

EN LOS LIMITES DEL MUNDO FISICO

# INVESTIGACION *y* CIENCIA

SEPTIEMBRE 2000  
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de  
**SCIENTIFIC  
AMERICAN**

**Radiografía de los  
Pirineos**

**La esquiva inteligencia  
extraterrestre**

**Música cristalina**

INFORME ESPECIAL:  
**FRUTOS  
DEL GENOMA  
HUMANO**



## SECCIONES

**4**  
**HACE...**

50, 100 y 150 años.



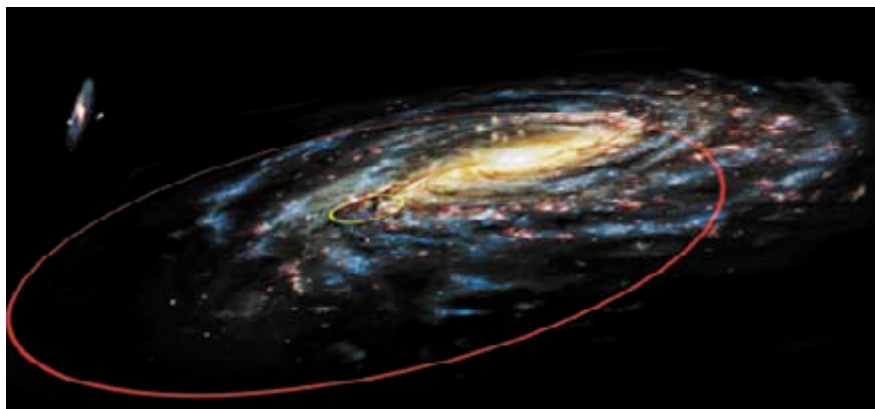
**26**  
**NEXOS**

No es oro todo lo que reluce,  
por James Burke



**28**  
**CIENCIA Y SOCIEDAD**

Curvas y números...  
Demografía...  
Luna, mareas y clima...  
Quiralidad,  
magnetismo y luz...  
Transformación  
de un mosquito.



## LA BUSQUEDA DE VIDA EXTRATERRESTRE

6

**¿Dónde están?**

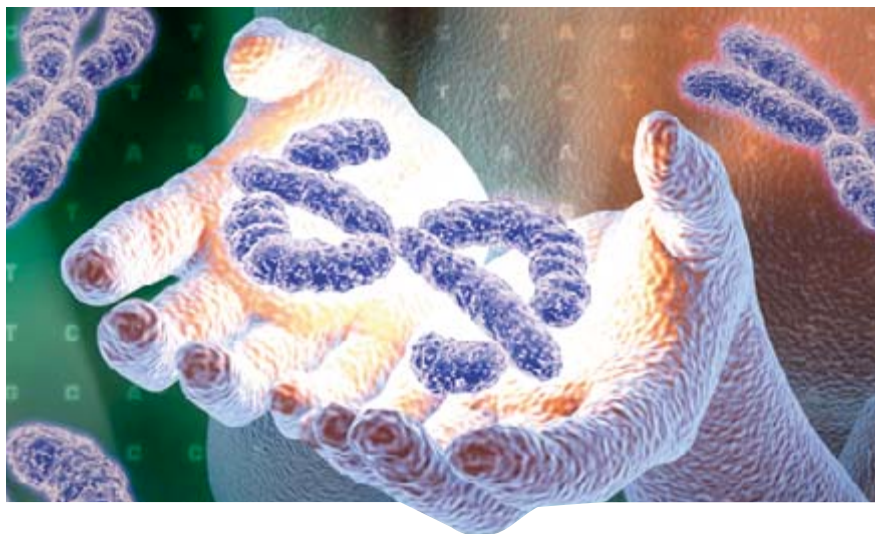
*Ian Crawford*

**¿Donde podrían ocultarse?**

*Andrew J. LePage*

**Comunicación intragaláctica**

*George W. Swenson, Jr.*



## INFORME ESPECIAL: LA INDUSTRIA DEL GENOMA HUMANO

34

**El negocio actual del genoma humano**

*Kathryn Brown*

**La fiebre bioinformática**

*Ken Howard*

**Más allá del genoma humano**

*Carol Ezzell*



18



### Instrumentos musicales de vidrio

*Jean-Claude Chapuis*

Cuando se hace vibrar una lámina de vidrio se obtiene un timbre específico, "cristalino", que ha interesado a muchos compositores. La poca potencia y la fragilidad de los instrumentos así contruidos les han privado de un puesto en las orquestas.

54

### Geotectónica de los Pirineos

*Antonio Teixell*

La colisión entre las placas Ibérica y Eurasiática cerró el mar del que, hace 80 millones de años, surgieron los montes Pirineos. La cordillera actual se sostiene por una profunda raíz cortical que se adentra en el manto terrestre.



66



### El gran colisionador de hadrones

*Chris Llewellyn Smith*

El acelerador de partículas más potente jamás construido pronto hará chocar quarks a una velocidad cercana a la de la luz. Los resultados debieran explicarnos el origen de la masa.

76

### Los revolucionarios puentes de Robert Maillart

*David P. Billington*

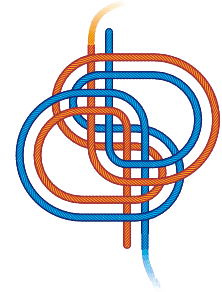
Este ingeniero suizo resolvió un problema que desafiaba al análisis matemático de su tiempo: construir puentes que pudieran soportar enormes pesos y tuvieran arcadas esbeltas.



## SECCIONES

### 84 JUEGOS MATEMÁTICOS

Nudos al desnudo,  
por Ian Stewart



### 86 IDEAS APLICADAS

Escape y supervivencia,  
por Sarah Simpson

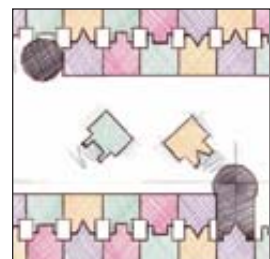


### 88 LIBROS

Técnica y sociedad,  
Entre economía y física

### 94 TALLER Y LABORATORIO

Una receta casera,  
por Shawn Carlson





Portada: Jeff Johnson

## PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Don Dixon
9	Andrew J. LePage
10	Bryan Christie
12	NASA y Space Telescope Science Institute
14-15	Pat Rawlings
16	Slim Films
18-24	Pour La Science
34-35	Julio E. Celis ( <i>izquierda</i> ); Jeff Johnson ( <i>centro</i> ); Science ( <i>derecha</i> ); Laurie Grace ( <i>borde</i> )
36	Sinclair Stammers ( <i>nemátodo</i> ); Andrew Syred ( <i>yeast</i> )
37	Kay Chernush
38	Laurie Grace en colaboración con Eric Lander
39	Alfred Pasiaka ( <i>mosca</i> ); Laboratorio Jackson ( <i>ratón</i> )
40	Slim Films
42-44	Slim Films
45	Laurie Grace en colaboración con Mark Gerstein, Pat Fleming, David Wheeler y Jennifer Vyskocil
47	Raimond L. Winslow, David Scollan y Physiome Sciences, Princeton, N. J.
48	Paul Harrison y Mark Gerstein ( <i>estructura de proteína</i> ); Julio E. Celis ( <i>2-D gel</i> )
49	Jeff Johnson
50	Laurie Grace en colaboración con Thomas Neubert y John Yates; Julio E. Celis ( <i>geles</i> ); PE CORP. ( <i>espectrómetro de masas</i> )
51	Laurie Grace en colaboración con CuraGen
52	Paul Harrison y Mark Gerstein
54-64	Antonio Teixell
66-67	CERN
68	Laurent Guiraud <i>CERN</i>
69	Slim Films
70	Slim Films ( <i>arriba izquierda y abajo</i> ); CERN ( <i>arriba derecha</i> )
71	Slim Films
72	Slim Films ( <i>abajo</i> ); CERN ( <i>arriba</i> )
73	Georges Boixader <i>CERN</i>
75	Matteo Cavalli-Sforza
76-77	Eric A. Soder; Hans Kruck, cortesía de Marie-Claire Blumer-Maillart ( <i>Maillart</i> )
78	Cortesía de Marie-Claire Blumer-Maillart ( <i>fotografía</i> ); Barry Ross ( <i>ilustración</i> )
79	Zurich Maillart Archive ( <i>dibujos</i> ); Cortesía de Canton Graubünden ( <i>fotografía</i> )
80-81	Barry Ross ( <i>arriba</i> ); David P. Billington ( <i>superior izquierda</i> ); Losinger and Co. ( <i>inferior izquierda</i> ); Willy Spiller ( <i>derecha</i> )
82	E. Oberweiler; David P. Billington; FBM Studio Ltd.
83	Barry Ross ( <i>ilustración</i> ); FBM Studio Ltd. ( <i>fotografía</i> )

## COLABORADORES DE ESTE NUMERO

### Asesoramiento y traducción:

Andrés Lewin Richter: *Instrumentos musicales de vidrio*; José M.<sup>a</sup> Valderas Martínez: *Nexos*; Ana M.<sup>a</sup> Rubio: *El negocio actual del genoma humano. La fiebre bioinformática y Más allá del genoma humano*; Ramón Pascual: *El gran colisionador de hadrones*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio e Ideas aplicadas*

### Ciencia y sociedad:

Luis Bou: *Curvas y números y Quiralidad, magnetismo y luz*; José M.<sup>a</sup> Valderas Martínez: *Demografía*; Manuel Puigcerver: *Luna, mareas y clima*; Victoria Laporta: *Transformación de un mosquito*

## 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

MANAGING EDITOR Michelle Press

ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting

NEWS EDITOR Philip M. Yam

SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix

ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler

SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs

EDITORS Mark Alpert, Carol Ezzell, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee,

George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette

PRODUCTION William Sherman

VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh

PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraber

CHAIRMAN Rolf Grisebach

## 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	11.500 pta. 69,12 euro	21.500 pta. 129,22 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 © 2000 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

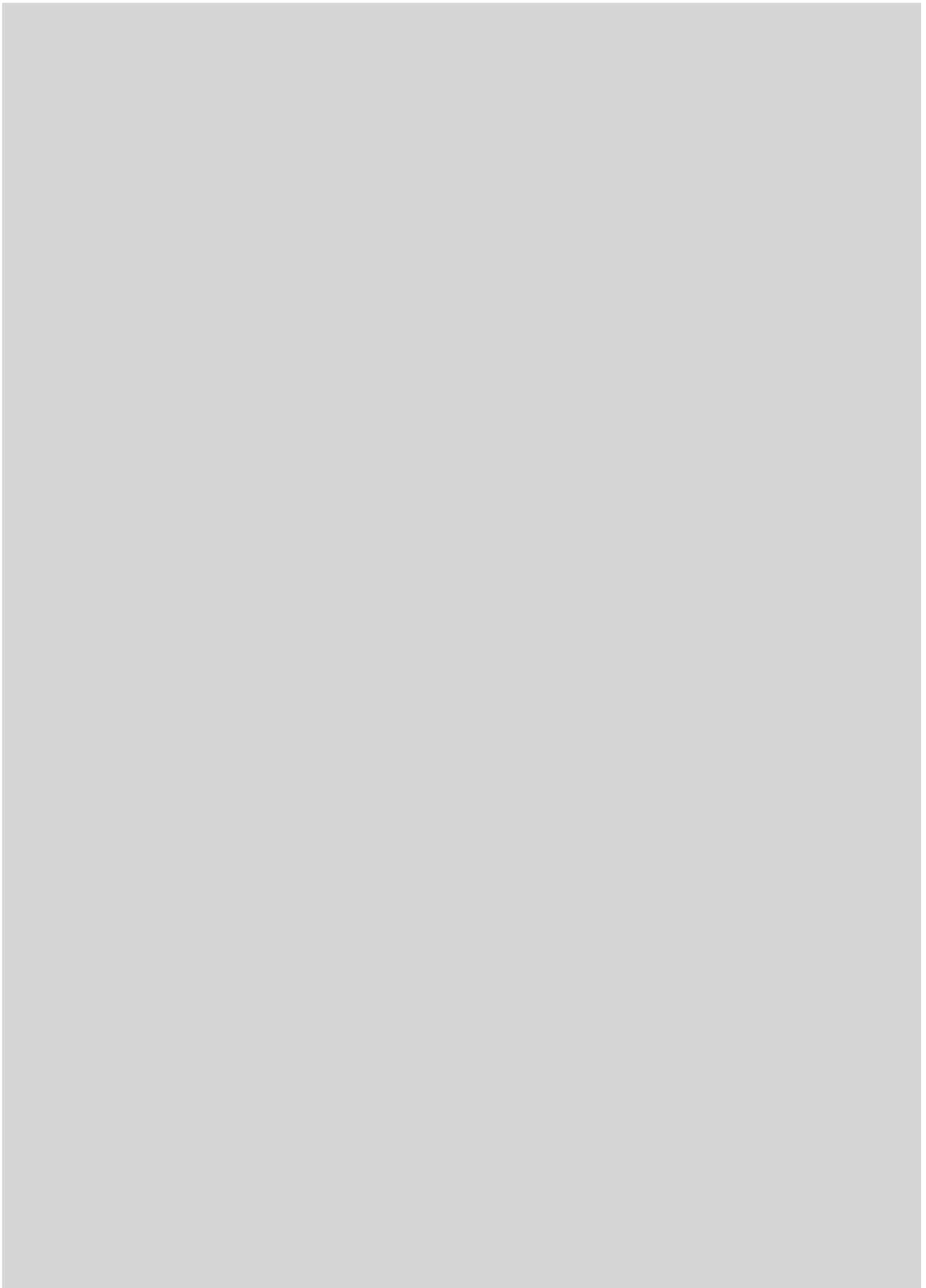
Copyright © 2000 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup> 08021 Barcelona (España)

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 fotogramas reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona  
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



# HACE...

## ...cincuenta años

En septiembre de 1950 *Scientific American* publicó un número extraordinario bajo el título de "La era de la ciencia, 1900-1950", en el que diez destacados investigadores de entonces glosaban la situación de los diversos sectores del conocimiento científico.

**COMENTARIO INICIAL.** «En todos los textos se refleja el doble papel de la ciencia. El propósito y el resultado de la ciencia son el descubrimiento y el conocimiento. Pero también lo son, aunque en un sentido muy diferente, una enorme ampliación de las posibilidades humanas, del poder del hombre para manejar y alterar el entorno en el que vive, trabaja, sufre y muere.» —*J. R. Oppenheimer*, físico teórico y director del Laboratorio Científico de Los Alamos durante la guerra.



J. R. Oppenheimer

**ASTRONOMÍA.** «Ninguna de las preguntas que se les plantean hoy a los aspirantes al doctorado tendría sentido para las luminarias de 1900, que se hubieran sentido desconcertados, indefensos y puede que molestos ante investigaciones referentes a los fotomultiplicadores, a la teoría cuántica, las espículas solares, el ciclo del carbono, la expansión del universo, las capas estelares, los focos radioeléctricos, el reflector Schmidt, Plutón, los rayos cósmicos y otros temas habituales. Pero hay que atemperar el orgullo por nuestros progresos pensando cuán por delante de nosotros se hallará la astronomía del año 2000.» —*Harlow Shapley*, director del Observatorio del Harvard College.



Harlow Shapley

**FÍSICA.** «La diferencia más notable entre la física de 1900 y la de 1950 se resume en la victoria total

de la atomística. Se han hecho realidad las especulaciones de los antiguos filósofos griegos y los sueños de los alquimistas. Frederick Soddy y Ernest Rutherford analizaron por primera vez y con unos instrumentos bastante primitivos los procesos de la desintegración radiactiva, descubriendo que consiste en una serie de transformaciones de unos átomos en otros. Cayó así por tierra la creencia en la invariabilidad de los elementos químicos.» —*Max Born*, premiado con el Nobel de física en 1954.



Max Born

**QUÍMICA.** «El medio siglo que ahora acaba ha visto cómo la química dejaba de ser una gran acumulación informe de conocimientos empíricos para convertirse en una ciencia coordinada. Las nuevas ideas sobre los electrones y los núcleos atómicos se aceptaron rápidamente en química, desembocando en la formulación de una potente teoría estructural, que ha integrado la mayoría de hechos químicos en un sistema unificado. ¿Qué nos traerán los próximos 50 años? Puede esperarse que la química del año 2000 haya conseguido un conocimiento tan penetrante de las fuerzas entre los átomos y las moléculas que sea capaz de predecir la velocidad de cualquier reacción química.» —*Linus Pauling*, premio Nobel de química en 1954 y de la paz en 1962.



Linus Pauling

**GEOLOGÍA.** «Una de las controversias finiseculares más importantes y que aún pervive es la cuestión de la estabilidad de los continentes. La hipótesis de la deriva continental, tan aborrecida hoy por muchos geólogos, todavía no ha pasado a mejor vida, habiendo conseguido nuevos apoyos gracias a los datos acumulados sobre la plasticidad de las profundida-



Reginald A. Daly

des de la corteza terrestre. Los teóricos de la deriva sostienen que, sobre tan débil apuntalamiento, los bloques flotantes de la corteza continental podrían desplazarse muchos miles de kilómetros. Pero hasta ahora nadie ha propuesto una explicación convincente sobre las fuerzas que produzcan tal movimiento.» —*Reginald A. Daly*, profesor emérito de geología en la Universidad de Harvard.

**MATEMÁTICAS.** «Durante los últimos cincuenta años los matemáticos puros se han hecho cada vez más rigurosos, mientras que los aplicados gozan en la práctica de absoluta libertad. Por ejemplo, P. A. M. Dirac de Cambridge introdujo su 'función delta', que tiene la propiedad de tener valor infinito en un punto y nulo en todos los demás, a pesar de lo cual su integral es finita.



Edmund Whittaker

Los aplicados ya la usan de la forma más despreocupada sin incurrir en censuras. Puede que esto sea realmente lo mejor que puede hacerse: háganse primero como sea los descubrimientos, que luego ya se clarificarán lógicamente las cosas.» —*Sir Edmund Whittaker*, uno de los matemáticos más destacados de la primera mitad del siglo XX.

**GENÉTICA.** «El impulso más vivo y profundo del hombre es conocerse a sí mismo y su posición en el universo, sondear su propia naturaleza como organismo vivo y las relaciones entre la herencia y el entorno que conforman su desarrollo corporal y mental. El descubrimiento de las leyes básicas de la herencia es una de las conquistas más



Theodosius Dobzhansky



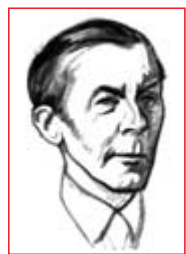
importantes de la ciencia del siglo XX. La genética se ha convertido en la piedra angular de la biología moderna y con seguridad tendrá un papel primordial en las incipientes técnicas de la ingeniería biológica. Ya ha logrado muchos resultados 'prácticos' mediante mejoras de las razas animales y de las variedades de plantas alimenticias.» — *Theodosius Dobzhansky*, uno de los principales estudiosos de las relaciones entre genética y evolución.

**BIOQUÍMICA.** «Un movimiento encabezado a principios de siglo por Jacques Loeb, en EE.UU., y Otto Warburg, en Alemania, estaba convencido de que todos los seres vivos tenían mucho en común. Consecuencia de ello fue que se dejase de lado el estudio exclusivo de los mamíferos como individuos para realizar profundas investigaciones del metabolismo y de la fisicoquímica de las células homogéneas de todos ellos, como huevos de erizos de mar, levaduras, bacterias, corpúsculos sanguíneos, toda célula que pudiera revelar los niveles más fundamentales y universales de los procesos fisiológicos. Mirando hacia el próximo medio siglo, debemos decir claramente que no pueden planificarse ni predecirse los descubrimientos más importantes, que nacen del genio y de la intuición creativa. Las técnicas y la pericia no representan un papel distinto que el que tuvieron cuando Miguel Angel pintó la Capilla Sixtina.» — *Otto Meyerhof*, premio Nobel de fisiología y medicina en 1922.



Otto Meyerhof

**FISIOLOGÍA.** «El interés de la fisiología se orienta en el rumbo de la biofísica y la bioquímica. El avance más espectacular en el estudio de las glándulas endocrinas se produjo con el descubrimiento de la insulina, hormona del páncreas, realizado por F. G. Banting y C. H. West en 1922.



E. D. Adrian

Consecuencia inmediata de él fue la salvación de miles de vidas. La comprensión del impulso nervioso como una reacción 'todo-o-nada' en cada punto de la fibra nerviosa ha centrado la atención en la mem-

brana superficial como mecanismo activador. La membrana nerviosa está viva y parece sufrir cambios sorprendentes, que ya se encuentran al alcance de la experimentación. Si se logra entenderlos, se habrá dominado una de las propiedades más importantes de las células vivas: su capacidad de reaccionar rápidamente a cambios del entorno.» — *E. D. Adrian*, premio Nobel de fisiología y medicina en 1932.

**PSICOLOGÍA.** «El desarrollo de la psicología en el medio siglo pasado muestra tres grandes tendencias. La primera es el alejamiento de los enfoques atomísticos a favor del estudio completo del hombre en su conjunto. Se sabe ahora que los elementos de la experiencia pierden todo su sentido cuando se les separa del propio proceso experiencial. En segundo lugar se tiende a considerar al hombre y a su entorno en combinación y no como datos absolutos independientes. La tercera tendencia a considerar es el regreso de los psicólogos al laboratorio, ahora para estudiar problemas de mucho mayor alcance que los que ocupaban a los psicólogos de principios de siglo.» — *Hadley Cantril*, profesor de psicología en la Universidad de Princeton.



Hadley Cantril

**ANTROPOLOGÍA.** «El logro más importante de la antropología en la primera mitad del siglo XX ha sido la difusión y la clarificación del concepto de cultura, la idea de que los hábitos, las tradiciones, los instrumentos de trabajo y las formas de pensar de una sociedad representan el papel predominante en la conformación del desarrollo de los seres humanos. Lo más destacado de esta ampliación conceptual ha sido el hundimiento de la doctrina del racismo, la



A. L. Kroeber

injustificada hipótesis de la superioridad racial. Se ha aprendido que los logros y las superioridades sociales descansan abrumadoramente sobre los condicionamientos culturales. La ilusión racista deriva de la incapacidad ingenua para distinguir entre los pro-

cesos biológicos fijos y los variables procesos culturales. El nazismo representó su último estallido, desesperado e intransigente, bajo la forma de un movimiento nacional organizado.» — *A. L. Kroeber*, uno de los principales propagadores de la antropología moderna.

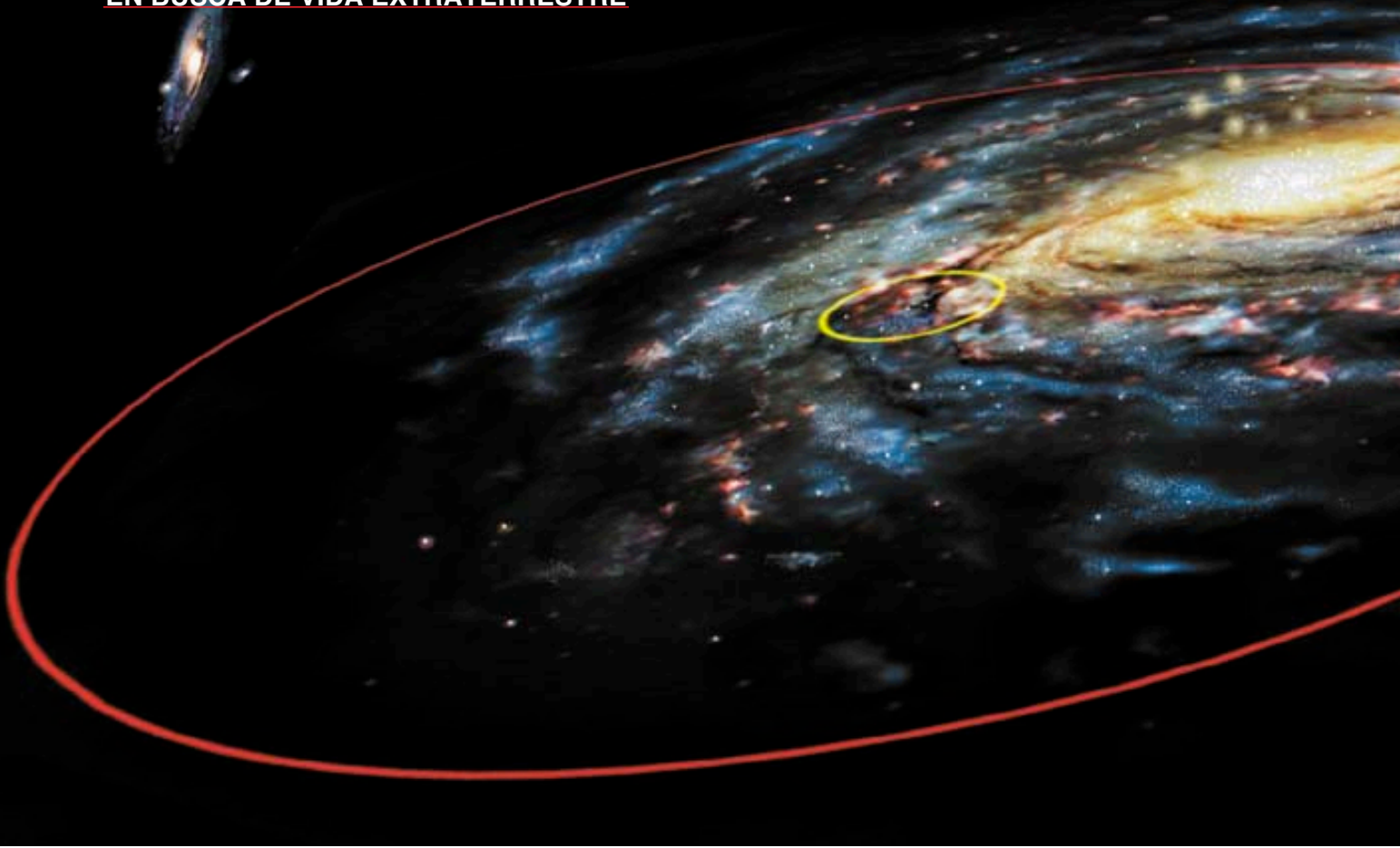
### ...cien años

**FOTOGRAFADO.** «La generalización del proceso de grabado fotomecánico ha producido una revolución en el mundo editorial. Ha cambiado por completo el carácter de numerosas revistas y publicaciones semanales y ahora es posible incluso para los diarios hacer fotografías a media tinta en un tiempo que hace pocos años habría parecido cosa de maravilla. La adopción del proceso a media tinta para la ilustración de periódicos y revistas de categoría significó prácticamente el tiro de gracia para el grabado en madera, que dentro de pocos años puede que no se practique más que en las escuelas de arte.»

**SEDA DE ARAÑA.** «La Escuela Profesional de Tananarivo (Madagascar) está experimentando el empleo del hilo de las arañas productoras de seda (*Nephila madagascarensis*). La 'Hababé' (como los nativos llaman a esa araña) es muy difícil de reproducir, pues la hembra, que es la única que produce el hilo, es tan feroz y voraz que en la mayoría de los casos mata y se come al macho. Las arañas se colocan sobre bastidores en grupos de hasta dos docenas. Las muchachas malgaches tocan el extremo del abdomen de las prisioneras con el dedo y trasladan veinticuatro hilos hasta un gancho, que los unifica, y luego al carrete donde se arrollan.»

### ...ciento cincuenta años

**PISTAS CRIMINALES.** «En el caso del asesinato del doctor George Packman, los huesos del cráneo habían sido calcinados arrojándolos a un horno, cuyas cenizas fueron examinadas. Entre ellas se hallaron dientes artificiales. Se efectuó una encuesta entre los dentistas y el doctor Nathan Keep, afamado especialista del lugar, los reconoció al instante, los colocó sobre su molde y en el acto suministró una importante prueba, pues pocos meses antes los había fabricado él mismo proporcionando un ejemplo destacado del valor de la medicina forense.»



**¿H**abrán otras civilizaciones en el universo? La pregunta ha fascinado durante siglos a la humanidad y, aunque todavía no se le pueda dar una respuesta definitiva, hay datos recientes que han vuelto a ponerla de actualidad. El principal de ellos es la confirmación de que existen planetas fuera de nuestro sistema solar, lo que requirió muchos esfuerzos y varias salidas en falso.

En los últimos cinco años se ha descubierto que son más de tres docenas las estrellas parecidas al Sol que tienen planetas de tamaño semejante al de Júpiter. Aunque todavía no haya aparecido ninguno como la Tierra, se confía en que su número sea cuantioso. Dado que los planetas son necesarios para el origen y la evolución de la vida, estos notables descubrimientos refuerzan ciertamente la generalizada opinión de que la vida se extiende por todo el universo. Los progresos logrados en la comprensión de la historia de la biosfera terrestre respaldan tal creencia, al revelar el ritmo con que aquí se fue asentando la vida. Unas bacterias fosilizadas, descubiertas en 1993 por J. William Schopf en rocas del oeste de Australia de hace 3500 millones de años, son las pruebas directas de vida más antiguas de que se dispone. Estos organismos ya eran bastante avanzados y tendrían que haber pasado por un largo período evolutivo previo. Si el fenómeno vital fuese autóctono de la Tierra, su inicio se produciría hace unos cuatro mil millones de años.

La edad de la propia Tierra no es más que de 4600 millones de años, por lo que el hecho de que la vida apareciera con tal rapidez en la escala de tiempo geológico —probablemente tan pronto como las condiciones

se estabilizaron lo suficiente para hacerla posible— induce a pensar que a la naturaleza no le resultó muy difícil dar este paso. El premio Nobel de bioquímica Christian de Duve ha sido más tajante: “La vida está casi obligada a aparecer... siempre que las condiciones físicas sean parecidas a las que se dieron en nuestro planeta hace unos cuatro mil millones de años.” Por tanto hay buenas razones para creer que toda la galaxia sea un hervidero de vida.

¿Se desprende de ello que abundan también las civilizaciones de gran desarrollo técnico? Son muchos quienes sostienen que, una vez aparecida la vida primitiva, la selección natural guiaría su evolución de modo inexorable hacia la inteligencia y el progreso técnico. Pero ¿ha de ser forzosamente así? La posibilidad de que este argumento fuese erróneo la enunció a bombo y platillo el físico nuclear Enrico Fermi en 1950. Si los extraterrestres son tan corrientes, ¿dónde están? ¿No debería ser obvia su presencia? Tal interrogante se conoce con el nombre de paradoja de Fermi.

El problema realmente tiene dos caras. La una es el fracaso de los programas de búsqueda de inteligencia extraterrestre (SETI) mediante la detección de transmisiones de radio procedentes de otras civilizaciones. La otra es la falta de pruebas claras de que los extraterrestres hayan visitado nunca la Tierra. La primera vez que se analizó en serio la posibilidad de buscar seres extraterrestres por radioastronomía fue en un famoso trabajo de los físicos Giuseppe Cocconi y Philip Morrison, publicado en la revista *Nature* en 1959. Un año después vino la primera búsqueda real, el Proyecto Ozma. Frank D. Drake y sus colegas del Observatorio Nacio-





# ¿Dónde están?

*A pesar de todo, puede que seamos los únicos habitantes de nuestra galaxia*

Ian Crawford

**1. NADA nos llega de los posibles seres foráneos con los que pudiéramos compartir la galaxia. La búsqueda de inteligencia extraterrestre ha explorado, al menos parcialmente, la existencia de transmisores de radio comparables a los terrestres que pudieran distar hasta 4000 años luz de nuestro planeta (círculo amarillo) y civilizaciones avanzadas del llamado tipo I, alejadas hasta 40.000 años luz (círculo rojo). La ausencia de señales comienza a preocupar a muchos investigadores.**

nal de Radioastronomía en Green Bank, Virginia Occidental, se mantuvieron dos años a la escucha para detectar señales de dos estrellas cercanas. Desde entonces se han realizado otros muchos experimentos SETI. Actualmente se encuentran en curso una serie de prospecciones refinadas, dedicadas a inspeccionar toda la bóveda celeste y a explorar centenares de estrellas concretas. Pese a toda esta actividad, nunca se ha conseguido la prueba indubitable de que se haya detectado una señal extraterrestre.

Es indudable que se está en la infancia de los programas SETI y la falta de éxito producida hasta la fecha no puede utilizarse como demostración de que no existan civilizaciones fuera de la Tierra. Hasta ahora las investigaciones no han afectado más que a una pequeña fracción del “espacio paramétrico” —es decir, de la combinación de estrellas objetivo, frecuencias radioeléctricas, niveles de potencia y cobertura temporal que los observadores han de explorar antes de extraer conclusiones definitivas—. Pero los resultados iniciales ya comienzan a establecer ciertos límites interesantes sobre la abundancia galáctica de civilizaciones capaces de transmitir por radio.

La paradoja de Fermi se reafirma al examinar algunas de las hipótesis básicas de SETI, en especial el nú-

mero total de civilizaciones, supervivientes y extintas, que implícitamente supone en nuestra galaxia. Una autoridad en este terreno, Paul Horowitz de la Universidad de Harvard, sostiene que como mínimo ha de haber una civilización radiotransmisora a menos de 1000 años luz del Sol, dentro de un volumen espacial que puede contener algo así como un millón de estrellas del tipo solar. Si esto fuera así, habitarían la galaxia unas mil civilizaciones en total.

Se trata de una cifra importante, por lo que, salvo que tales civilizaciones sean de muy larga duración, habrán surgido y desaparecido muchísimas de ellas durante toda la historia galáctica. (Luego veremos que también plantea problemas el hecho de que su vida fuese realmente larga —es decir, de que lograsen evitar las catástrofes naturales y las autoprovocadas y pudiesen ser detectables con nuestros instrumentos—.) El número de civilizaciones presentes en un momento dado es igual, en términos estadísticos, a su ritmo de formación multiplicado por su tiempo de vida medio. El ritmo de formación puede expresarse aproximadamente por el cociente de dividir el número total de civilizaciones surgidas por la edad de la galaxia, que es del orden de 12.000 millones de años. Si las civilizaciones se formasen a un ritmo constante y viviesen durante un promedio de mil años cada una, tendrían que haber existido algo así como doce mil millones de civilizaciones de refinada técnica en toda la historia de la galaxia para que hoy sobreviviesen mil. Variando los valores adoptados para el ritmo de formación y el tiempo de vida medio se obtienen diferentes estimaciones del número de civilizaciones, pero su magnitud siempre es enorme. Aquí es donde se agudiza la paradoja de Fermi: de entre todos estos miles de millones de civilizaciones ¿no quedarán rastros ni siquiera de una sola?

## Migraciones extraterrestres

El problema fue analizado por primera vez en detalle por el astrónomo Michael H. Hart y el ingeniero David Viewing en documentos separados, publicados ambos en 1975. Más tarde lo estudiaron diversos investigadores, sobre todo el físico Frank J. Tipler y el radioastrónomo Ronald N. Bracewell. Su punto de partida común fue la carencia de pruebas claras sobre visitas de extraterrestres (ET) a la Tierra. Se puede opinar lo que se quiera sobre los OVNI, pero lo que sí es seguro es que la Tierra no ha sido conquistada por una civilización de otro planeta, porque ello habría puesto fin a nuestra propia evolución y hoy no estaríamos aquí para contarlo.

No hay más que cuatro maneras imaginables de conciliar la ausencia de ET con la extendida opinión de que abundan las civilizaciones avanzadas en el universo. Puede que los vuelos espaciales interestelares no sean factibles, en cuyo caso los ET nunca habrían llegado aquí aunque

lo hubieran deseado. Tal vez las civilizaciones ET estén explorando activamente la galaxia, pero no hayan dado todavía con nosotros. También pudiera ser que el viaje interestelar fuese factible, pero que los ET hubiesen decidido no emprenderlo. Y, por último, es posible que los ET actúasen, o que actúen todavía, en las proximidades de la Tierra, pero que no quieran interferir en nuestra vida. Si pudiéramos eliminar, una tras otra, estas explicaciones de la paradoja de Fermi, tendríamos que admitir la posibilidad de que fuésemos la forma de vida más avanzada de la galaxia.

La primera explicación falla claramente. Ningún principio conocido

de la física ni de la ingeniería descarta los viajes espaciales interestelares. Incluso en estos primeros tiempos de la era espacial ya se conciben métodos de propulsión con los que podría alcanzarse del 10 al 20 por ciento de la velocidad de la luz, lo que permitiría llegar a las estrellas más próximas en unos cuantos decenios [véase "Alcanzar las estrellas", de Stephanie D. Leifer, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1999].

La segunda explicación es también problemática por la misma razón. Cualquier civilización que domine avanzadas técnicas de propulsión podría colonizar la galaxia entera en tiempos relativamente cortos, a es-

cala cósmica. Sea, por ejemplo, una civilización que enviase colonos a algunos de los sistemas planetarios más cercanos. Una vez establecidas estas colonias, enviarían a su vez colonias secundarias y así sucesivamente, creciendo exponencialmente el número de colonias. El frente de la onda colonizadora se expandiría con una velocidad determinada por la velocidad de las naves estelares y por el tiempo que cada colonia necesitase para establecerse. Nuevos asentamientos ocuparían rápidamente el volumen de espacio abarcado por este frente de onda (véase la figura 2).

Suponiendo una separación típica de 10 años luz entre colonias, que

## ¿Dónde podrían ocultarse?

*La galaxia parece estar desprovista de civilizaciones superiores, pero otras culturas menos desarrolladas pudieran haber escapado a las exploraciones en curso*

Andrew J. LePage

Ningún programa SETI ha encontrado hasta ahora ninguna señal de radio cuyo origen extraterrestre pudiera comprobarse. ¿Qué significa este resultado nulo? Dado lo incompleto de las búsquedas cualquier respuesta deberá apoyarse en razones de suma validez. Pero puede llegarse a algunas conclusiones preliminares sobre el número y el grado de capacidad técnica de otras posibles civilizaciones.

El canal radioeléctrico más examinado hasta ahora se centra en la frecuencia de 1,42 gigahertz, que corresponde a la raya de emisión del hidrógeno, el elemento más común en el universo; suponiendo que los extraterrestres tuvieran que escoger alguna frecuencia para atraer nuestra atención, parece natural que eligieran ésta. El diagrama de la página opuesta, primero en su género, ilustra exactamente la profundidad con que se ha explorado el universo en busca de señales de esta frecuencia y de otras cercanas. El no haber detectado jamás señal alguna significa que toda civilización foránea posible está fuera del alcance de nuestros instrumentos o no transmite con la potencia suficiente. El resultado nulo descarta, pues, ciertos tipos de civilizaciones, concretamente las primitivas cercanas a la Tierra y las que, aun siendo avanzadas, se encuentren a distancias muy grandes.

El gráfico cuantifica esta conclusión. En el eje horizontal se representan las distancias desde la Tierra y en el vertical la potencia isotropa radiada equivalente (P.I.R.E.) del transmisor. La P.I.R.E. es esencialmente la potencia del trans-

misor dividida por la fracción del cielo que cubre la antena. La P.I.R.E. de un transmisor omnidireccional es igual a la propia potencia del transmisor. El radiotelescopio terrestre más potente del planeta está actualmente en Arecibo, Puerto Rico, que puede utilizarse como sistema radar de haz estrecho con una P.I.R.E. de casi  $10^{14}$  watt.

La P.I.R.E. puede dar una tosca indicación del nivel técnico de una civilización avanzada, según un esquema ideado por el precursor ruso de SETI, Nikolai S. Kardashev, a principios de los años sesenta del siglo XX y que luego amplió Carl Sagan. Las civilizaciones del tipo I serían capaces de transmitir señales de potencia equivalente a toda la energía solar que recibe un planeta como la Tierra, o sea unos  $10^{16}$  watt. Las civilizaciones del tipo II podrían manejar potencias de magnitud similar a la energía total que emite una estrella solar, en torno a los  $10^{27}$  watt. Civilizaciones del tipo III, aún más poderosas, podrían gobernar la galaxia entera, del orden de  $10^{38}$  watt. Si la capacidad de una civilización está comprendida entre tales valores, el tipo que le corresponde se halla interpolando logarítmicamente. Así pues, dada la potencia de salida de Arecibo, la humanidad se clasifica como civilización de tipo 0,7.

Para cualquier combinación de distancia y potencia del transmisor, el diagrama indica qué fracción de las estrellas se ha explorado sin éxito hasta el momento. Las zonas blancas y en color representan las civilizaciones cuya existencia podemos descartar con diversos grados de confianza. La zona

negra corresponde a las civilizaciones que podrían haber escapado a nuestras pesquisas. Esta zona negra va creciendo según se avanza hacia la derecha, es decir, a medida que nos alejamos de la Tierra. Los programas SETI excluyen totalmente las transmisiones de radio al nivel de Arecibo hasta distancias máximas de 50 años luz, más o menos. A distancias más remotas sólo pueden descartarse los transmisores más potentes. SETI falla por completo mucho más allá de la Vía Láctea, porque los movimientos relativos de las galaxias desplazarían todas las señales fuera de la banda de detección.

Estas conclusiones no son irrelevantes. Antes de que se empezase a analizarlo se creía que las civilizaciones de los tipos II y III podrían ser bastante comunes. Pero no es éste el caso, conclusión que concuerda con otros datos astronómicos. A menos que las supuestas supercivilizaciones hubieran eludido milagrosamente la segunda ley de la termodinámica, necesitarían volcar al espacio el calor desechado, lo que quedaría patente en las longitudes de onda del infrarrojo. Pero las investigaciones de Jun Jugaku y sus colegas del Instituto de Investigación de la Civilización, en Japón, no han notado tal calor desperdiciado dentro de un radio de 80 años luz. Suponiendo que las civilizaciones estén esparcidas aleatoriamente, estos resultados imponen también límites a la separación media entre civilizaciones y por ende a su frecuencia de aparición en zonas no sondeadas de la galaxia.

Por otra parte, en la Vía Láctea pudiera haber millones de civilizaciones no detectadas que no fueran más que un poco más avanzadas que la nuestra. Al menos cien civilizaciones del tipo I podrían compartir con nosotros la galaxia. Para complicar aún más las cosas, los extraterrestres tal vez estuvieran utilizando frecuencias diferentes o transmitiendo esporádicamente. Los programas SETI han registrado sin duda

las naves se desplacen al 10 por ciento de la velocidad de la luz y que transcurra un período de 400 años entre la fundación de una colonia y el envío por ésta de otras nuevas colonias, el frente de la onda colonizadora avanzaría a una velocidad media de 0,02 años luz por año. Dado que la galaxia abarca 100.000 años luz, su colonización se habría completado en no más de cinco millones de años. Aunque muy largo en términos humanos, este ámbito temporal no representa más que el 0,05 por ciento de la edad de la galaxia. En comparación con otras escalas cronológicas utilizadas en astronomía y en biología, es práctica-

mente instantáneo. La mayor incertidumbre reside en el tiempo que pueda necesitar una colonia para establecerse y para reproducirse mediante nuevas colonizaciones. Un límite superior razonable podría ser de 5000 años, tiempo que ha tardado la civilización humana en desarrollarse desde los primeros núcleos urbanos hasta los vuelos espaciales. La colonización galáctica total necesitaría en tal caso unos cincuenta millones de años.

La consecuencia es clara: la primera civilización tecnificada que hubiese alcanzado la capacidad y albergado el deseo de colonizar la galaxia podría haberlo hecho antes

de que ninguna otra competidora hubiera tenido la menor oportunidad de evolucionar. En principio esto podría haber sucedido hace miles de millones de años, cuando la Tierra estaba poblada únicamente por microorganismos y se encontraba abierta de par en par a los influjos externos. Pero no hay artefacto físico, rastro químico ni influencia biológica claros que indiquen que tal cosa haya ocurrido nunca. Aun si la Tierra hubiese sido objeto de una siembra deliberada de vida, como especulan algunos, desde entonces volvió a estar completamente sola.

De aquí se infiere que toda tentativa de resolver la paradoja de Fermi ha de apoyarse en suposiciones sobre el comportamiento de otras civilizaciones. Puede que lo primero que hicieran fuera destruirse a sí mismos. También pudieran tener interés en colonizar la galaxia. Quizá sus estrictas normas éticas les prohibieran interferir sobre otras formas de vida primitivas. Muchos investigadores de SETI, y muchas otras personas convencidas de que las civilizaciones extraterrestres tienen que ser numerosas, tienden a rechazar las implicaciones de la paradoja de Fermi apelando sin reservas a una o a varias de estas consideraciones sociológicas.

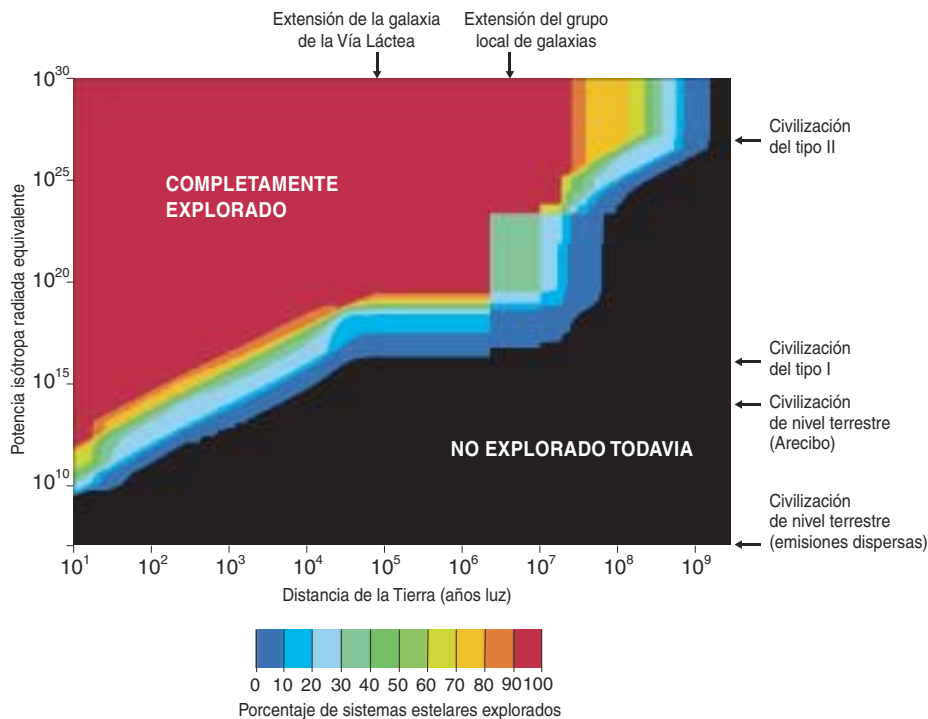
Pero se enfrentan con un problema fundamental. Estos intentos de respuesta no son verosímiles más que si el número de civilizaciones extraterrestres fuese pequeño. Si la galaxia hubiera albergado millones o miles de millones de civilizaciones tecnificadas, parece muy improbable que se destruyeran todas entre sí, que se contentaran con una existencia sedentaria o que admitieran un conjunto común de normas éticas para el tratamiento de formas de vida menos desarrolladas. Y no se necesita más que una civilización técnicamente avanzada para acometer, por las razones que sea, un programa de colonización galáctica. Por supuesto que la única civilización de la que tenemos noticia —concretamente, la nuestra— todavía no se ha autodestruido, da señales evidentes de ser expansionista y no muestra especiales reparos en perturbar a otros seres vivos.

Pese a la inmensidad del empeño, creo que pueden señalarse varias razones por las que un programa de colonización interestelar tiene visos de verosimilitud. Una de ellas es que una especie propensa a colonizar ya gozaría de ventajas evolutivas en su propio planeta de origen, no siendo

numerosos "eventos extraestadísticos", señales demasiado intensas para ser ruido, pero que nunca han vuelto a observarse. Estas transmisiones pudieran ser ondas irregulares procedentes de teléfonos celulares próximos, pero también pudieran ser emisiones extraterrestres intermitentes. Nadie lo sabe todavía. Aunque los avances técnicos aumenten cada vez

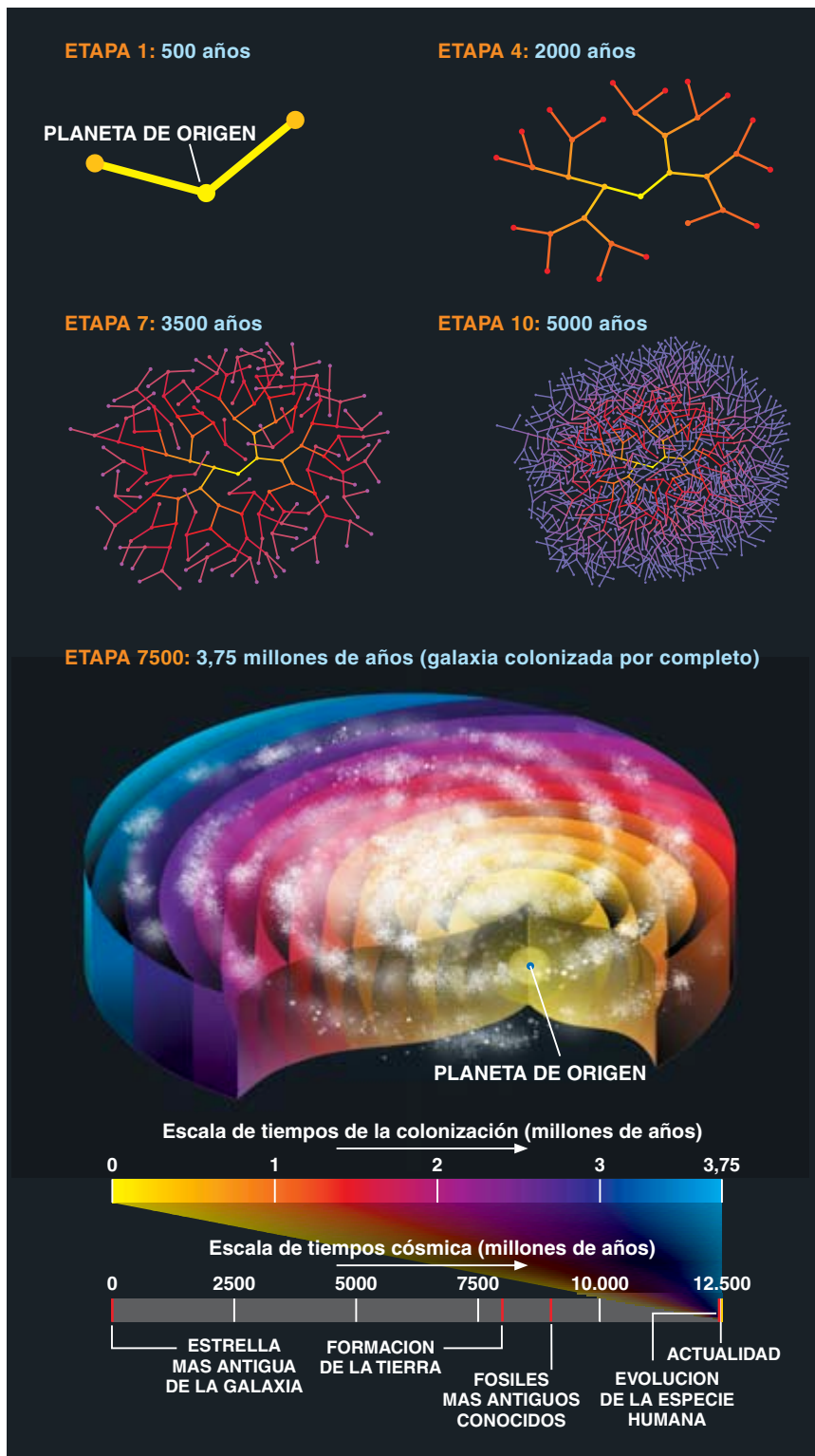
más la capacidad de SETI, no se ha explorado más que una diminuta fracción de las posibilidades existentes.

*ANDREW J. LEPAGE es físico y trabaja en Visidyne, Inc., en Burlington, Massachusetts, donde analiza datos recogidos por sensores remotos situados en satélites. Ha escrito más de treinta artículos sobre SETI y exobiología.*



**LOS RESULTADOS DE LOS PROGRAMAS SETI se resumen en este diagrama.** La zona negra muestra civilizaciones que pudieran haber escapado a nuestras pesquisas radioeléctricas, bien por demasiado lejanas o por no transmitir con intensidad suficiente. Para utilizar el diagrama, se toma una intensidad de transmisión como ordenada y, siguiendo el borde de la zona negra, se halla, como abscisa, la distancia de la Tierra que le corresponde. Por ejemplo, un transmisor de 10<sup>14</sup> watt como el de Arecibo tiene que distar de nosotros más de 4000 años luz para poder escapar a la búsqueda. El código de colores ofrece información más detallada, a saber, el porcentaje estimado de todos los sistemas estelares que han sido examinados en busca de transmisores de potencia igual o superior a una determinada.





2. LA COLONIZACION de una galaxia no lleva tanto tiempo como pudiera pensarse. Los seres humanos iniciarían el proceso enviando colonos a dos estrellas próximas, viaje que podría durar unos cien años con las técnicas pre-visibles. Transcurridos cuatro siglos más para asentarse, cada colonia enviaría por su cuenta dos nuevas expediciones y así sucesivamente. Al cabo de 10.000 años nuestros descendientes podrían habitar todos los sistemas estelares situados a menos de 200 años luz de distancia. Colonizar la galaxia entera llevaría 3,75 millones de años, lo que, en términos cósmicos, es una fracción de segundo. Bastaría con que una sola civilización foránea hubiese acometido tal programa alguna vez para que sus colonias resultasen visibles por doquier.

ría de las civilizaciones ET, en último término todas tendrían un motivo para la emigración interestelar porque ninguna estrella es eterna. Cientos de millones de estrellas como el Sol han consumido su hidrógeno combustible a lo largo de la historia de nuestra galaxia y han terminado sus días como gigantes rojas y como enanas blancas. Si abundaban las civilizaciones en tales estrellas, ¿a dónde habrían ido a parar? ¿Se conformaron con extinguirse?

La aparente rareza de las civilizaciones tecnificadas reclama una explicación, que podría hallarse en el enriquecimiento químico de la galaxia. Toda forma de vida terrestre y también cualquier proceso bioquímico extraterrestre imaginable dependen de elementos más pesados que el hidrógeno y que el helio, sobre todo del carbono, del nitrógeno y del oxígeno, los cuales, producto de reacciones nucleares en las estrellas, se han ido acumulando progresivamente en el medio interestelar en el que se forman las nuevas estrellas y planetas. Sus concentraciones fueron más reducidas en el pasado, puede que demasiado bajas para que surgiese la vida. El Sol cuenta, para su edad, con una relativa abundancia de tales elementos en comparación con otras estrellas de nuestra región galáctica. No cabe excluir que nuestro sistema solar fuese por casualidad el que arrancase en cabeza de la carrera del origen y la evolución de la vida.

Pero este argumento no es tan concluyente como pueda parecer a primera vista. Por una parte, no se conocen las proporciones críticas mínimas de los elementos pesados que requiera el desarrollo de la vida. Si bastara con una décima parte de las

difícil imaginar que esta herencia biológica se transfiriera a la cultura de la era espacial. La colonización podría emprenderse también por razones políticas, religiosas o científicas. Estas últimas parecen ser las más probables si se tiene en cuenta que la primera civilización sometida a evolución estaría, por definición, sola en la galaxia. Todas sus exploracio-

nes SETI resultarían negativas y podría entonces iniciar un programa de exploración interestelar sistemática para hallar una respuesta.

### ¿Se resuelve la paradoja?

Por si fuera poco, pese a todo lo pacíficas, sedentarias o faltas de curiosidad que puedan ser la mayo-