

ONDAS EN EL OCEANO GALACTICO • DESARROLLO DE ESTOMAS

INVESTIGACION *y* CIENCIA

DICIEMBRE 2005
6,00 EUROS

Edición española de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

MUTACIONES PIONERAS

**NUEVAS DIANAS
FARMACOLOGICAS**

**EL MOVIMIENTO BROWNIANO
SEGUN EINSTEIN**

UNA TIERRA PRIMIGENIA

LOS QUIPUS INCAS

**POLARIZACION
DEL FONDO COSMICO
DE MICROONDAS**



3

HACE...

50, 100 y 150 años.

4

APUNTES

Biología marina...
Física...
Sida...
Objetos cercanos a la Tierra...
Ingeniería genética...
Materia blanda...
Neurobiología.

30

CIENCIA Y GASTRONOMÍA

Menú navideño
dedicado a los químicos.

32

CIENCIA Y SOCIEDAD

Fotofragmentación
de la molécula de deuterio...
Hemocromatosis hereditaria...
La densidad mineral ósea.

38

DE CERCA

Búsqueda de alimento
en un desierto de agua.



6



Ondas en el océano galáctico

Françoise Combes

Las hermosas configuraciones de las galaxias trascienden la estética al resultar esenciales para su crecimiento y evolución.

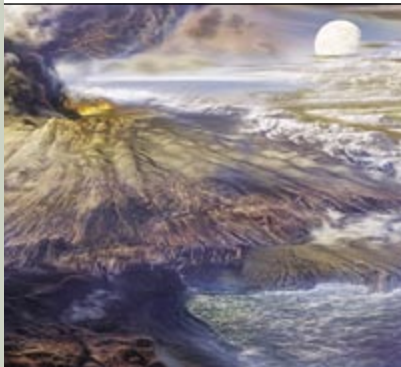
14

Nuevas dianas farmacológicas

Terry Kenakin

El descubrimiento de nuevas formas de modificar la actividad de unos conocidos receptores de la superficie celular amplía el panorama del desarrollo de fármacos.

22



Una Tierra primigenia fría

John W. Valley

Los manuales han venido enseñando que el magma cubrió la Tierra en sus primeros 500 millones de años. Quizá no estén en lo cierto: parece que la superficie se enfrió rápidamente y los océanos, los primeros continentes y las condiciones idóneas para la vida surgieron mucho antes de lo que se creía hasta ahora.

40

Los quipus incas

Loïc Mangin

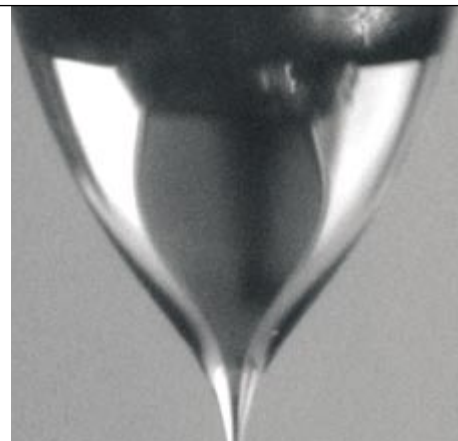
Los libros de contabilidad incas constaban de ristas de cordeles anudados. Su sistema de codificación numérica ya no tiene secreto, pero el contenido literario sigue siendo un enigma.

44

Microchorros y nanochorros

Antonio Barrero, Ignacio González Loscertales, Manuel Márquez

Chorros de diámetro micro y nanométrico ofrecen nuevos métodos para la obtención de micro y nanocápsulas, nanofibras, nanotubos, nanoemulsiones y otras estructuras de interés técnico.



56

Mutaciones pioneras

Dennis Drayna

Un tipo de mutaciones génicas que a menudo causan enfermedades en el hombre permiten seguir la pista de las migraciones y el crecimiento de poblaciones específicas en el transcurso de miles de años.

52

El movimiento browniano según Einstein

Georg Wolschin

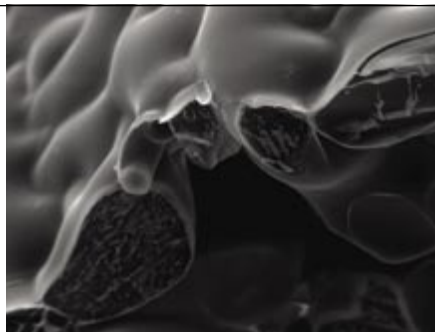
En el año 1905 todavía se discutía si la materia se componía de átomos y moléculas. Albert Einstein no sólo contribuyó a consolidar el concepto de estructura molecular, sino que también dio un nuevo impulso a la física estadística.

64

Desarrollo de estomas

Laura Serna

Los estomas son estructuras epidérmicas distribuidas en patrones regulares y necesarias para el intercambio gaseoso entre la planta y la atmósfera.



72

Polarización del fondo cósmico de microondas

Matthew Hedman

Se buscan los secretos de la dinámica del universo primitivo en el brillo ancestral de la gran explosión.

80

JUEGOS MATEMÁTICOS

Finalmente... sudoku,
por Juan M.R. Parrondo

5	3			7				
6			1	9	5			
	9	8					6	
8				6				3
4			8		3			1
7				2				6
	6					2	8	
			4	1	9			5
				8			7	9

82

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

¿Por qué sube el nivel del agua?,
por Norbert Treitz



85

LIBROS

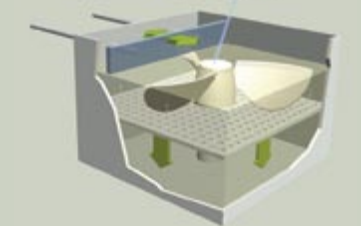
Medicina antigua
Revisada.



90

IDEAS APLICADAS

Prototipado rápido,
por Mark Fischetti



92

INDICE ANUAL

INVESTIGACION CIENCIA

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

PRODUCCIÓN M.^a Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau

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

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

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley,
Graham P. Collins, Steve Mirsky,
George Musser y Christine Soares

PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL
Dean Sanderson

PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER
Gretchen G. Teichgraber

CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.

Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.

Muntaner, 339 pral. 1.^a
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:

MOSAICO COMUNICACION, S. L.
Santiago Villanueva Navarro
Tel. y fax 918 151 624
Móvil 661 472 250
mosaicocomunicacion@yahoo.es

Cataluña:

QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.^a Claret, 281 4.º 3.^a
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.^a Rosa Zapatero: *Ondas en el océano galáctico y Polarización del fondo cósmico de microondas*; Juan Manuel González Mañas: *Nuevas dianas farmacológicas*; Sònia Ambrós: *Una Tierra primigenia fría*; Luis Bou: *Ciencia y gastronomía y Los quipus incas*; I. Nadal: *El movimiento browniano según Einstein*; Felipe Cortés: *Mutaciones pioneras*; J. Vilardell: *Hace..., Apuntes e Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: *Scientific American*

SUSCRIPCIONES

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

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

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

Difusión controlada

Copyright © 2005 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2005 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

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

Printed in Spain - Impreso en España

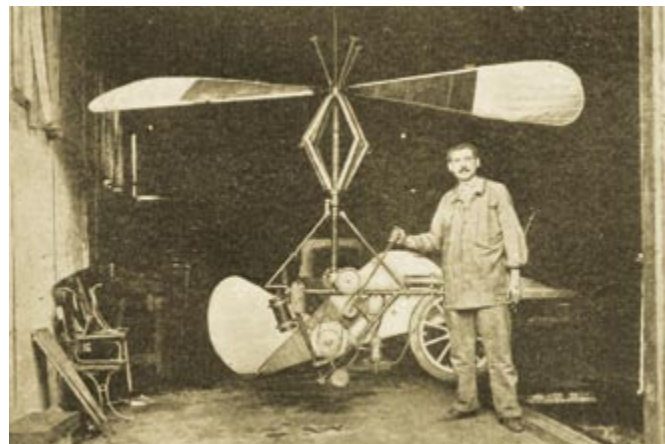
...cincuenta años

AVES EXTRATERRESTRES. «En cuestión de pocos años se dejará ver en el firmamento un objeto nuevo. No resultará muy llamativo. Pero cuando levantemos la cabeza y, al observar atentamente, captemos los pálidos destellos de su fuselaje cruzando el cielo, sentiremos la emoción de estar presenciando un acontecimiento histórico. Pues el minúsculo objeto que circulará por la bóveda celeste será de un metal conocido por el hombre; se tratará de un satélite que el hombre habrá construido con sus manos y lanzado al espacio desde la Tierra. Los satélites que EE.UU. pondrá en órbita con ocasión del Año Internacional de la Geofísica (1957-58) no son aún, desde luego, sino apuntes y bosquejos sobre papel.»

¿CURA O INTOXICACIÓN? «En 1940, un oftalmólogo de Boston se encontró de repente ante una nueva enfermedad que desafiaba su capacidad de diagnóstico, por no hablar de tratamiento. En el curso de sólo unos meses examinó seis casos de bebés que habían perdido la vista por alguna causa desconocida. Hacia julio de 1950, las estadísticas parecían revelar que los niños que desarrollaron una fibroplasia retrolental habían sido tratados por hipoxia, tal como evidenciaba el hecho de que fueron mantenidos un tiempo más prolongado en la cámara de oxígeno. Nadie se había percatado aún de que la administración de oxígeno podría constituir la causa del problema. Cuando en los hospitales se empezaron a exponer a los bebés prematuros a atmósferas altamente oxigenadas en novedosas incubadoras, la emergencia de la fibroplasia retrolental alcanzó proporciones epidémicas. La atmósfera empleada solía contener un 50 por ciento de oxígeno.»

...cien años

LA PRIMERA TRAVESÍA. «Las últimas noticias acerca del capitán noruego Roald Amudsen, según las cuales ha logrado hallar y atravesar el histórico Paso del Noroeste, así como localizar con certeza la posición del polo norte magnético, han suscitado un gran interés en los círculos científicos. La búsqueda del Paso del Noroeste empezó nada más establecerse que América no estaba unida a Asia; parece, sin embargo, que el capitán Amudsen es el primero en abrirse paso por el extremo septentrional del continente. Partió de Noruega el uno de junio de



Ascenso en vertical, helicóptero primitivo, 1905.

1903, en su balandra de 46 toneladas 'Gjoa', con una tripulación de ocho hombres. La 'Gjoa' está invernando cerca de Kay Point, en la isla de Herschel. La notificación sobre la satisfactoria terminación de la expedición se recibió desde Fort Egbaert, Alaska.»

HELICÓPTERO PRIMITIVO. «Dos famosos aeronautas franceses, los señores Louis Goddar y Felix Faure, han experimentado con hélices propulsoras horizontales. Una de éstas, de seis aletas, accionada a pedales mediante un bastidor de bicicleta especialmente aparejado, consiguió una tracción vertical de tres kilopondios. La reducción del número de paletas mejoró los resultados. Con un motor de gasolina de 1,75 caballos, la fuerza de sustentación aumentó enseguida hasta 23 kilopondios. Mediante la adición de una hélice y el empleo de movimiento alternativo, se logró que la máquina llegara a los 100 kilopondios con un consumo de 100 caballos.»

...ciento cincuenta años

COMBUSTIÓN INTERNA. «Sr. Director: Concédame un pequeño espacio en su apreciada revista para comentar que el efecto de percusión de las mezclas explosivas de gas y aire, cuando se inflaman en un motor adecuadamente construido, carecen de la naturaleza peligrosa que ustedes suponen, pues gran parte de las sacudidas que se observaron en el funcionamiento de la máquina resultan de un repentino y violento cierre de las válvulas en el momento del encendido, defecto que será remediado. Han pasado por alto también la posibilidad de emplear como combustible trementina, nafta, aceite de brea y otros hidrocarburos líquidos. Al no haber caldera, el ahorro resulta notable; además, el reducido volumen del depósito para el combustible deja mucho espacio para carga y pasajeros. —Alfred Drake, Philadelphia.» [Nota de la redacción: el motor pionero de Drake empleaba tubos caldeados para encender una mezcla de aire y combustible.]

UNA MALA IDEA. «En una reciente reunión de la Asociación Británica para el Progreso de la Ciencia, Señor Susini presentó una ponencia sobre el valle del Amazonas. Afirma que 'las regiones bañadas por el Amazonas, ganadas a las tribus salvajes, a los animales feroces y a los dañinos reptiles que ahora las infestan, y surcadas por la reja del arado, podrían sustentar a la población del mundo entero.'»

BIOLOGIA MARINA

Un viaje transoceánico

Una hembra de tiburón blanco ha completado un viaje transoceánico de 20.000 kilómetros en nueve meses. El equipo de Ramón Bonfil, de la Sociedad Conservacionista Mundial, radicada en Nueva York, la capturó y marcó frente a las costas sudafricanas en noviembre de 2003. El animal tardó 99 días en llegar al oeste de Australia; en agosto de 2004 estaba de nuevo en aguas africanas. Pasó dos tercios de ese tiempo cerca de la superficie, de lo que se desprende que podría valerse de claves del firmamento para navegar. Con tan asombroso viaje, la hembra batió las marcas conocidas de velocidad en largas distancias para animales marinos. Un desplazamiento así induce a pensar que quizá se crucen poblaciones muy distantes de tiburones blancos. También ha hecho temer que resulte más difícil salvar a esta especie en peligro de extinción: si bien las leyes nacionales la protegen de la pesca en las respectivas aguas jurisdiccionales, en aguas internacionales es vulnerable.

—Philip Yam



Nicole, hembra de tiburón blanco denominada así en honor de Nicole Kidman, ha establecido un récord de velocidad de larga distancia para animales marinos.

FISICA

Movimiento browniano

En un artículo de este mes se explica la fundamental contribución de Einstein a la explicación del movimiento browniano: las partículas suspendidas en un fluido tiemblan por los impactos de las moléculas del fluido. Pero si su idea básica sigue estando vigente, el conocimiento de los detalles no se ha detenido. Einstein supuso que el movimiento browniano era completamente aleatorio. Se venía defendiendo que la inercia del fluido lleva a que las trayectorias de las partículas resulten más predecibles de lo que correspondería a si sólo obedeciesen al azar. Un experimento lo ha confirmado. Para ello, se ha seguido con láseres el movimiento de esferas de vidrio y de plástico de una micra de diámetro, a intervalos de microsegundos y a la escala de los nanómetros. Este conocimiento más preciso del movimiento de las partículas en un fluido tendrá gran importancia para el estudio de la dinámica celular y la construcción de nanoestructuras.

—Charles Q. Choi

SIDA

HIV debilitado

¿Ha perdido virulencia el virus del sida? Tal parece. Se extrajo VIH-1 de pacientes que no habían recibido tratamiento; las muestras iban de 1986 a 1989 y de 2002 a 2003. Tras inocular el virus en sangre y células inmunitarias humanas, se observó que el VIH viejo se reproducía bastante mejor que el procedente de muestras más recientes; también parecía menos sensible a los antirretrovirales. Es posible que VIH-1, la cepa más común del virus en todo el mundo, se haya estado adaptando a los seres humanos a medida que pasaba de un individuo a otro y haya perdido virulencia para prolongar su supervivencia en el hospedador. Uno de los investigadores que han obtenido este resultado afirma que el virus podría dejar de ser letal en 20, 200 o 2000 años; sin nuevos estudios, no se puede decir más sobre el plazo en que podría ocurrir.

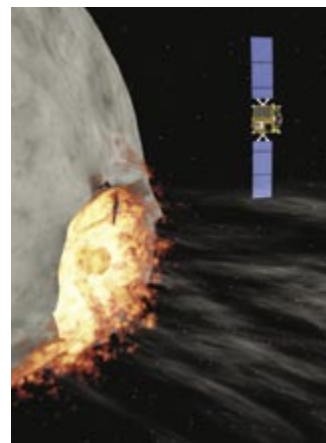
—Charles Q. Choi

OBJETOS CERCANOS A LA TIERRA

Don Quijote en 2002 AT4

La Agencia Espacial Europea ha escogido dos asteroides, 2002 AT4 y 1989 ML, para decidir, más adelante, en 2007, cuál de los dos recibirá en 2011 la misión Don Quijote. El objetivo es ir ensayando la desviación de asteroides, por si algún día hubiera que alejar uno de la Tierra (ninguno de los dos elegidos, de unos 500 metros de diámetro, se acercará a nuestra órbita). La misión enviará dos naves al asteroide elegido. Una de ellas, Hidalgo, de 380 kilogramos de peso, se estrellará contra el cuerpo celeste a unos 48.000 kilómetros por hora. La otra, Sancho, llevará para entonces medio año orbitando alrededor del asteroide. Observará su órbita antes y después del choque, y recogerá los datos de los sismógrafos que dejará sobre la roca.

—Charles Choi



M. MEYER MCM (arriba); ESA/DEIMOS SPACE (abajo)

En la misión Don Quijote, Hidalgo se estrellará contra un asteroide mientras Sancho observa.

INGENIERIA GENETICA

El maíz y los transgénicos

Un artículo aparecido en *Nature* en 2001 desató la polémica al afirmar que cierto maíz modificado genéticamente había acabado dentro del estado mexicano de Oaxaca, donde no debería haber llegado: la gramínea transgénica podría haber invadido los cultivos naturales. La revista se retractaría del artículo un año después por no estar basado en pruebas suficientes. Sin embargo, la investigación ulterior del gobierno mexicano vino a respaldarlo. Ahora, investigadores mexicanos y estadounidenses han analizado unas 154.000 semillas de 870 individuos, procedentes de 125 plantaciones de Oaxaca. Esperaban encontrar una frecuencia de transgénicos de hasta un cinco o un diez por ciento; para su sorpresa, no había ni rastro. Quizás el maíz transgénico no soportase el duro clima de las montañas y las características del suelo donde la variedad local crece, o tal vez hayan tomado los campesinos precauciones extraordinarias al saber que podían introducirse genes indeseados.

—Charles Q. Choi



Maíz en una tienda de Mérida, Yucatán.

MATERIA BLANDA

Arenas movedizas

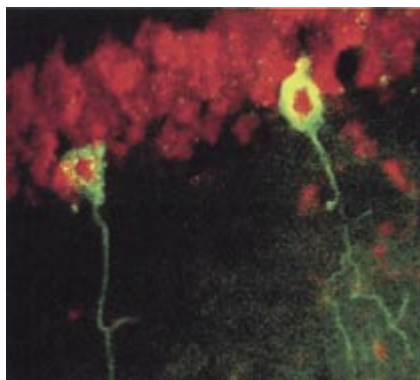
Si se cae en arenas movedizas, se queda atrapado. Si quien ha caído se mueve dentro de las arenas, se hunde más. Pero ¿se puede acabar, como en tantas películas, sumergido bajo la superficie de las arenas? Según un grupo de investigadores de centros franceses y holandeses, no es posible: un ser humano quedará retenido en las arenas movedizas, pero no morirá tragado por ellas. El grupo estudió arenas movedizas naturales, de un lago salado cercano a Qom, en Irán, y otras creadas en el laboratorio. Ambas mezclas constaban de arena, arcilla y sal. Cuando se somete a tensión la mezcla, como cuando se introduce en ella un cuerpo que se mueve, el delicado gel coloidal arcilloso que mantiene firme la arena se desestabiliza —la sal es fundamental para que ocurra tal cosa— y la mezcla se licúa tanto más cuanto mayor sea la tensión,

es decir, el movimiento del cuerpo introducido. Cuesta escapar de ahí porque se segregan una fase acuosa y una fase arenosa; ésta, densamente apretada, viscosa, es la que atrapa con mucha fuerza a la víctima. El grupo simuló el movimiento de un cuerpo en las arenas y midió cómo se hundían entonces bolas de aluminio de dos milímetros. Pese a ser más densas que las arenas en reposo descansaban sobre ellas, pero con un movimiento suficientemente intenso la licuefacción era tan rápida que no daba tiempo a la sedimentación de la arena y las bolas se hundían. Ahora bien, resultaba imposible hundir bolas menos densas que el agua. Y la densidad del agua viene a ser también la densidad de seres humanos y animales: sólo, pues, podrán hundirse a medias en las arenas, pero no quedar sumergidos por completo en ellas.

NEUROBIOLOGIA

De hijo a madre

Las células fetales pueden entrar en la sangre de la madre, donde permanecen, en el caso de los seres humanos, hasta 27 años después del parto. Igual que las células troncales, maduran en células de distintos tipos. En un laboratorio de Singapur, los investigadores han apareado hembras de ratón normales con machos transgénicos para que expresasen una proteína con fluorescencia verde. Hallaron células fetales verdes en los cerebros maternos; hasta una de cada mil, incluso una de cada cien. Allí, las células fetales se transformaron en células que podrían ser neuronas, en astrocitos (que alimentan a las neuronas), en oligodendrocitos (que las aíslan) y en macrófagos (que ingieren gérmenes y células dañadas). Cuando se lesionaron químicamente los cerebros, el número de células fetales que migraron a las zonas deterioradas sextuplicó el que iba a otras partes. No se sabe cómo atraviesan la barrera hematoencefálica que rodea el cerebro e impide la entrada en éste



Las células fetales (verde) de ratón pueden abrirse paso por la barrera hematoencefálica hasta el cerebro de la madre. Los núcleos neuronales están teñidos de rojo.

de la mayoría de los compuestos. Es probable que las células fetales entren también en cerebros de machos y de hembras no preñadas, habida cuenta de que no parece haber grandes diferencias entre sus barreras de capilares y las de las hembras preñadas. De ahí la esperanza de encontrar la forma de tratar enfermedades cerebrales con células fetales o del cordón umbilical sin tener que trepanar el cráneo, tan sólo con inyecciones intravenosas. Se ignora, con todo, si las células que deberían llegar al cerebro no se inyectarían también en otros órganos, ni si eso sería un problema. Se desconoce también si las células fetales entrarían en un cerebro humano con la misma facilidad. El equipo de Singapur planea abordar tejido cerebral postmortem procedente de madres con hijos varones. La presencia del cromosoma Y en el tejido demostraría que el fenómeno ocurre también en los humanos.

—Charles Q. Choi



Ondas en el océano galáctico

Las hermosas configuraciones de las galaxias trascienden la estética al resultar esenciales para su crecimiento y evolución

Françoise Combes



1. LA MAYORIA DE LAS GALAXIAS ESPIRALES, como la galaxia NGC 1097 (*arriba*), presentan un rectángulo central, o "barra", de estrellas. Otras no, como Messier 51 (*página contigua*). Ambos tipos de galaxias espirales están formados por un disco plano y en rotación de estrellas, gas y polvo. Las barras y los brazos son las regiones más densas. A pesar de los avances recientes, la naturaleza y el origen de estas estructuras siguen sin estar claros.

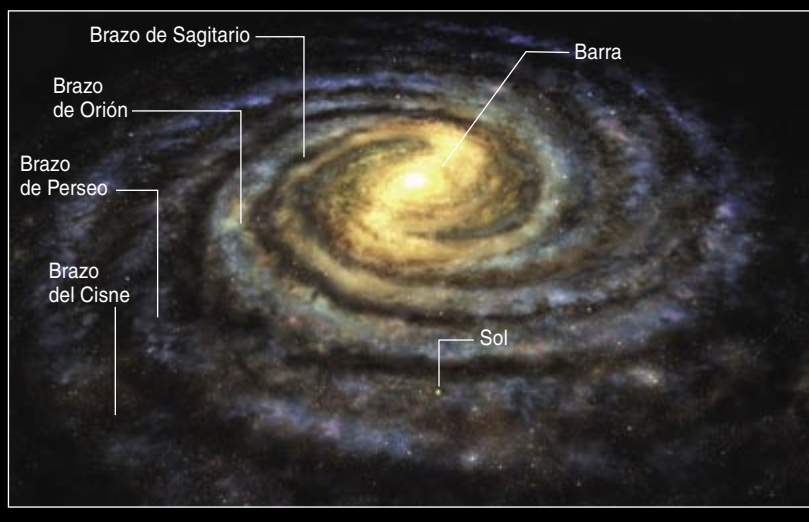
Pocos objetos más bellos habrá en los cielos que las galaxias espirales. Un ejemplo clásico es la galaxia Messier 51, que tanto se parece a un ciclón gigante; uno de sus primeros nombres fue “remolino”. Las estrellas más brillantes de esta galaxia están confinadas en sus “brazos”, como perlas de un collar que girase en espiral alrededor de una gema. Entreveradas en esas sartas de estrellas se extienden oscuras fajas de polvo, que descubren el gas interestelar del que nacen las estrellas. Aunque en Messier 51 y en muchas otras galaxias la espiral nace de una aglomeración central, esférica, de estrellas, en la mayoría de las galaxias espirales arranca de una barra, de un largo rectángulo luminoso de estrellas. Una galaxia barrada se parece a los aspersores giratorios que riegan el césped, donde el agua fluye por un tubo recto, emerge en ángulo recto y se gira entorno.

Suele creerse que nuestra galaxia, la Vía Láctea, es una espiral pura, pero ahora sabemos que se trata de una galaxia barrada. La prueba, en un principio indirecta, fue conformándose a partir de 1975: las estrellas y el gas que hay en medio de la galaxia no siguen las órbitas que les corresponderían si el modelo espiral llegase hasta el núcleo mismo de la galaxia. Las exploraciones más recientes del firmamento en luz infrarroja cercana, que atraviesa las nubes de polvo que impiden ver el centro galáctico, han observado la barra directamente, eliminando cualquier duda.

Las barras y las espirales podrían parecer formas perennes, como un sólido molinete, pero en realidad son dinámicas: ondas que barren el disco de estrellas, gas y polvo y a menudo redistribuyen con violencia el material. Evolucionan, aunque con tal par-

LA BARRA DE LA VIA LACTEA

Se creía que nuestra galaxia pertenecía a la categoría de las galaxias espirales puras, pero hoy sabemos que es una galaxia barrada. En la imagen superior, obtenida por el proyecto cartográfico infrarrojo 2MASS, se observa a la Vía Láctea de canto. El núcleo galáctico está en el centro y los colores representan la intensidad de la luz en tres longitudes de onda del infrarrojo cercano. La galaxia es más gruesa de lo esperado, y el núcleo más extenso y ancho a la izquierda que a la derecha. Estos rasgos nos remiten a una barra girada de 25 a 45 grados con respecto a la visual del centro galáctico, tal y como se muestra en el dibujo (abajo).



simonia, que sólo percibimos una imagen congelada, correspondiente a un instante de sus mutaciones. Esas ondas fueron una de las manifestaciones de un tema repetido en la astronomía del decenio pasado: la asimilación de que ciertas propiedades de las galaxias que parecían inmutables (así, su estructura), sufren grandes cambios con el tiempo. El proceso de metamorfosis mejor conocido es el canibalismo ga-

láctico; en virtud del mismo, la fusión con una galaxia vecina puede convertir una ordenada y tranquila galaxia espiral en una galaxia elíptica sin estructura, donde las estrellas, como las abejas en su colmena, se mueven de manera desordenada. Crece, sin embargo, el convencimiento de que las ondas internas desempeñen una importancia mayor en la evolución de las galaxias.

Resumen/Ondas galácticas

- Desde los años sesenta se sabe que las conformaciones espirales de las galaxias no son estructuras fijas, sino oscilaciones transitorias de la densidad del material. Las estrellas y las nubes de gas se agrupan y separan arrastradas por la coreografía orbital que ellas mismas crean, como si, tras arrojarse una piedra cósmica a la galaxia, se hubiesen generado ondas de movimiento lento.
- Hasta hace muy poco tiempo, se desconocía la razón de aspectos cruciales de estas ondas; por ejemplo, el porqué de los números relativos de galaxias con

una u otra forma. El ingrediente necesario que no se había tenido en cuenta en los modelos era el gas interestelar, que ejerce un efecto desproporcionado para su masa.

- Las ondas transportan momento angular y dan así a la materia la oportunidad de agruparse en el medio de la galaxia; el agujero negro del centro sería uno de los beneficiarios. Las ondas siguen un ciclo que va cambiando la estructura de la galaxia. Estos descubrimientos teóricos están recibiendo el respaldo de observaciones de galaxias tanto lejanas como próximas.

Discos flexibles

Todas las galaxias espirales, barradas o no, rotan; las estrellas giran regularmente alrededor del centro. Pero no rotan como un sólido rígido. Las estrellas no se mueven todas al unísono. En la Vía Láctea, las interiores han girado alrededor del centro miles de veces durante los últimos cinco mil millones de años, mientras que el Sol, alojado en medio del disco, ha completado sólo unas 20 vueltas. Esta rotación variable es incompatible con que barras y espirales constituyan estructuras rígidas. Si fuesen rígidas, se enroscarían rápidamente alrededor del centro, del mismo modo que una cuerda alrededor de un torno.

Durante muchos años, los astrónomos se han preguntado cómo se mantiene la estructura espiral. En los años sesenta, el misterio se resolvió parcialmente con la teoría de las ondas de densidad, de Chia-Chiao Lin y Frank Shu, ambos del Instituto Tecnológico de Massachusetts. Según esa teoría, las barras y los brazos espirales son las “crestas” de las ondas de densidad, donde las estrellas se agolpan temporalmente, como si se tratara de un atasco cósmico. Las estrellas entran y salen de la onda igual que los coches entran y salen del atasco.

La onda espiral misma se debe a la alineación de las órbitas estelares. La órbita de una estrella en una galaxia no se parece a la órbita de un planeta alrededor del Sol o de un satélite en torno a la Tierra, porque la galaxia no está dominada por un cuerpo central. Si bien muchas galaxias poseen un agujero negro central, éste representa sólo una pequeña fracción de la masa galáctica. En general, la parte mayor de la masa galáctica se reparte en un bulbo central extenso; el centro de la galaxia no equivale a una masa puntual. Por ello, las estrellas trazan una especie de rosetón espiral (como los que se dibujan con un espirógrafo): una elipse que no se cierra sobre sí misma, sino que se desplaza cada vez que la estrella completa una revolución. El Sol, por ejemplo, necesita unos 230 millones de años para recorrer su órbita elíptica. Durante ese tiempo, la órbita se desplaza (precesiona) unos 105 grados; por tanto, la elipse del Sol completa una rotación completa una vez cada 790 millones de años.

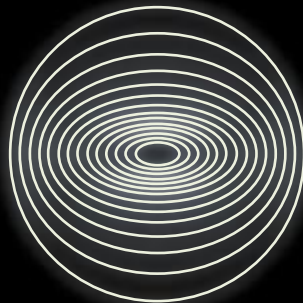
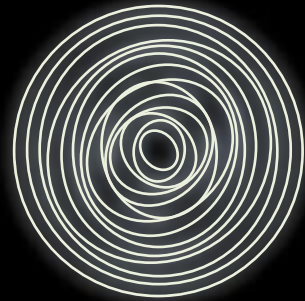
ORDENACION DE LAS ORBITAS

Las barras y las estructuras espirales representan ondas que atraviesan la galaxia. Cuando un frente de onda entra en una región, las estrellas se aproximan unas a otras; cuando la onda se aleja, se separan de nuevo. La onda no empuja directamente a las estrellas; sólo concierne con sutileza sus órbitas.



◀◀◀◀ ROSETONES DE ORBITAS, descritos por estrellas sometidas al complejo campo gravitatorio de la galaxia. Una estrella se mueve alrededor de una galaxia en una elipse, pero la propia elipse también se desplaza. Este segundo movimiento constituye la materia prima de las ondas galácticas.

NO EXISTE MOVIMIENTO ONDULATORIO ▶▶▶▶ cuando las órbitas se orientan aleatoriamente. (Por simplicidad, esta figura presenta sólo una muestra de órbitas, las que aparecen cerradas cuando se las observa desde un sistema de referencia en rotación.)



◀◀◀◀ LA ONDA BARRADA aparece cuando se alinean las órbitas. La gravedad hace que las elipses se muevan al unísono, manteniendo su alineamiento. El frente de onda es la región de mayor densidad estelar, a lo largo del eje mayor de la elipse.

LA ONDA ESPIRAL aparece cuando las elipses se mueven al unísono pero no están perfectamente alineadas; cada elipse se halla ligeramente ladeada con respecto a sus vecinas. La densidad de estrellas es mayor allí donde las elipses se amontonan.



◀◀◀◀ LA ESPIRAL BARRADA surge cuando las órbitas cercanas al núcleo de la galaxia están alineadas, pero las más alejadas se ladean.

Cuando las elipses de las estrellas giran a velocidades muy diferentes, la galaxia no presenta estructura ondulatoria. Las estrellas pasan cerca unas de otras aleatoriamente, para alejarse muy pronto, a la manera en que los automóviles se agolpan en algún instante, incluso en una autopista de circulación fluida. Se produce la onda cuando muchas elipses, si no todas, rotan a la misma velocidad. En una barra, las elipses están alineadas y giran de manera concertada, generando una región de mayor densidad a lo largo del eje mayor. En la onda espiral, las órbitas se desalinean progresivamente, por lo que la región de mayor densidad se curva y crea una espiral.

En resumen, las órbitas estelares se pueden mover al unísono aunque no se comporten así las estrellas mismas. ¿Por qué se sincronizan las elipses? En virtud de una inestabilidad gravitatoria espontánea. Puesto que la gravedad en estos sistemas no es una fuerza externa fija, sino el producto de las propias estrellas, las ondas se pueden retroalimentar. El proceso comienza cuando las órbitas estelares se alinean por casualidad. Amplificada por la proximidad, la gravedad de las estrellas modifica la velocidad de rotación de las elipses. Las más rápidas se frenan y las más lentas se aceleran, hasta que se alcanza una sincronización. Cuando una estrella

penetra en la onda, la gravedad la atrapa sólo temporalmente; pasado un tiempo, queda libre y sale de la onda. Las estrellas que entran por el otro lado de la onda aseguran la supervivencia de la estructura. Los brazos de una galaxia espiral consisten en una densidad local de estrellas más alta debida a la alineación de las órbitas estelares

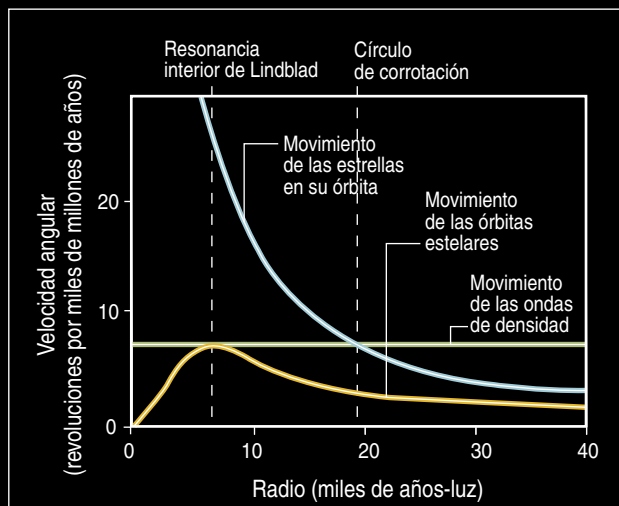
El gas y las ondas

En las regiones interiores de una galaxia las estrellas se mueven más deprisa que la onda y, por tanto, la alcanzan; en las regiones externas, las estrellas son más lentas, por lo que es la onda la que se aproxima por detrás.

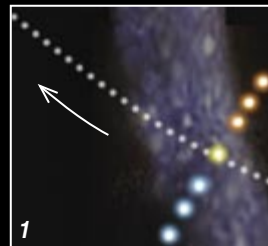
ANATOMIA DE UNA ONDA

Las barras y los brazos espirales recuerdan a la ola que recorre un estadio. Cuando el frente de onda los alcanza, los espectadores actúan de manera coordinada: se levantan y sientan a la vez. Las órbitas estelares de una galaxia se disponen de manera que acercan las estrellas. Las ondas galácticas presentan la complicación adicional de que las estrellas también se mueven.

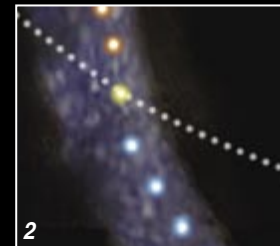
LOS BRAZOS ESPIRALES son una onda captada en un instante de tiempo. En este ejemplo, la onda se propaga en el sentido de las agujas del reloj. Las estrellas también se desplazan en el mismo sentido, pero a una velocidad distinta (*recuadros*). Las estrellas de las regiones interiores se mueven más rápido que la onda. Alcanzan a la onda, se unen a ella durante un cierto período de tiempo y terminan por abandonarla. Las estrellas de las regiones exteriores de la galaxia, en cambio, son más lentas que la onda, que las alcanza por detrás y acaba por superarlas. El círculo de corrotación define la frontera entre las dos regiones. La longitud de los brazos espirales viene fijada por otros dos círculos, que marcan las posiciones de las resonancias de Lindblad, donde la onda y las estrellas se mueven en fase.



LA VELOCIDAD ANGULAR de la onda es constante en toda la galaxia, mientras que la velocidad orbital de las estrellas disminuye con la distancia al centro. Las dos velocidades son idénticas en el círculo de corrotación. Las órbitas de las estrellas no están fijas en el espacio; también giran. Allí donde el ritmo de rotación iguala a la velocidad de la onda se encuentran las resonancias de Lindblad. (Para mayor claridad, la gráfica muestra sólo una resonancia.)



La onda se mueve en el sentido de las agujas del reloj (de abajo arriba y de derecha a izquierda en este recuadro). También las estrellas.



Las estrellas interiores (naranja) se mueven más deprisa que la onda; las estrellas exteriores (azul), más despacio.