

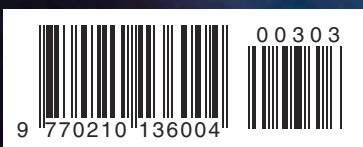
# INVESTIGACION *y* CIENCIA

DICIEMBRE 2001  
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de  
**SCIENTIFIC  
AMERICAN**

## ORIGEN Y CUNA DE LA VIDA

- Degeneración macular
- Internet amenazada
- Veinticinco años de física



## SECCIONES

3

### HACE...

50, 100 y 150 años.

28

### PERFILES

Meave G. Leakey:  
la búsqueda  
de antepasados perdidos.



30

### CIENCIA Y SOCIEDAD

Edad de la piedra  
en los bosques centroafricanos...  
Tratamiento de residuos...  
Avances en inmunología...  
Deslizamientos  
en los Pirineos...  
Barrido selectivo  
de los genes.



36

### DE CERCA

Habitantes de la pradera.



## 66 Deltas de zonas habitadas

Mark Fischetti

Si se produjera un gran huracán que afectara a Nueva Orleans, la ciudad quedaría sumergida bajo seis metros de agua, con miles de pérdidas humanas. Para conjurar el peligro, deben emprenderse gigantescas obras de ingeniería que transformen el sudeste de Luisiana.



4



## La física en el último cuarto del siglo XX

Xavier Roqué

¿Qué es lo más significativo que le ha sucedido a la física en los últimos 25 años? ¿Cuáles son las tendencias en la disciplina y los retos de futuro? ¿Cómo se ve este panorama desde nuestro país? El autor propone algunas respuestas sucintas a estas cuestiones.

## Presente y futuro de los anticuerpos monoclonales

Carol Ezzell

Ideados para curar el cáncer y otras enfermedades, no lograron alcanzar el fin previsto. Las dificultades encontradas podrían subsanarse ahora con prototipos de nuevo cuño.



20



## Alerta roja en la Red

Carolyn Meinel

¿Podría desplomarse Internet? Los ataques de Código Rojo en julio y agosto constituyen un presagio amenazador de guerras cibernéticas entre grupos vandálicos o incluso entre gobiernos.

38



### Circulación vial y telemática

*Steven Ashley*

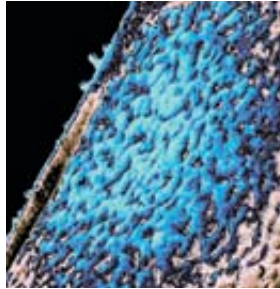
La telemática ha entrado en el coche para adueñarse de todo: partes de tráfico personalizados, mensajes verbales de correo electrónico, juegos de vídeo y un creciente etcétera. Pero, ¿podemos confiar en su seguridad?

44

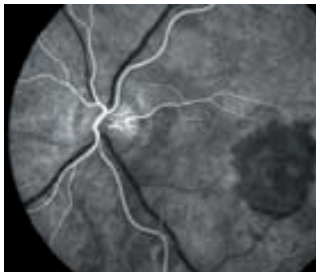
### Hielo y origen de la vida

*David F. Blake y Peter Jenniskens*

El hielo que conocemos en la Tierra es un elemento hostil para la prosperidad de la vida. Pero existe en el espacio una forma exótica del mismo que fomenta la creación de moléculas orgánicas. Quizá sembró las semillas de la vida en nuestro planeta.



50



### Degeneración macular

*Hui Sun y Jeremy Nathans*

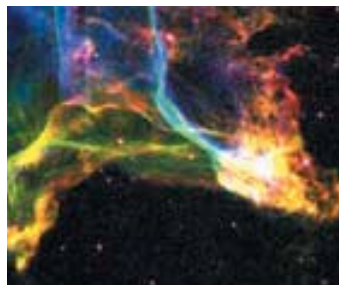
Poco a poco vamos conociendo las causas de este devastador daño ocular que se presenta en la vejez.

58

### La vida en el universo

*Guillermo González, Donald Brownlee y Peter D. Ward*

Sólo una parte de nuestra galaxia reúne las condiciones necesarias para albergar formas complejas de vida.



73



### Luz y evolución vegetal

*Fernando Valladares*

En el curso de la evolución unas plantas se han adaptado a una vida sometida a radiaciones extremas y otras han desarrollado una notable capacidad para acomodarse a la luz del momento.

## SECCIONES

80

### CURIOSIDADES DE LA QUÍMICA

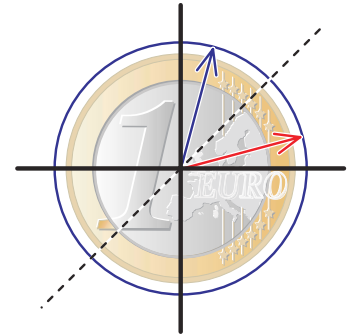
Submarinismo,  
por Roland Lehoucq  
y Jean-Michel Courty



82

### JUEGOS MATEMÁTICOS

Juegos cuánticos,  
por Juan M. R. Parrondo



84

### IDEAS APLICADAS

Ratones y hombres,  
por Mark Fischetti

86

### LIBROS

Optica, 1604-1704...  
Ovario poliúístico.

91

### AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Las coronas del Minotauro,  
por Dennis E. Shasha

92

### INDICE ANUAL





**Portada:** NASA y Hubble Heritage Team

## PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
5	CERN
6	Javier Rodríguez Viejo
7	AIP Emilio Segré Visual Archives
10	Francesc Pi
12-13	Jeff Johnson
15-17	Craig Foster
20-22	Ethan Hill
24	CERT®/Coordination center at the Software Engineering Institute of Carnegie Mellon University
27	Ethan Hill
38-39	NHTSA
41	Delphi Automotive Systems ( <i>arriba</i> ); Ford Motor Company ( <i>abajo</i> )
42	Xplane.com
43	Visteon
45	David F. Blake y Peter Jenniskens, cortesía de <i>Science</i> , vol. 265; 1994, ©AAAS
46	Don Foley
47	Dominic Hart, cortesía de NASA Ames Research Center
50	Imagen alterada por Sara Chen
53	Bryan Christie
54	Jessie Nathans
55	Kevin Langton, Departamento de Oftalmología de la Universidad de Columbia
56	Imagen alterada por Sara Chen
57	Bryan Christie
58	Edward Bell y NASA
61	Don Dixon
62	Sara Chen, fuente: Nuno C. Santos
63	NASA
64	Sara Chen
66-67	Max Aguilera-Hellweg
68-69	Bryan Christie, fuente: L.S.U. ( <i>mapa de fondo</i> ); Don Foley ( <i>mapas de la izquierda</i> ), fuentes: L.S.U. ( <i>inferior</i> ), U.S. Army Corps of Engineers ( <i>centro</i> ); National Geographic Book Division ( <i>sección de Nueva Orleans</i> ); fuente: L.S.U. ( <i>área de detalle</i> )
71	Bryan Christie, fuentes: U.S. Army Corps of Engineers; L.S.U., Louisiana Water Resources Research Institute
74-78	Fernando Valladares
80-81	Pour la Science
84-85	George Retseck ( <i>ilustración</i> ); Bootstrap Institute ( <i>fotografía de Engelbart</i> ); Deanna Horvath, cortesía de Xerox Parc ( <i>ratón de 1981</i> ), Microsoft ( <i>ratones de 1987 y 2000</i> ) y Logitech ( <i>ratón de 2001</i> )
91	Matt Collins

## COLABORADORES DE ESTE NUMERO

### Asesoramiento y traducción:

Antonio Celada: *Presente y futuro de los anticuerpos monoclonales*; Luis Bou: *Alerta roja en la Red y Aventuras problemáticas*; M.ª Rosa Zapatero: *Hielo y origen de la vida y La vida en el universo*; Gilberto V. Rosales: *Degeneración macular*; Juan Pedro Campos: *Deltas de zonas habitadas*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Curiosidades de la química 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

MANAGING EDITOR Michelle Press

ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting

NEWS EDITOR Philip M. Yam

SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix

SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs

EDITORIAL DIRECTOR, ON-LINE Kristin Leutwyler

EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell,

Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson

PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

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.ª  
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.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 © 2001 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2001 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 fotocromos 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

**DIVIÉRTASE CON EL NENE.** «El bebé humano es un sujeto excelente para pruebas de aprendizaje. Con él no hay que recurrir a horarios de comida ni crear cualquier otro estado de privación, pues el cachorro humano puede recibir afirmaciones psicológicas de los eventos ambientales más triviales, sin que necesite el premio de un alimento. Casi cualquier 'retorno' del medio es reforzante mientras no resulte demasiado intenso. Un elemento de refuerzo al que los bebés suelen reaccionar es el encendido y apagado de una lámpara de mesa. Elija cualquier reacción, levantar la mano, por ejemplo. Siempre que el bebé levante el brazo, haga destellar la luz. Al poco tiempo se habrá generado una reacción perfectamente definida. Por cierto, que el niño se habrá divertido.» —B. F. Skinner, profesor de psicología de la Universidad de Harvard.

**SUSTANCIAS FRÍAS.** «Los fluorocarburos, una nueva clase de compuestos químicos muy extensa y prometedora, han pasado de los laboratorios a las fábricas. Ya se producen a toneladas en la planta de Hastings, de la compañía minero-metalúrgica Minnesota. La cualidad más notable de la mayoría de los fluorocarburos reside en su estabilidad extraordinaria; resisten al calor, ácidos, álcalis, insectos y hongos.»

**BOMBAS NUCLEARES DE CAMPAÑA.** «El mes pasado la Comisión de Energía Atómica hizo estallar cinco bombas en su campo de pruebas de Nevada. Los experimentos se proponían recabar información acerca del posible uso táctico de las armas atómicas. En el ejercicio Peña

del Desierto, así se bautizaron los ensayos, participaron efectivos del Ejército. En una de las pruebas, 1200 paracaidistas montaron posiciones de combate en el polígono, se retiraron para la explosión y luego retornaron para recibir lecciones sobre cómo descontaminar los pertrechos que habían dejado en el lugar.»

## ...cien años

**NOVA DE PERSEO.** «El profesor G. W. Ritchey, del Observatorio Yerkes, acaba de facilitar fotografías de la nebulosa tenue que rodea la nueva estrella de Perseo. La medición del negativo indica que la nebulosa se ha expandido un minuto de arco en siete semanas. La celeridad del movimiento es desde luego enorme, mucho más que cualquiera otra conocida hasta ahora dentro del universo. El movimiento de la fuerte condensación de nebulosidad se acerca *al de la luz.*» —Mary Proctor

**COMIDA CON EXOESQUELETO.** «Monsieur Dagin, entomólogo francés, recomienda algunos insectos como artículos de dieta. No sólo se ha leído toda la bibliografía sobre gastronomía insectívora, sino que, además, ha probado perso-

nalmente varios cientos de especies crudas, cocidas, fritas, gratinadas, asadas y picadas. Ha comido incluso arañas, pero no las recomienda. Las cucarachas, dice, hacen una sopa deliciosa. Wilfred de Fonvielle, otro científico francés, prefiere las larvas, que pueden pelarse y comerse como si fueran camarones.»

**BUQUES DE NUEVO DISEÑO.** «Hasta ahora la Armada de los Estados Unidos no había construido un buque que desplazara 14.948 toneladas. El 'Georgia' se cuenta entre los tres de la clase Virginia autorizados el 3 de marzo de 1899. El modelo aceptado, que se muestra en la ilustración, fue precedido por una controversia en el Comité de Construcciones Navales, originada por las objeciones a la torreta superpuesta, en la cual los cañones de ocho pulgadas están montados sobre los cañones de doce pulgadas.»

## ...ciento cincuenta años

**CAZA DE OSOS.** «Un periódico de Montauban (Francia) da cuenta de la captura de un enorme oso empleando cloroformo. Durante mucho tiempo su presencia aterrorizó al contorno. Al amanecer de cierto día, un tal doctor Pegot se acercó con un grupo de campesinos a la caverna donde dormía la fiera. Sobre la entrada tendieron barras de hierro y mantas y el doctor descargó varias veces en el interior de la cueva una jeringa de gran tamaño llena del somnífero. El animal no tardó en caer en un sopor profundo y entonces el doctor se adelantó para hacerse con su trofeo. Es éste el primer caso de captura de un animal salvaje usando cloroformo.»



U.S.S. GEORGIA, acorazado modelo 1901

# La física en el último cuarto del siglo XX

Xavier Roqué

**E**n 1977, John van Vleck, Nevill Mott y Philip Anderson recibieron el premio Nobel de Física por sus trabajos teóricos sobre estado sólido. El perfil de los físicos y la especialidad galardonados eran sintomáticos de los cambios que vivía la física. Si en el caso de van Vleck y Mott se reconocía con cuarenta años de retraso a dos pioneros en la aplicación de la mecánica cuántica al estudio de los metales, la inclusión de Anderson, investigador de AT&T y Bell —el gigante de las telecomunicaciones estadounidenses— dejaba pocas dudas sobre la relevancia de la investigación industrial para la física contemporánea.

El premio consolidaba asimismo a la física del estado sólido como una de las áreas de la física con mayor proyección, capaz de competir en recursos y prestigio con la física de altas energías, buque

insignia de la disciplina en las décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial.

La física del último cuarto del siglo XX iba a estar marcada por una mayor paridad entre las distintas áreas y por el estrechamiento de los vínculos —nada desdeñables al iniciarse el período— con el sector industrial. Es aquí, más que en cualquier revolución conceptual, donde habría que buscar las claves del desarrollo de la disciplina durante este período.

Las teorías de la relatividad y la mecánica cuántica, que proporcionan el armazón básico para comprender el comportamiento de las partículas subatómicas, la luz o las galaxias, datan de la primera mitad del siglo; durante su segunda mitad los esfuerzos de los físicos se centraron en resolver los graves problemas que planteaba la simultaneación de ambas teorías, así como en extender su dominio de aplicación.

Uno de los primeros éxitos se alcanzó en 1949 con la formulación de la electrodinámica cuántica, una teoría cuántica y relativista de las interacciones electromagnéticas. La capacidad predictiva de la electrodinámica cuántica es hoy proverbial, y ha servido de modelo a otras teorías cuánticas de campo.

De hecho, es tal la confianza que inspiran relatividad y cuántica, que algunos físicos han pronosticado el fin de la física, porque cada vez quedarían menos leyes fundamentales por descubrir. Ya en 1929 Paul A. M. Dirac señalaba que, una vez formulada la mecánica cuántica, los físicos disponían “de las leyes físicas necesarias para matematizar la mayor parte de la física y toda la química”, y la única dificultad residual era que la aplicación de estas leyes llevaba “a ecuaciones demasiado complicadas para ser solubles”.

La génesis de la mecánica cuántica relativista resultó mucho más problemática de lo que suponía Dirac, pero aun así el éxito de la electrodinámica cuántica llevó en 1965 a Richard Feynman a reiterar la idea del fin de la física con un símil geográfico: “El descubrimiento de una nueva ley tras otra no puede continuar indefinidamente... Somos afortunados por vivir en una época en la que aún quedan cosas por descubrir. Es como descubrir América, sólo puede hacerse una vez. Estamos asistiendo al descubrimiento de las leyes fundamentales de la naturaleza, y esto no volverá a ocurrir... En el futuro habrá una degeneración de las

## El autor

XAVIER ROQUE (Barcelona, 1965) es profesor titular de Historia de la Ciencia en la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB) y dirige el Centro de Estudios de Historia de las Ciencias de la misma universidad. Licenciado en físicas, se doctoró en historia de la ciencia (UAB, 1993) con una tesis sobre la historia de la electrodinámica cuántica. Ha realizado estancias postdoctorales en la Universidad de Cambridge (1993-1995) y en el Centre de Recherche en Histoire des Sciences et des Techniques, La Villette, París (1996). Su trabajo se ha centrado en la historia de la física del siglo XX, desde el descubrimiento del positrón a las relaciones entre ciencia e industria en el desarrollo de la radiactividad. Entre sus publicaciones destaca la edición, junto con Manuel García Doncel, de *Las ondas electromagnéticas de Heinrich Hertz* (Barcelona: Publicacions UAB y Edicions UPC, 1990). Recientemente ha traducido y prologado una selección de textos de Einstein sobre la teoría de la relatividad (*Albert Einstein. La teoría de la relativitat i altres textos*, Barcelona: ECSA e Institut d'Estudis Catalans; Vic: Eumo, 2000).

*¿Qué es lo más significativo que le ha sucedido a la física en los últimos 25 años? ¿Cuáles son las tendencias en la disciplina y los retos de futuro? ¿Cómo se ve este panorama desde nuestro país? El autor propone algunas respuestas sucintas a estas cuestiones*

ideas, y nos sentiremos como los grandes exploradores cuando los turistas empezaron a invadir los nuevos territorios”.

Recientemente, John Horgan ha esgrimido argumentos similares en *El fin de la ciencia: los límites del conocimiento en el declive de la era científica* (1997), una obra polémica que no se detiene ante la física. Entre las voces que se han alzado contra Horgan se halla la del físico-químico y antiguo editor de *Nature*, John Maddox, quien argumenta en *Lo que queda por*

*descubrir* (1998) que tenemos tan poca idea de lo que nos deparará la física de los próximos 50 años como la que tenían los físicos de finales del siglo XIX sobre las revoluciones relativista y cuántica [véase también “La ciencia del nuevo milenio”, por J. Maddox, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero 2000]. Entonces, la mecánica de Newton y la teoría electromagnética parecían incuestionables y, sin embargo, la física del siglo XX se erigió sobre nuevos cimientos. También la historia, pues, nos hace escép-

ticos ante la idea de que la física vaya a agotarse.

En cualquier caso, el debate sobre los límites de la física no llegó a plantearse con fuerza en las décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial, años de crecimiento para la física gracias al papel desempeñado en la contienda y a su relevancia económica y militar durante la Guerra Fría. Sólo en los años setenta aparecieron signos de fatiga institucional y recesión.

En los Estados Unidos, los movimientos sociales y la crisis ener-



**1. SECCION DEL ACELERADOR LEP, en el CERN, que actualmente se halla reconvirtiendo en el acelerador de partículas más potente del mundo, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), cuya entrada en funcionamiento está prevista para 2006. Una vez el proyecto haya superado las**

**enormes dificultades técnicas y económicas que entraña, los físicos del primer gran laboratorio genuinamente europeo podrán reemprender la búsqueda del bosón de Higgs y confirmar el modelo estándar. En la imagen puede verse uno de los imanes dipolares del futuro acelerador.**



gética dieron paso al primer accidente grave en una central nuclear (Three Mile Island, 1979) y al enjuiciamiento público del complejo académico-industrial-militar que había llevado al país al liderazgo mundial de la disciplina. Las críticas dañaron la imagen pública de la física y mermaron los recursos económicos destinados a ella, que entre 1967 y 1976 se redujeron un 34%. Las repercusiones sobre las expectativas profesionales de los físicos no se hicieron esperar: si en 1970 se habían doctorado más de 1600 físicos, en 1980 apenas llegaron a 900.

La crisis alcanzó también, aunque en menor medida, a los principales países europeos, y pasó casi inadvertida en España. Se trataba, con todo, de una crisis relativa, porque la física partía de una situación extremadamente saneada dentro del conjunto de las ciencias. El tiempo ha borrado el recuerdo de la recesión y hace, en cambio, que destaquen con nitidez los logros alcanzados desde entonces.

Cualquier balance, por somero que sea, debe partir de la física de altas energías (física de partículas, gravitación y cosmología), y es que ya sea por su relación

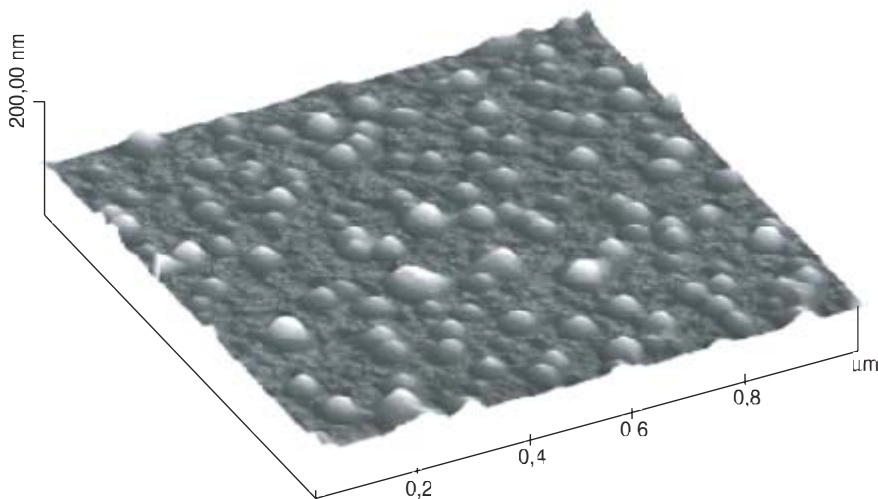
filial con la radiactividad, la física nuclear y el proyecto Manhattan, por la fascinación que ejerce sobre nosotros la exploración del cosmos, o por la proyección personal de científicos como Albert Einstein, Niels Bohr, Feynman o Stephen Hawking, la física de altas energías configuró en gran medida la imagen de la física durante la segunda mitad del siglo XX.

En ese período, el descubrimiento de cientos de nuevas partículas elementales, la búsqueda de un esquema clasificatorio y el análisis de las correspondientes interacciones mediante la teoría cuántica de campos culminó en la formulación del llamado modelo estándar de las partículas elementales. Las aportaciones teóricas más significativas han respondido al sueño de unificar las fuerzas de la naturaleza, que la física del siglo XX ha cifrado en cuatro: la gravitatoria, la electromagnética, la fuerte y la débil.

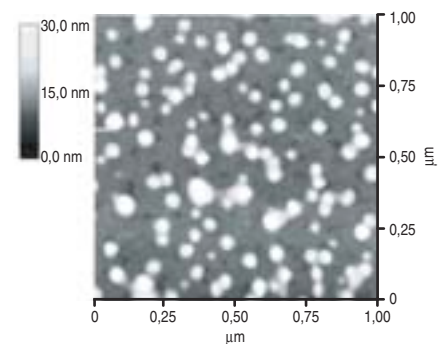
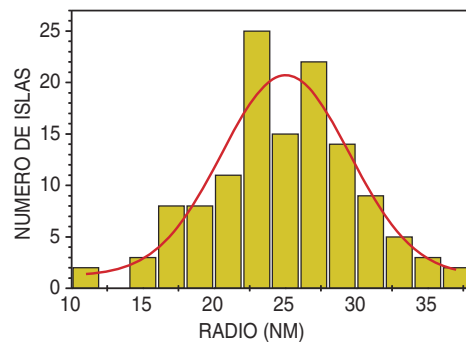
En 1967, Steven Weinberg y Abdul Salam lograron reducir las fuerzas electromagnética y débil a manifestaciones distintas de una misma interacción. Casi al mismo tiempo se introducía el modelo de quarks de las interacciones fuertes, que si

bien no despertó inicialmente demasiado interés, cobró fuerza al iniciarse el período que nos ocupa gracias a la formulación de la cromodinámica cuántica. Ambas teorías describían las interacciones mediante grupos de simetría — $SU(2) \times U(1)$  en el caso de la teoría electrodébil,  $SU(3)$  en el caso de la cromodinámica cuántica—, y en 1974 Howard Georgi y Sheldon Glashow propusieron una teoría unificada, basada en el grupo de simetría  $SU(5)$ . Lo que parecía una quimera teórica no ha dejado de plantear retos experimentales muy considerables, como el que supone confirmar la estimación teórica de la vida media del protón ( $10^{-31}$  años).

Naturalmente, la Gran Teoría Final debiera incluir la gravitación, pero la formulación de una teoría cuántica del campo gravitatorio no está a la vista y supone uno de los problemas más acuciantes de la física actual. La teoría de la gravitación vigente es la teoría de la relatividad general, que desde su formulación por Einstein en 1915 ha superado a cuantos rivales se le han presentado. Si en el período de entreguerras la relatividad general apenas atrajo el interés de los físicos, a partir de los años sesenta la utilización de nuevos ins-



**2. IMAGEN** de islas nanocristalinas de carburo de silicio sobre substrato de  $SiO_2/Si$ , obtenida por un microscopio de fuerza atómica (AFM). Esta imagen topográfica de una superficie a escala atómica resulta del desarrollo de refinados sistemas de representación que no sólo hallan aplicación en la ciencia y técnica de materiales, sino también en la medicina, donde ofrecen nuevas vistas del cuerpo humano (es el caso de la resonancia magnética nuclear). En la gráfica se aprecia bien el tamaño y la distribución de tamaños de las islas de la figura AFM; la imagen inferior derecha corresponde a la misma muestra vista de frente.





trumentos de observación astronómica no ópticos, como el radar, reveló la existencia de extraños cuerpos celestes predichos por la teoría, como los cuásares (del inglés *quasi stellar*) o los púlsares (estrellas de neutrones en rápida rotación que emiten pulsos electromagnéticos periódicos); sin duda el objeto más popular de este género son los agujeros negros, nombre con el que se conoce a una concentración de masa tan densa, que ningún tipo de materia o radiación puede escapar de ella. Los astrofísicos, con todo, siguen construyendo telescopios ópticos cada vez más potentes —entre los que se halla el Gran Telescopio de Canarias, que pronto entrará en funcionamiento— y en la última década han lanzado telescopios espaciales como el Hubble (1990).

La demarcación entre cosmología y física de partículas se difumina a medida que retrocedemos en el tiempo para intentar comprender el origen del universo. Por otro lado, de la fusión entre una de las especialidades más venerables de la física y una de las teorías más revolucionarias del siglo XX ha surgido una nueva subdisciplina, la astrofísica relativista, que ha conocido un auge importante en los últimos decenios.

Nuestro conocimiento de las interacciones fundamentales está directamente relacionado con el tamaño de los grandes aceleradores de partículas. El prestigio alcanzado por la física de altas energías, tras la Segunda Guerra Mundial, garantizó la construcción de estas instalaciones costosísimas, imprescindibles para desentrañar la naturaleza última de la materia. En la última década del siglo, sin embargo, la física de altas energías sufrió un revés de gran valor simbólico: en 1993, el Congreso estadounidense decidió cancelar el proyecto del *Supercolisionador Superconductor* (SSC), un túnel de 83 km de circunferencia que habría acelerado protones a energías cercanas a los 40 teravolt ( $40 \times 10^{12}$  electronvolt).

La muerte del SSC, sin embargo, no supuso el fin de la física experimental de altas energías, porque Europa aprobaba un año después la construcción del Gran

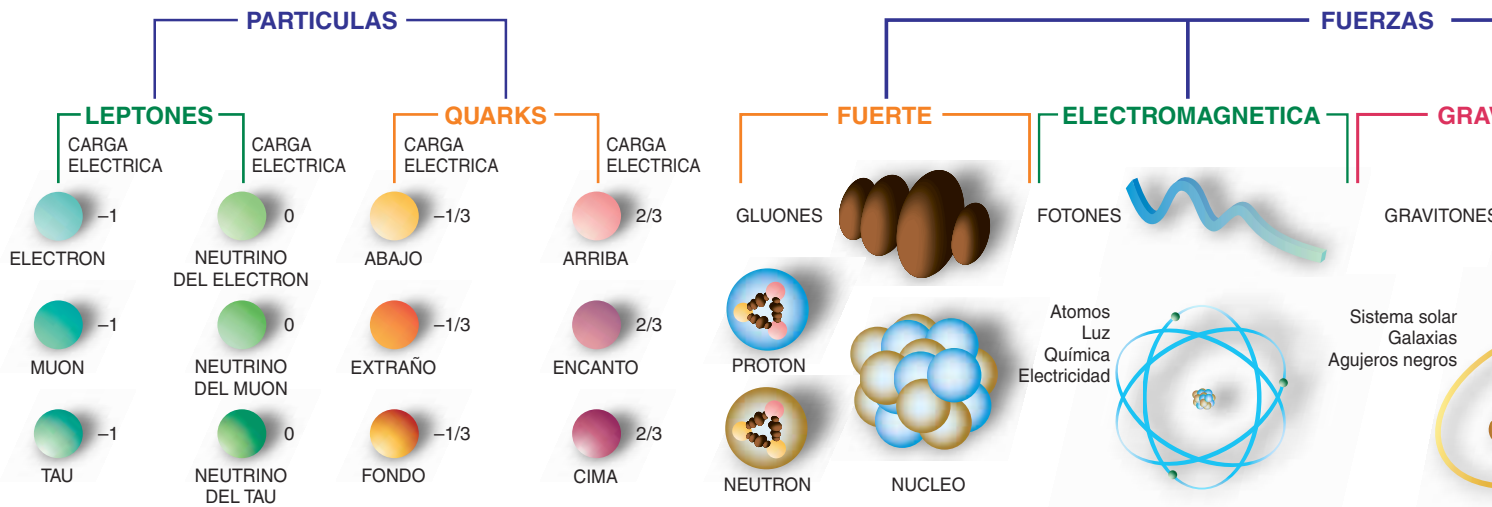


**3. PHILIP WARREN ANDERSON (izquierda) y Paul L. Richards, de los laboratorios Bell, inspeccionando el dispositivo experimental con el que confirmaron la naturaleza mecánico-cuántica de los fenómenos de la superfluidez y la superconductividad y la relación entre ambos (1965). Anderson, que en 1977 recibió el premio Nobel de física junto a John van Vleck y Nevill Mott, representa bien al físico industrial vinculado a la física del estado sólido, que en las últimas décadas del siglo XX se erigió como una de las áreas de la física de mayor proyección.**

Colisionador de Hadrones (LHC), llamado a ser, cuando entre en funcionamiento en 2006, el mayor acelerador del mundo. Para los 45 países que participan en su desarrollo (incluidos los Estados Unidos), el LHC será lo más parecido al “acelerador mundial para la paz mundial” con el que soñaron físicos norteamericanos, soviéticos y europeos en los años sesenta y setenta.

El proyecto LHC está liderado por el CERN, el gran laboratorio europeo de investigación nuclear creado en 1952, en una de las primeras decisiones de carácter cien-

tífico y político para la creación de una Europa unificada. El CERN se ha consolidado desde entonces como un centro de referencia para la especialidad, y cuenta en su haber con diversos hallazgos de gran importancia, como la detección en 1983 de las partículas  $W^{+-}$  y  $Z$ , mediadoras de la interacción electrodébil. (Es el tipo de descubrimiento que lleva directamente al Nobel, en este caso para Carlo Rubbia y Simon van der Meer en 1984, aunque el premio, de carácter personal, se adapta mal al trabajo en equipo característico de la física contemporánea.)



**4. ESQUEMA del modelo estándar de las partículas elementales, que describe los componentes últimos de la materia y las interacciones entre ellos. Según el modelo, la materia está constituida por quarks y leptones (partículas de espín semi-entero, o fermiones). Entre los leptones**

**se hallan el electrón y dos partículas más de carga negativa, cada una de las cuales tiene asociado un neutrino. El modelo estándar describe las interacciones fundamentales entre quarks y leptones a través de la mediación de una partícula de espín entero, o bosón, que determina**

Contra lo que pudiera pensarse, los biólogos moleculares —a principios de los noventa se debatía también la necesidad de financiar el proyecto Genoma Humano— no fueron los únicos beneficiarios de la cancelación del SSC. Entre los oponentes al superacelerador se hallaban varios premios Nobel de física, como Philip Anderson, quien además de considerar que el gasto no estaba justificado, creía que la física de la materia condensada era tan o más ventajosa científica y económicamente que la de altas energías. Además, Anderson cuestionaba abiertamente el reduccionismo de los partidarios más acérrimos del SSC, que hacían del conocimiento de las leyes fundamentales el único fin legítimo de la física, así como la jerarquía disciplinar que situaba la física de altas energías en el vértice, desde el cual podían deducirse cómodamente el resto de leyes y fenómenos.

No le faltaba razón a Anderson, representante de un tipo de física no académica vinculada a la industria de las telecomunicaciones. La física del estado sólido, nacida en los años treinta como un área subsidiaria de la mecánica cuántica, había ido cobrando importancia e independencia gracias en buena parte a su inmenso potencial técnico. No en vano los des-

cubridores del transistor trabajaban para AT&T y Bell, que tenía sólidas razones para investigar la posibilidad de rectificar una corriente mediante un dispositivo más fiable y energéticamente eficaz que las válvulas de vacío usadas hasta entonces. La relevancia de esta especialidad no ha hecho sino aumentar con el tiempo, y de ella dependen buena parte de las técnicas con las que estamos más familiarizados, que incorporan materiales semiconductores y láseres.

El potencial tecnológico de la física está lejos de agotarse. En los últimos años, la idea de un computador cuántico ha tomado cuerpo, y sólo estamos empezando a explorar las posibilidades de la nanotécnica.

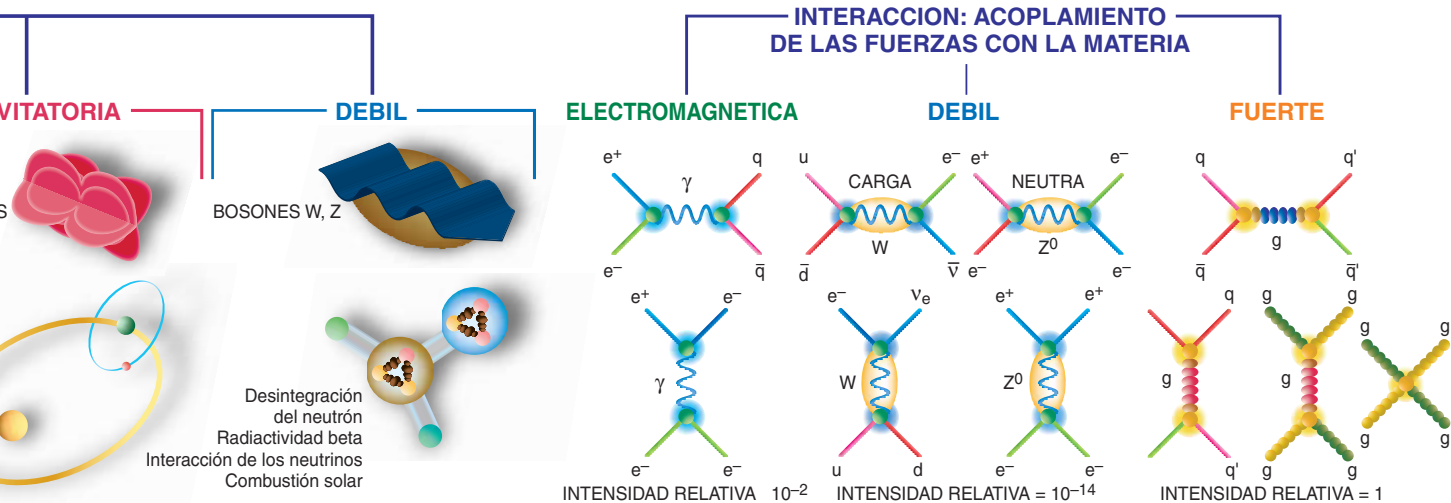
Nuestra revisión, polarizada en torno a dos áreas de indudable importancia, no debiera dejar de lado especialidades aparentemente menores que tienen, sin embargo, un peso específico considerable, como la termodinámica y la mecánica estadística, o la física atómica y molecular. Tampoco hay que olvidar, por último, que la física ha tenido o consolidado en los últimos años numerosos puentes con otras disciplinas, dando lugar en algún caso a nuevas especialidades de importancia creciente, como la biofísica o la física ambiental, o re-

novando subdisciplinas de larga tradición, como la geofísica.

### La física en España

Estos desarrollos han sido seguidos de cerca por los físicos españoles, que en los últimos 30 años han vivido sin duda el período más fructífero para la disciplina desde su constitución como tal, diferenciada de la filosofía natural, a lo largo del siglo XIX. Los esfuerzos de la generación de físicos que, en las primeras décadas del XX, intentó modernizar la física española (Esteban Terradas, Miguel Catalán, Julio Palacios y Blas Cabrera) se vieron truncados por la Guerra Civil, y hay que buscar las raíces de la física contemporánea en España en el franquismo. Se trata de un tema poco estudiado por su inmediatez.

En el caso de la física teórica de altas energías, uno de los más significativos, se invirtió en España el proceso seguido en los países que habían fundado la especialidad, lo que quiere decir que la investigación fundamental llegó de la mano de los usos civiles o militares de la energía nuclear. La Junta de Energía Nuclear, creada en 1951, promovió la formación de los primeros físicos de altas energías e instó el ingreso de España en el



la intensidad relativa de la fuerza. La interacción fuerte da cuenta de la estabilidad de protones, neutrones y está mediada por el gluon. La interacción electromagnética permite entender las fuerzas atómicas y moleculares que rigen las reacciones químicas y el comportamiento de la

luz, y está mediada por el fotón. La interacción débil, mediada por los bosones W y Z, explica la desintegración del neutrón y el origen de la radiación  $\beta$ . No disponemos de un modelo teórico-cuántico de la interacción gravitatoria, que estaría hipotéticamente mediada por el gravi-

CERN en 1961. El abandono del gran laboratorio europeo en 1968 fue desastroso para los físicos experimentales de altas energías, pero no así para los teóricos, que consiguieron del Gobierno la cesión de parte de la cuota anual al CERN y administraron cantidades nada desdeñables a través del GIFT (Grupo Interuniversitario de Física Teórica), un organismo que no llegó a tener existencia legal pero que contribuyó a la modernización de la especialidad mediante el intercambio de profesores y doctorados con el extranjero y la organización de cursos avanzados. Ello explica que en un muestreo realizado en 1981 España ocupara la “segunda división” entre los países con más publicaciones en física de altas energías, junto con India, China, Canadá, Polonia e Israel. En 1983 España volvió a ingresar en el CERN.

En cualquier caso, el salto cualitativo se produjo durante la transición democrática. La física, como otras ciencias, se benefició del aumento significativo en la inversión en ciencia y técnica que tuvo lugar en España entre 1977 y 1992, y se diría que no ha sufrido tanto el estancamiento efectivo de la inversión en los años noventa gracias a los diversos planes nacionales de investigación centrados en la física y a la explotación de los

programas marco de la Unión Europea. Los estudios realizados sobre las publicaciones de los físicos españoles en revistas extranjeras muestran que el número de citas recibidas es comparable a la de los físicos de otros países. Se registra también el predominio de las aportaciones realizadas desde la universidad, que para el período 1986-1988 representaban el 83 % de los artículos sobre física de autores españoles recogidos por la conocida base de datos INSPEC.

La prosperidad relativa de la física y la mejora de nuestra situación internacional no pueden ocultar que seguimos moviéndonos en porcentajes del PIB dedicados a la investigación que no llegan a la mitad de los que dedican las naciones europeas de referencia; tampoco pueden ocultar el hecho preocupante de que los últimos incrementos en el presupuesto de I+D del Estado hayan sido en gran parte absorbidos por programas de defensa de dudoso, cuando no nulo, valor científico. Según un informe elaborado en 1999 por la Cátedra Unesco para la Paz y el Desarrollo de la Universidad Autónoma de Barcelona, el presupuesto general del Estado para el año 2000 preveía un destino militar para el 41 % de los 500.000 millones de pesetas dedicados a investigación y de-

sarrollo, con los que sufragar, entre otras cosas, el desarrollo del avión de combate EF-2000 o la fabricación de los carros de combate Leopard. El presupuesto general del Estado para 2002, recientemente presentado, abunda en esta dirección.

Al margen de la justa administración de unos recursos públicos que, según los investigadores, debieran doblarse con urgencia, la física en España adolece de la falta de conexiones con la industria. La imbricación entre universidad y empresa no debiera limitarse a tareas directamente productivas, sino que debiera incluir el desarrollo de investigaciones originales en un entorno que puede ser tan propicio como el académico, como lo demuestran los laboratorios de empresas como IBM, AT&T o Philips. Aunque para ello se precisa una amplitud de miras que no parece abundar ni entre nuestros empresarios ni entre nuestros dirigentes, demasiado preocupados por el rendimiento a corto plazo.

### Física, cultura y sociedad

Pese a la competencia creciente de las ciencias de la vida, la física ha seguido ocupando durante el período que estamos considerando





**5. PROPAGACION** guiada de luz láser a través de fibras ópticas de materiales plásticos, con el fin de aplicarla en las comunicaciones ópticas. El láser, uno de los fenómenos cuánticos más ubicuos en nuestra sociedad, se halla también en la base del desarrollo de nuevos sistemas de transmisión de la información.

un lugar destacado en las obras de divulgación científica y los medios de comunicación. Cabe recordar series televisivas de éxito como *Cosmos*, de Carl Sagan, o más recientemente *El universo de Stephen Hawking*. Los físicos han protagonizado también obras de teatro como la *Vida de Galileo* de B. Brecht (reescrita en 1945, bajo la impresión causada por el lanzamiento de las bombas atómicas sobre Japón, y que plantea una lectura inequívocamente contemporánea de la condena a Galileo y la servidumbre de la ciencia), *Los físicos*, de Friedrich Dürrenmatt o recientemente *Copenhague*, de Michael Frayn, que trata sobre los dilemas morales de W. Heisenberg y N. Bohr durante la Segunda Guerra Mundial con gran veracidad histórica.

Los físicos han desempeñado también un papel destacado en las llamadas *guerras de ciencia* que han agitado en los últimos tiempos el panorama científico-cultural norteamericano y, en menor medida, el europeo. Un físico, Alan Sokal, protagonizó en 1996 uno de los episodios más conocidos. Con la intención de desenmascarar a filósofos y sociólogos que utilizan conceptos científicos para revestir de autoridad y prestigio a sus escritos, Sokal envió a la revista *Social Text* un artículo delirante, una parodia llena de términos científicos descontextualizados y carentes de sentido. Los editores de la revista aceptaron y publicaron el artículo de Sokal, quien poco después descubría públicamente la farsa y explicaba en *Imposturas inte-*

*lectuales* (1997, con Jean Bricmont) qué había de malo, según él, en la obra de filósofos como Jacques Lacan, Jean Baudrillard, Gilles Deleuze o Félix Guattari, entre otros.

Para muchos, Sokal había acertado al denunciar el uso indiscriminado de conceptos científicos y la falta de rigor de algunos intelectuales posmodernos. Aun así, no hay que olvidar que los abusos han sido propiciados en más de una ocasión por los propios físicos, lo que es especialmente cierto de los creadores de la mecánica cuántica. En un libro oportuno aparecido en 1999, Mara Beller recuerda los intentos de M. Born por extrapolar la noción de complementariedad al ámbito de la política, las conexiones entre cuántica y psicología enunciadas por Bohr, o la dualidad ciencia-religión postulada por Wolfgang Pauli, inspirándose en la dualidad onda-partícula.

Al margen de las responsabilidades que quepa discernir en este caso, lo cierto es que los físicos nunca han dejado de aprovechar las ocasiones para mostrar la significación cultural y social de sus ideas, más allá de su inmediata aplicabilidad técnica. De este tráfico han surgido algunas de las páginas más valiosas de la historia de la disciplina; en última instancia, hay pocas dudas de que resulta beneficioso tanto para la propia física como para la sociedad.

### Bibliografía complementaria

- TWENTIETH CENTURY PHYSICS. 3 vols. Dirigido por Laurie Brown, Abraham Pais y Brian Pippard. American Institute of Physics; Nueva York, 1995.
- ESTADO, CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN ESPAÑA: 1939-1997. Luis Sanz Menéndez. Alianza; Madrid, 1997.
- IMPOSTURES SCIENTIFIQUES. LES MALENTENDUS DE L'AFFAIRE SOKAL. Dirigido por Baudouin Jurdant. La Découverte/Alliage; París, 1998.
- QUANTUM DIALOGUES. THE MAKING OF A REVOLUTION. Mara Beller. The University of Chicago Press; Chicago, 1999.
- QUANTUM GENERATIONS. A HISTORY OF PHYSICS IN THE TWENTIETH CENTURY. Helge Kragh. Princeton University Press; Princeton, 1999.