a señalar cuán irreconciliable es el abismo que hoy divide al mundo y no a tender puentes sobre ese abismo. Todos deberíamos saber ya que otra guerra, con las armas de destrucción en masa que hay en los arsenales, supondría la destrucción de todos los sistemas políticos, económicos y sociales existentes y haría retroceder mil años a la civilización. —Trygve Lie, Secretario General de Naciones Unidas»

**A LA LUZ DE LA EVOLUCIÓN.** «La objeción más grave contra la moderna teoría de la evolución es que, dado que las mutaciones surgen aleatoriamente y sin propósito, cuesta comprender cómo pueden sumarse mutación y selección para formar unos órganos tan complejos y bellos como, por ejemplo, el ojo humano. Es realmente abusar de la credulidad suponer que una venturosa combinación repentina de mutaciones azarosas dotó de ojos, con toda la perfección de éstos, a la progenie de una criatura que carecía de ellos; éstos son el resultado de un desarrollo evolutivo que duró millones de años. En el transcurso de esa evolución los rudimentos del ojo atravesaron innumerables etapas, todas las cuales fueron útiles a sus poseedores. —Theodosius Dobzhansky»

## ...cien años

**RADIO.** «Skłodowska Curie ha acometido la determinación del peso atómico del bario. Para ello, sometió a destilación fraccionada una masa de cloruro de bario radiante, extraída de media tonelada de residuos de uranio aportados por el gobierno austríaco. Los valores así obtenidos oscilaron entre 140 y 145,8, frente a 137,7 de peso atómico del bario inerte hallado a la vez. Queda así indeterminado el peso atómico del bario, pero se evidencia que el bario no es un estado alotrópico del bario, pues no hay formas alotrópicas de un elemento que posean pesos atómicos distintos.»

**ZULÚ.** «De acuerdo con las estadísticas, habría mil ciento cincuenta y una tribus nativas distintas en Sudáfrica, al sur del río Zambeze, entre ellas los zulúes. La dermis de éstos es transparente, hasta el punto de que bajo ella puede verse el fluir de la sangre. Constituye ello el máximo orgullo de los zulúes. Uno de ellos se señalará a la piel como prueba de que es un zulú de pura cepa. En la fotografía se muestran dos zulúes solteros. Los

casados llevan una banda alrededor del cabello, mientras que los que siguen en la infelicidad del celibato no lucen tal emblema.»

**LO ÚLTIMO DE BÚFALO II.** «Al redactor jefe: ¿Qué mente racional podría ver con complacencia la carga enloquecida de una gran manada de un millón de búfalos contra todos los pueblos y vallados de Minnesota a Texas? Por donde antaño vagaba sin trabas el pionero de las praderas, hoy pacen en sosiego incontables rebaños de ganado. Para los museos quedan búfalos suficientes.»

**EL NUEVO SIGLO.** «En la prensa diaria encontramos una feroz batalla epistolar rugiente entre los que creen que el año 1899 señala el fin del siglo XIX y los que mantienen que hasta 1901 no cruzaremos el umbral de la nueva era. Parece muy difícil entender que 1800, 1900, 2000, designa no el comienzo, sino el fin de un siglo. Es evidente que nunca hubo un año 0, que el siglo debe empezar con un 1. Hace un siglo se libró la misma guerra verbal; de aquí a cien años se renovará.»

## ...ciento cincuenta años

**NUEVO FUSIL PRUSIANO.** «Noticias del famoso fusil prusiano de retrocarga: la infantería ligera del ejército prusiano está por completo armada con esta terrible arma, y en la última guerra con los daneses, y en algunos enfrentamientos con el pueblo, se probó tremendamente ventajosa para Prusia. Se diferencia mucho de todas las demás armas de fuego de retrocarga. Emplea un cartucho distinto y no usa pólvora fulminante sino una aguja de fricción (*percutor*) que perfora el fondo del cartucho de cartón y prende la pólvora con un detonador inflamable por fricción. Es eficaz en tiempo tanto seco como húmedo. Puede impulsar una bala hasta unos 250 metros. Hace diez disparos en un minuto.» [El fusil Dreyse se considera el precursor de todos los fusiles de retrocarga modernos.]



Zulúes

**QUÍMICA ESTELAR.** «Se ha demostrado la imposibilidad de que el sistema de vida animal y vegetal de nuestro planeta pueda existir en otros planetas y cuerpos celestes. La superficie de la Luna, sin mar ni atmósfera, la variable calidad de meteoritos y eolitos, cuyas sustancias constitutivas se han descubierto mediante análisis, se cuentan entre los datos en los que se cimienta el argumento de que las estrellas no son *telúricas* y, por tanto, que la vida en esos orbes debe sustentarse de modo diferente.»



# La ciencia del nuevo milenio

Es muy probable que ni siquiera barruntemos por dónde irán los descubrimientos principales de los próximos 50 años

John Maddox

**L**as preguntas que todavía no sabemos formular polarizarán la atención de los científicos en los próximos cincuenta años. Lo enseña la historia. Miremos en qué estado se hallaba la ciencia cien años atrás, en 1899. Entonces, como ahora, se reflexionaba sobre los avances del siglo transcurrido. Uno de los logros más duraderos era la prueba ofrecida por John Dalton en 1808 de la constitución atómica de la materia. Otro era la demostración (por James Prescott Joule, en 1851) de la conservación de la energía y la hipótesis que le precedió (esbozada por Sadi Carnot) sobre la limitación intrínseca de la capacidad de transformar una forma de energía en otra. Ambos desarrollos condujeron a la termodinámica y a la idea de que las leyes fundamentales de la naturaleza incorporaban una “flecha del tiempo”.

Por otra parte, la obra de Charles Darwin *El origen de las especies*, publicada en 1859, pretendía explicar la diversidad de la vida sobre la Tierra sin decir nada sobre los mecanismos de la herencia o siquiera sobre las razones por las que no cabía un cruzamiento viable fértil entre especies emparentadas aunque distintas. Por último, en la lista de logros que podía exhibir con satisfacción el siglo XIX, se hallaba la unificación de electricidad y magnetismo, realizada por James Clerk Maxwell mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas del más puro estilo newtoniano. En general, la aplicación de las leyes de Newton se había refinado hasta el extremo de ofrecer una solución para cualquier problema real bien planteado. ¡El XIX había sido un siglo maravilloso!

Había que ser muy perspicaz para percibir, en 1899, los puntos débiles del armazón. Hendrik Antoon Lorentz, de la Universidad de Leiden, vio que la teoría de Maxwell implicaba una contradicción: la teoría suponía la existencia de un éter omnipresente a través del cual se propagaban las perturbaciones electromagnéticas, pero era mucho más simple suponer que el tiempo pasaba con parsimonia mayor en un objeto en movimiento respecto a un observador. Desde ahí bastó dar un pequeño paso (con la ayuda de Henri Poincaré, de la Universidad de París) para alcanzar la teoría especial de la relatividad.

**1. La visión de la Tierra desde la Luna anuncia una nueva forma de ver nuestro mundo y sus habitantes, pero apenas nos permite prever la forma que adoptarán futuros descubrimientos.**





## Nuestra comprensión del cerebro humano es incompleta en un aspecto muy significativo: nadie sabe cómo se toman decisiones ni cómo trabaja la imaginación.

dad de Albert Einstein, publicada en 1905. La teoría especial, con su implicación de que las velocidades relativas no pueden superar la velocidad de la luz, sólo contradice a la teoría newtoniana en el terreno de la filosofía: ni el espacio ni el tiempo pueden proporcionar una trama invisible que permita establecer la posición de un objeto, o determinar el instante en que alcanza esa posición. Hace un siglo pocos parecían haberse enterado de que la explicación más sencilla de los experimentos realizados por A. A. Michelson y E. W. Morley en los años ochenta era, simplemente, que el éter de Maxwell no existía.

A quienes incomodaba, si no ofendía, la complacencia dominante en 1899, podían encontrar muchos otros indicios de que la ciencia fundamental del momento estaba en aprietos. Si los átomos eran indivisibles, ¿cómo se explicaba que los radiactivos, descubiertos en 1897, emitieran fragmentos de átomo, como electrones y todo tipo de “rayos”? Del mismo modo, aunque Darwin había supuesto que los cambios hereditarios (hoy diríamos “genéticos”) en la constitución de los individuos eran siempre pequeños, el redescubrimiento, sobre todo por Hugo de Vries, del trabajo realizado por Gregor Mendel cincuenta años antes sugería que los cambios genéticos espontáneos eran, en realidad, discretos y substanciales. Bajo el liderazgo de Thomas Hunt

Morgan, esta percepción hizo de la Universidad neoyorquina de Columbia la meca de la genética clásica (expresión acuñada en los años sesenta del siglo XX); en los años treinta de la misma centuria, se reconoció que la contradicción entre darwinismo y “mendelismo morganiano” (así dio en llamarse al trabajo de Columbia en la URSS de los cincuenta) no era tan tajante como parecía en un principio.

Nos asombra hoy la manera en que se han resuelto estas y otras contradicciones. La satisfacción que nos produce el siglo XX supera la de 1899. Y qué decir de la sensación de liberación personal que nos han brindado las aplicaciones de la ciencia de los primeros decenios de esa centuria —la emisión por Marconi de ondas de radio a través del Atlántico o el vuelo de una milla de los hermanos Wright, en una máquina más pesada

que el aire (no sin haber construido un primitivo túnel de viento en su taller de Ohio antes de levantar el vuelo). De ahí nacieron las industrias de las comunicaciones y aeronáutica. Nuestros despachos están ocupados por potentes computadoras que nadie anticipó en 1900. Y sólo hay que pensar en la penicilina para ver que gozamos también de mejores condiciones sanitarias.

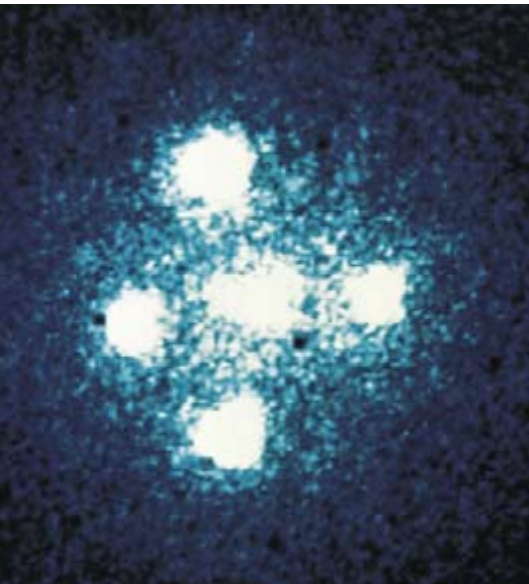
### Lo que sabemos

En lo que respecta a la ciencia fundamental, tenemos tantos o más motivos de orgullo que los que tenía el siglo XIX. La teoría de la relatividad especial es algo más que una versión filosóficamente respetable de la teoría de Newton. La idea de que espacio y tiempo deben abordarse de la misma manera se ha convertido en un criterio crucial de validez de toda teoría fundamental de la física.

Apenas se columbraron los otros tres hitos de la ciencia fundamental del siglo XX. La teoría general de la relatividad de Einstein (1915), que mejor hubiera sido llamarla “teoría relativista de la gravitación”, habría sorprendido a todo el mundo menos a los lectores atentos de Ernst Mach, físico y filósofo positivista vienés. Al proponer que las fuerzas gravitatorias se deben a un campo que alcanza los confines del cosmos, Einstein lanzaba la idea de que la estructura y la evolución del universo estaban ligadas inextricablemente. Pero hasta Einstein se sorprendió cuando Edwin Hubble descubrió en 1929 la expansión del universo.

La mecánica cuántica también apareció como caída del cielo, aunque los científicos llevaron casi medio siglo interesándose por la radiación que emitían los objetos a medida que aumentaba su temperatura. El problema era explicar por qué la radiación dependía de la temperatura de tal forma que la frecuencia privilegiada de emisión era directamente proporcional a la temperatura, medida a partir del cero absoluto (fijado por la termodinámica del siglo XIX en 273 grados Celsius bajo cero). La solución ofrecida por Max Planck en 1900 era que un objeto caliente perdía energía únicamente en cantidades finitas (aunque muy pequeñas) llamadas cuantos. La energía de un cuanto depende de la frecuencia de la radiación; es proporcional a dicha frecuencia. Planck confesó no saber qué significaba ese fenómeno y sospechó que sus colegas andarían no menos desconcertados.

Las dificultades encontradas por Planck sólo se disiparon un cuarto de siglo después, gracias a los esfuerzos de Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac y otras de las mentes más brillantes del siglo. Quién podía imaginar, en 1900, que el trabajo de Planck desembocaría en una nueva mecánica, tan ambiciosa como la de Newton en el sentido de que es aplicable a toda clase



2. Uno de los hitos de la ciencia del siglo XX, la teoría de la relatividad general de Einstein, describe la gravedad como una curvatura del espacio-tiempo, prediciendo efectos como la desviación de los rayos de luz ante la presencia de masas considerables. Esta imagen de lo que se conoce como Cruz de Einstein, obtenida por el Telescopio Espacial Hubble, es un buen ejemplo. Cuatro imágenes de un quásar rodean la imagen central de la galaxia, que actúa como una lente gravitatoria.

de problema bien planteado, pero sólo en el ámbito de los átomos, las moléculas o sus partes constituyentes (electrones y demás).

Todavía hay quien sostiene que la mecánica cuántica está llena de paradojas, pero es ésa una lectura parcial (y con frecuencia maliciosa) de lo que pasó en el primer cuarto del siglo XX. Nuestra comprensión intuitiva del comportamiento de los objetos en el mundo macroscópico (recogida por las leyes de Newton) se basa en la percepción de nuestros sentidos, resultado evolutivo ellos mismos de la selección natural en un mundo en el que evitar objetos macroscópicos (predadores) o capturarlos (alimento) favorecía la supervivencia de la especie. Es difícil imaginar qué ventaja selectiva les habría proporcionado a nuestros antepasados la capacidad de percibir el comportamiento de las partículas subatómicas. La mecánica cuántica no es una paradoja, sino un descubrimiento sobre la naturaleza de la realidad a escalas muy pequeñas, en el tiempo y en el espacio. Esta revelación nos ha permitido comprender la constitución de las partículas nucleares por quarks y componentes parecidos, un avance extraordinario, por provisional que sea.

La tercera sorpresa de la centuria vigésima tiene que ver con el descubrimiento de la estructura del ADN por James D. Watson y Francis Crick, en 1953. No se quiere decir con ello que Watson y Crick desconocieran la importancia de su descubrimiento. A principios de ese decenio resultaba hartamente embarazoso el desconocimiento de la estructura química de los genes, que según la escuela genética de Columbia estaban alineados en los cromosomas. La sorpresa fue que la estructura del ADN no sólo explicaba el mecanismo de la transmisión hereditaria de los caracteres de padres a hijos, sino también por qué las células de todos los organismos sobreviven milisegundo a milisegundo en la forma prescrita para ellas por la selección natural. Se había descorrido el velo del misterio de la vida.

### Lo que ignoramos

La mecánica cuántica y la estructura del ADN han ensanchado el horizonte de nuestra comprensión del mundo, más allá de cuanto sus creadores pudieron imaginar. No es posible saber qué nuevo mundo de la ciencia se esconde bajo esa piedra humilde que alguien levante en los próximos 50 años. A lo sumo, podemos hacer un catálogo de todo lo que ignoramos —que no es poco— y proyectar hacia el futuro las actuales tendencias de investigación. Pero incluso este procedimiento sugiere que la ciencia del próximo medio siglo será tan interesante y asombrosa como la del XX entero. Nuestros hijos y nuestros nietos se maravillarán.

Uno de los logros que tenemos al alcance es la reconstrucción de la historia genética de la especie humana, *Homo sapiens*. A lo largo de los diez últimos años hemos desentrañado

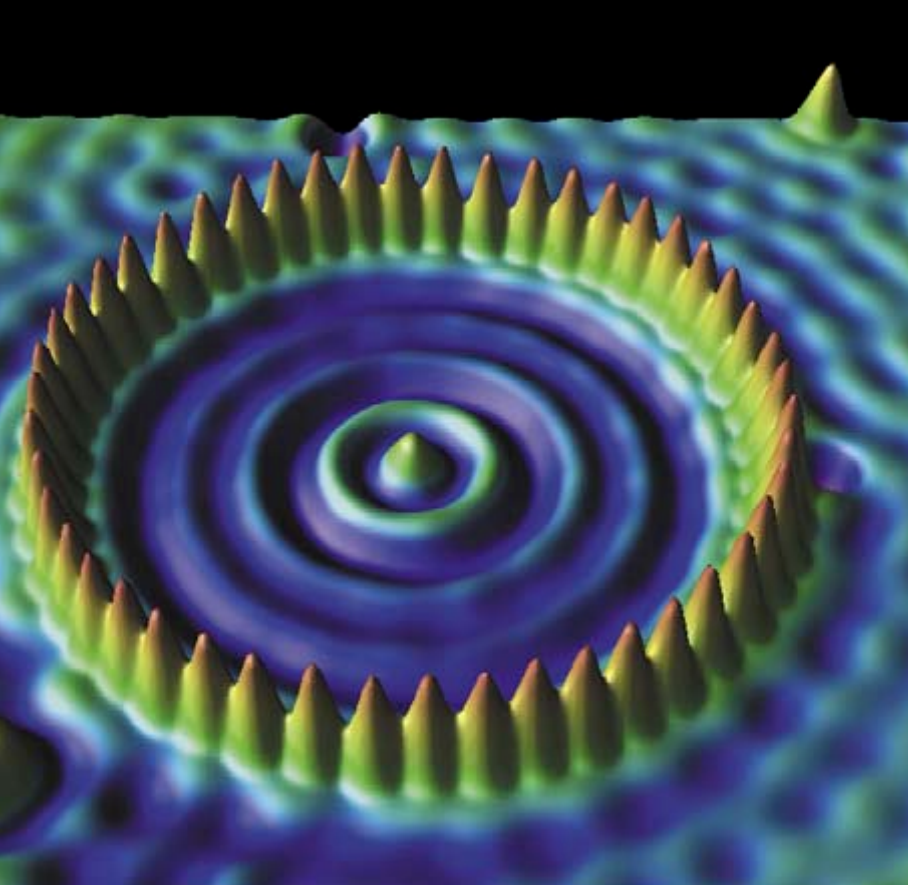
la genética de la ontogenia, la transformación de un embrión fecundado en adulto durante la gestación y la infancia. El plano corporal de animales y plantas se nos ofrece inicialmente cifrado por genes de una familia compartida (genes *Hox*) y, luego, por genes de desarrollo peculiares de cada especie. Aunque los biólogos moleculares siguen intentando averiguar los mecanismos de regulación de la secuencia jerárquica de los genes de desarrollo y los mecanismos de inactivación de los genes que han cumplido su tarea, es sólo cuestión de tiempo el que se ordenen los genes implicados en las sucesivas etapas del desarrollo humano.

Cabrán entonces establecer, mediante la comparación de los genes humanos y los del chimpancé, por ejemplo, cuándo y cómo aparecieron las diferencias cruciales entre los humanos y los primates. El registro fósil nos ha mostrado los aspectos básicos de esta historia. El tamaño del córtex cerebral de los homínidos ha crecido gradualmente a lo largo de los posteriores 4,5 millones de años; los homínidos empezaron a caminar erguidos con *Homo erectus*, hace 2,1 millones de años; y la capacidad de hablar apareció, probablemente, con la Eva mitocondrial hace sólo 125.000 años. Conocer la base genética de estos cambios nos proporcionará una historia más fidedigna de nuestra especie y una comprensión más profunda del lugar que ocupamos en la naturaleza.

Este conocimiento tendrá consecuencias de gran trascendencia. Será posible inferir por qué algunas especies de homínidos, como los Neanderthales, no llegaron a sobrevivir. Lo que reviste mayor interés, la historia genética de *Homo sapiens* nos permitirá contrastar el mecanismo de la especiación o formación de nuevas especies. A pesar del título de la obra maestra de Darwin, *El origen de las especies*, su autor no tenía qué proponer sobre el cruzamiento inviable entre especies diferentes. Sin embargo, la diferencia genética más notable entre los humanos y los primates es que los humanos tenemos 46 cromosomas (23 pares), mientras que nuestros parientes próximos tienen 48. (La mayor parte del material cromosómico ausente parece estar al final del cromosoma humano 2, pero otros fragmentos aparecen en otros lugares del genoma humano, especialmente en el cromosoma X.) Será importante para la biología saber si esta redistribución de los cromosomas fue la causa principal de la evolución humana o si



3. En 1953, el descubrimiento de la estructura del ADN por James D. Watson (a la izquierda) y Francis Crick reveló el secreto de la vida, propiciando avances espectaculares en la medicina y la biología molecular. Su modelo, la doble hélice, se ha convertido en un símbolo universal de la ciencia.



**4. La mecánica cuántica, otro de los grandes logros intelectuales del siglo xx, puso de manifiesto la naturaleza de la realidad a escalas microscópicas. Actualmente podemos manipular y visualizar átomos individuales y ondas cuánticas. Esta imagen de un microscopio electrónico de efecto túnel muestra un “corral cuántico” de 48 átomos de hierro sobre una superficie de cobre que encierra ondas cuánticas de electrones.**

es una mera consecuencia secundaria de una mutación genética.

Los próximos 50 años verán también intensificarse los esfuerzos por identificar las correlaciones genéticas evolutivas. La comparación entre secuencias de aminoácidos de proteínas similares, procedentes de especies emparentadas, o entre secuencias de nucleótidos de ácidos nucleicos relacionadas entre sí —en particular de las moléculas de ARN en ribosomas—, permitirá, en principio, establecer la edad del antepasado común a ambas especies; bastará con saber la cadencia natural de mutación de las moléculas en cuestión.

No será tarea fácil. Las tasas de mutación varían de una proteína o molécula de ácido nucleico a otra, y a lo largo de una misma. La construcción de un “reloj molecular” más fiable es un objetivo cercano. (Ese empeño, aunque más formidable, recuerda el de los cosmólogos por construir una escala de espacio fiable para el universo.) Cuando lo alcancemos, estaremos preparados para aventurar las causas de los grandes puntos de inflexión en la evolución de la vida sobre la Tierra: la evolución del ciclo de Krebs, que permite a todas las células —excluidas las bacterianas— transformar metabolitos químicos en energía, el origen de la fotosíntesis o la aparición de los primeros organismos pluricelulares, que sabemos aconteció hace más de 2500 millones de años.

Con suerte, aprenderemos algo también sobre el papel desempeñado por agentes similares a virus en el alba de la vida. El genoma humano está plagado de secuencias de ADN que parecen fósiles de ácido nucleico pertenecientes a una etapa en la que la información genética

pasaba de una especie a otra con la misma facilidad con la que las bacterias adquieren hoy determinadas propiedades (la resistencia a los antibióticos, por ejemplo) mediante el intercambio de plásmidos, unas estructuras de ADN. No sabremos con exactitud qué lugar ocupamos en la naturaleza hasta que hayamos comprendido el papel evolutivo del ADN aparentemente inútil del genoma humano (la “morralla” de Crick).

Comprender todos los genomas de los que conocemos la estructura completa no nos mostrará, sin más, el origen de la vida como tal. Pero aclarará, probablemente, la naturaleza de los seres vivos en el mundo de ARN que suponemos precedió a la vida de ADN en que estamos sumergidos. Algo debe querer indicarnos el que las células modernas sigan empleando moléculas de ARN para determinadas funciones básicas: la edición de ADN en el núcleo o la construcción de telómeros, estructuras estabilizadoras de los extremos de los cromosomas.

Llegará el día, aunque puede que no sea en los próximos cincuenta años, en que alguien intentará crear un organismo a partir de ARN. Pero el problema del origen de la vida a partir de compuestos inorgánicos requiere un conocimiento del que carecemos; por lo menos desentrañar el mecanismo en cuya virtud el flujo de radiación —así la solar— puede, con el tiempo, inducir la formación de compuestos químicos complejos a partir de compuestos simples. Sabemos que algo parecido ocurre en nubes moleculares gigantes de nuestra galaxia, en las que los radioastrónomos han encontrado compuestos más y más complejos, como en el caso reciente de los fullerenos C<sub>60</sub>. Necesitamos ahondar más en la relación entre complejidad y flujo de radiación, un problema de termodinámica irreversible al que no se ha prestado suficiente atención.

En las últimas décadas los biólogos apenas se han detenido en los aspectos cuantitativos de su trabajo. Su actitud es comprensible si se tiene en cuenta que hay tantos datos interesantes (e importantes) por recoger. Pero hemos alcanzado un punto en el que la comprensión profunda del funcionamiento de la célula y otras cuestiones fundamentales se ve impedida por la simplificación habitual de la realidad en genética y en biología celular, así como por la avalancha de datos que no dejan de acumularse. ¿Simplificación? En genética se habla de la “función” del gen que se acaba de descubrir. Pero, ¿y si la mayoría de los genes del genoma humano, o al menos las proteínas que determinan, tuvieran más de una función o incluso funciones antagónicas? En este caso, la descripción en lenguaje común de los fenómenos celulares sería equívoca o no tendría sentido, a menos que viniera avalada por algún modelo cuantitativo.

Se nos da un ejemplo exasperante en el ciclo de división celular. En los últimos años, no ha pasado semana sin que se descubriera una nueva enzima implicada en el proceso. Identifi-