

INVESTIGACION *y* CIENCIA

AGOSTO 2000
800 PTA. 4,81 EURO

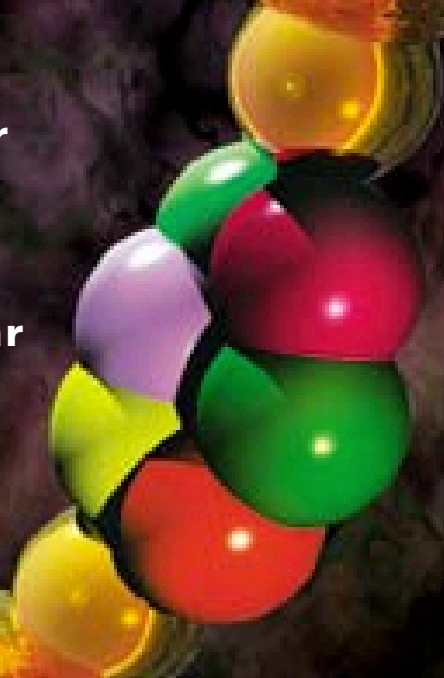
Edición española de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

**Nacimiento
de la electrónica molecular**

Redes intracelulares

Brotos de formación estelar

**Conquista española
y declive de la población
india**



SECCIONES

4

HACE...

50, 100 y 150 años.

30

PERFILES

Paul C. Sereno:
la caza del dinosaurio.



32

CIENCIA Y SOCIEDAD

Análisis de imágenes
y comunidades bentónicas...
Dorsal del Pacífico Oriental...
Matemática...
Gases nobles...
Enfermedad de Huntington...
Lipoproteínas.



40

DE CERCA

Al compás de las estaciones.



**INFORME ESPECIAL:
UN NUEVO TIPO DE GUERRA**

64

La plaga de las armas portátiles

Jeffrey Boutwell y Michael T. Klare

Heridas invisibles

Richard F. Mollica

Los niños del fusil

Neil G. Boothby y Christine M. Knudsen

**Galaxias enanas y brotes
de formación estelar**

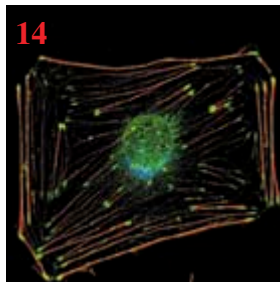
Sara C. Beck

Las galaxias diminutas experimentan en ocasiones brotes espectaculares de formación de nuevas estrellas. Estos brotes estelares facilitan a los astrónomos una visión de la historia más temprana del universo.



6

14



Comunicación intracelular

John D. Scott y Tony Pawson

Con la cartografía de las maravillosas redes de señalización situadas en el interior de nuestras células los biólogos esperan desarrollar nuevas terapias para las enfermedades graves.

22



Los tejidos de los príncipes celtas

Christophe Moulherat

Los tejidos descubiertos en las sepulturas aristocráticas de Europa central revelan la pericia técnica alcanzada por los celtas en el transcurso de la primera Edad del Hierro.

42

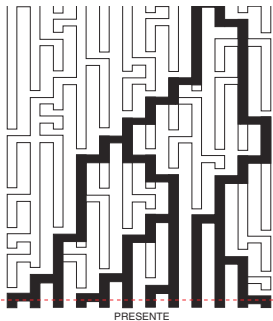
Alimentación y salud de los indígenas en las colonias americanas

Clark Spencer Larsen

Las nuevas técnicas permiten descubrir con fino detalle de qué modo los europeos provocaron el declive de los indígenas americanos en las misiones españolas de *La Florida*.



48



Origen de los amerindios

Sergio D. J. Pena y Fabrício R. Santos

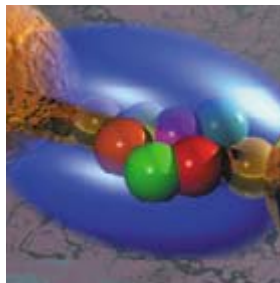
Los estudios con marcadores genéticos del cromosoma Y han demostrado que los Amerindios comparten un cromosoma fundador, cuyo origen los autores sitúan en Siberia central.

56

Computación molecular

Mark A. Reed y James M. Tour

En el laboratorio se han fabricado ya moléculas que actúan como conmutadores, cables e incluso elementos de memoria. Es el principio de una nueva era en la electrónica nanométrica. No obstante, la interconexión de miles de millones de dispositivos para configurar circuitos útiles presenta aún enormes dificultades.



80



Interacciones positivas entre plantas

Francisco I. Pugnaire y María José Moro

La asociación entre la retama y el marrubio en una zona semiárida del sur de España muestra que, más allá de la competencia darwinista, algunas plantas se procuran un mutuo beneficio.

SECCIONES

84

TALLER Y LABORATORIO

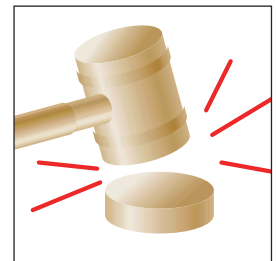
Uno es de donde late, por Shawn Carlson



86

JUEGOS MATEMÁTICOS

Paradojas perdidas, por Ian Stewart



88

IDEAS APLICADAS

Astronave monoplaza, por Glenn Zorpette

90

NEXOS

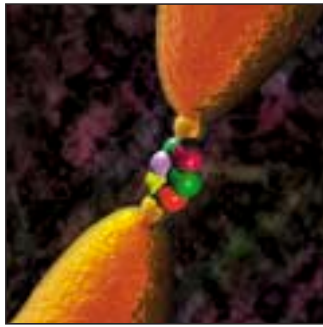
Sucedió en el mar, por James Burke

92

LIBROS

El código y su cifra.





Portada: Mark A. Reed

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Alfred T. Kamajian; AURA/NOAO/NSF
8-9	nasa/Space Telescope Science Institute; CFHT; David I. Méndez y César Esteban
10-11	NASA/STScI; J. L. Turner; Zareh Gorjian y Varoujan Gorjian NASA
14-15	Bryan Christie
16-17	Bryan Christie (<i>arriba</i>); Julie Forman-Kay y Tony Pawson (<i>abajo</i>)
18	Bryan Christie
19	Bettmann/Corbis
20	Bryan Christie (<i>ilustración</i>); Manfred Kage (<i>fotografía</i>); Lorene Langeberg (<i>micrografía</i>)
21	Lorene Langeberg
23-29	Pour La Science
42	John White
43	Jacques Le Moyne de <i>Brevis Narratio</i> (1591)
44	Edward Jonas y The Florida Division of Historical Resources (<i>pintura</i>), Roberto Osti (<i>mapa</i>); Bryan Christie (<i>gráfico</i>)
45	Roberto Osti (<i>dibujos</i>); Mark Teaford (microdesgaste dentario); Barry Stark (osteoartritis); Michael Schultz (anemia); Scott W. Simpson (líneas de Retzius) y Mark C. Griffin (infección)
46	Roberto Osti
47	Jacques Le Moyne de <i>Brevis Narratio</i> (1591)
48-53	Sergio D. J. Pena y Fabrício R. Santos
56-57	Mark A. Reed
58-59	Diseño de Jared Schneidman
60	Mark A. Reed (<i>arriba</i>), Diseño de Jared Schneidman (<i>gráfica</i>)
62	Diseño de Jared Schneidman (<i>ilustraciones</i>); Paul S. Weiss (<i>micrografía</i>)
63	Diseño de Jared Schneidman
64-65	Laurie Grace; fuente: Arms Availability and the Situation of Civilians in Armed Conflict", ICRC 1999 Report
66-67	Laurie Grace
68	Laurie Grace; fuente: "Manufacturing Trends: Going to the Source." Pete Abel en <i>Running Guns</i> , dirigido por Lora Lumpe (Zed, London, 2000)
69	Richard Emblin <i>Black Star</i>
70	Laurie Grace
71	Enric Martí <i>AP Photo</i>
72-73	Laurie Grace
75	Ricardo Mazalan <i>AP Photo</i>
76	Apichart Weerawong <i>AP Photo</i>
78	T. A. Davis <i>Saba</i>
79	Laurie Grace; fuente: Case Studies Compiled by Swedish Save the Children
80-83	Francisco I. Pugnnaire y M. ^a José Moro

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.^a Rosa Zapatero Osorio: *Galaxias enanas y brotes de formación estelar*; Esteban Santiago: *Comunicación intracelular*; Germán Delibes: *Los tejidos de los príncipes celtas*; Carlos Lorenzo: *Alimentación y salud de los indígenas en las colonias americanas*; Juan P. Adrados: *Computación molecular*; J. Vilardell: *La plaga de las armas portátiles, Hace, Taller y laboratorio e Ideas aplicadas*; Cristóbal Pera: *Heridas invisibles*; Juan Pedro Campos: *Los niños del fusil*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; José M.^a Valderas Martínez: *Nexos*

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

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.^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 © 2000 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

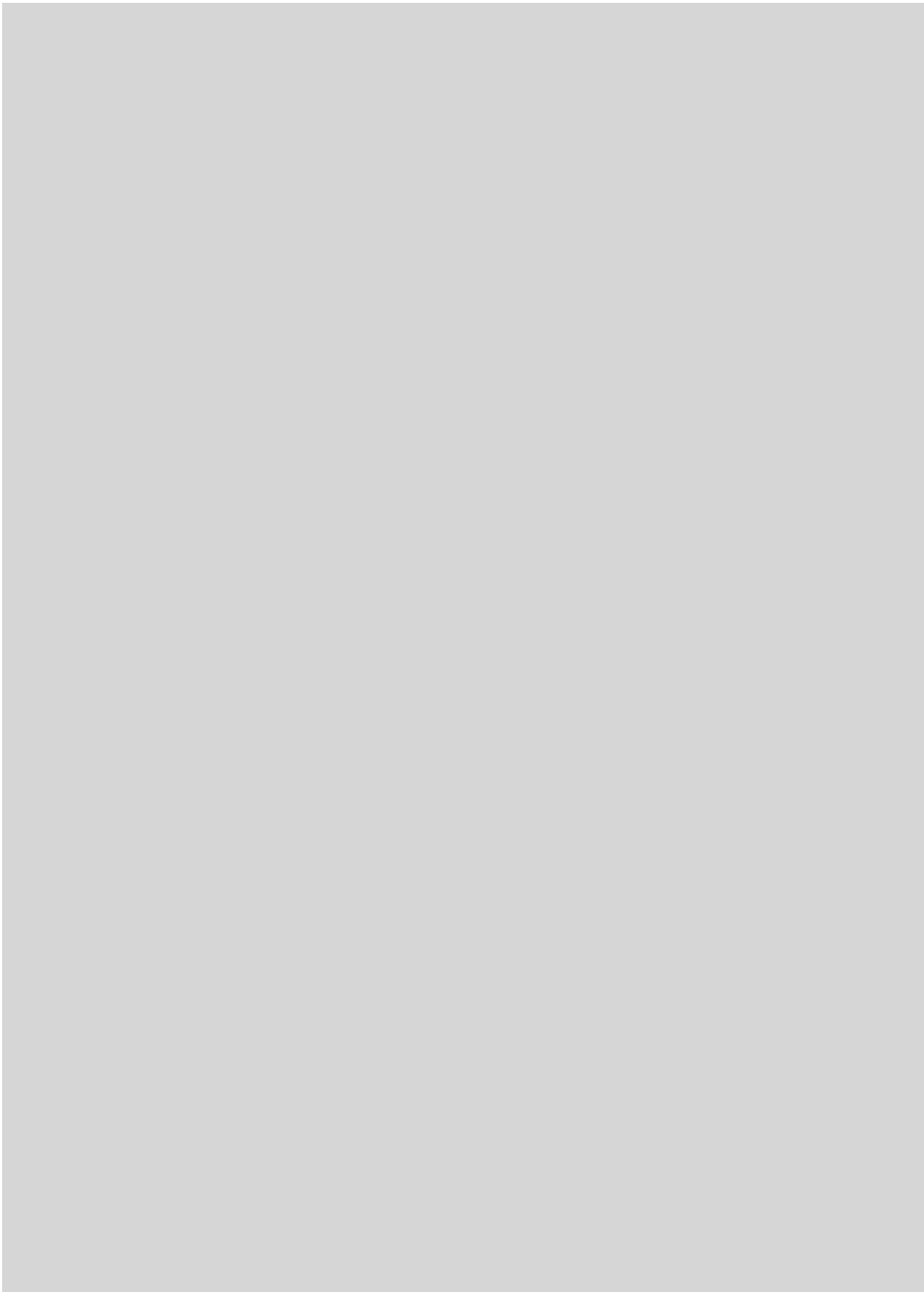
Copyright © 2000 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.^a 08021 Barcelona (España)

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 fotocopios 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

COMIDA PARA EL MUNDO. «El problema de los alimentos pone al mundo frente a dos peligros. Uno es el problema político del hambre. El sino de dos tercios de la humanidad es una vida entera de desnutrición y hambre. Sin embargo, en medio de tan urgentes necesidades persiste la amenaza económica de los excedentes de alimentos generados por la técnica moderna. La abundante producción alimentaria de EE.UU. ya ha empezado a minar su prosperidad. Una Comisión para la Alimentación Mundial, como institución de la ONU, sería responsable de mantener la estabilidad de los precios a escala global y de disponer el uso de los excedentes. —John Boyd-Orr, premio Nobel de la Paz 1949.» [Nota de la Redacción: nunca llegó a crearse tal Comisión.]

NAVEGACIÓN ULTRASONICA. «Las fotografías de las formas de onda de los sonidos ultrasónicos de los murciélagos, vistas por el osciloscopio de rayos catódicos, muestran que un grito ultrasónico dura sólo del orden de cinco centésimas de segundo. Un sonido audible de tan extrema brevedad se oye como un chasquido sostenido. La frecuencia parece que siempre decae al menos una octava entre el principio y el fin del pulso. Las observaciones demuestran que los murciélagos pueden emplear pulsos ultrasónicos para detectar objetos a unos quince centímetros de distancia. En esas condiciones un eco volvería a los oídos del animal antes de que el pulso hubiera abandonado del todo su boca. Parece más fácil para los murciélagos distinguir entre el eco y el sonido original si ambos difieren en frecuencia, como es el caso.»

LUNES TRISTES. «En un estudio sobre talante laboral realizado en una fábrica británica, dos sociólogos de la Universidad de Birmingham consignan que ‘el ánimo presenta su mínimo los lunes; la asistencia aumenta con la proximidad del día de cobro y el fin de semana’. Al comparar entre varones y mujeres de la misma fábrica, descubrieron un fenómeno sorprendente: el absentismo de los lunes era menor entre las mujeres. Explicación provisional: ‘A las mujeres no les importa tanto volver a la fábrica los lunes, porque los fines de semana no les aporta un verdadero tiempo libre.’»

...cien años

LA AERONAVE DE ZEPPELIN. «El dos de julio será mucho tiempo recordado por los aeronautas como fecha de la primera ascensión de la aeronave, enorme, re-

ción terminada por el conde Zeppelin, oficial de caballería de Wurtemberg. En el lago Constanza se cortó la última amarra a las ocho y tres minutos. El ingenio comenzó a moverse, tratando de elevarse describiendo una elegante curva. Alcanzó una altura de unos 400 metros y recorrió una distancia de cinco kilómetros. Una cosa es muy cierta y es que ninguna embarcación del tipo de la de Zeppelin transportará nunca muchas personas. El enorme gasto en que se incurre al construir tales aeronaves supone un obstáculo grave.»

TRUCAJES ESCÉNICOS. «En las obras de teatro el público lleva tiempo exigiendo mayor realismo. Presentamos una ilustración de una escena del ‘Ben Hur’ que se representa en el Broadway Theater. La escena es la famosa carrera en Antioquía, donde Mesala sale despedido del carro y pierde la carrera. Las ruedas del carro no se apoyan en el piso del escenario, sino que son accionadas por un pequeño motor eléctrico escondido en la carrocería. El carro de Mesala está preparado para que, en el momento crítico en que el carro de Ben Hur lo golpea, unos potentes resortes situados en el eje lancen hacia afuera las ruedas y la carrocería caiga sobre una horquilla provista de resortes.»

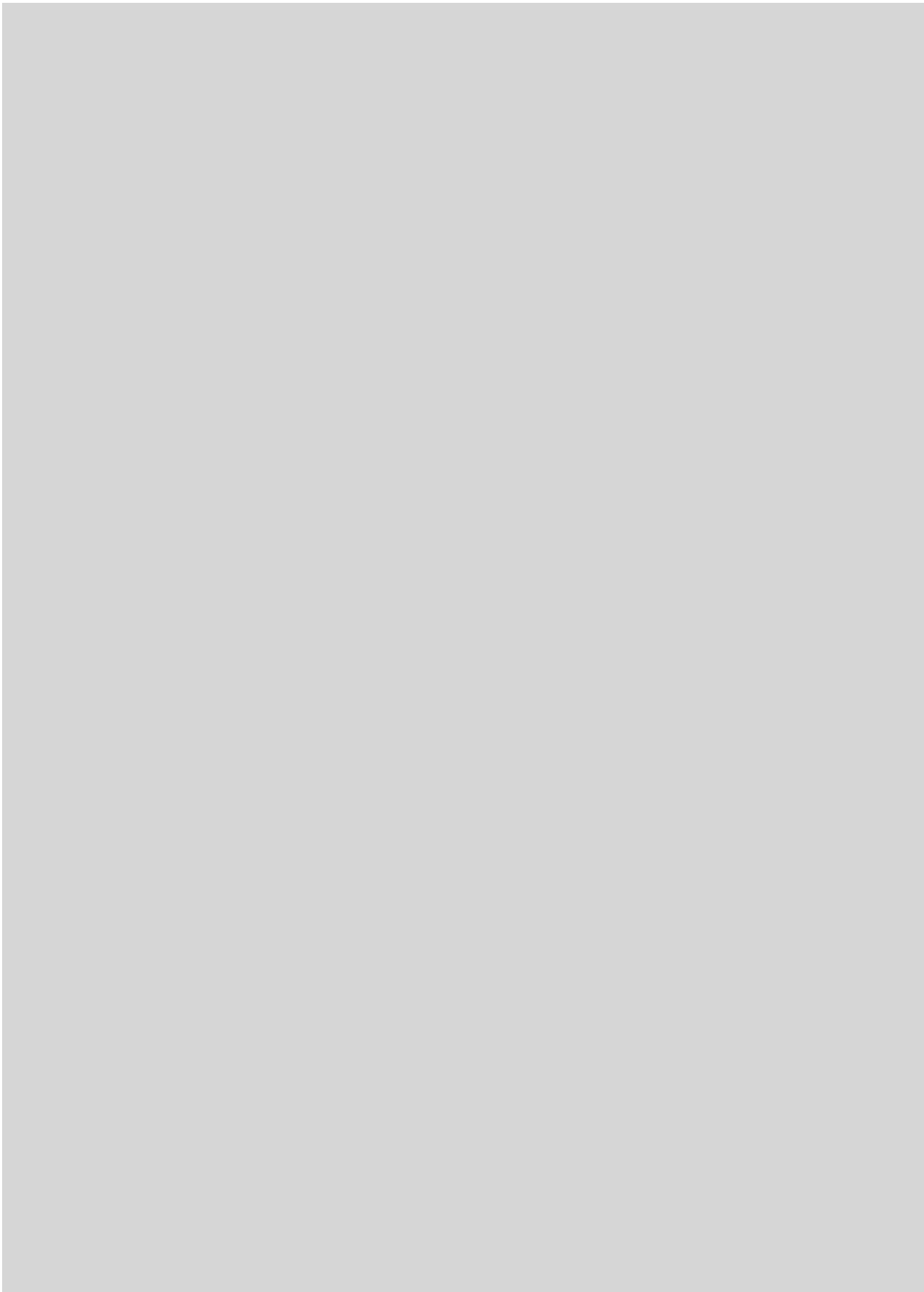


El carro trucado en escena: Ben Hur, año 1900

DEMANDA DE HIELO. «El hábito del hielo progresa rápidamente en Gran Bretaña, debido a la incesante petición de hielo en hoteles y locales públicos por parte de miles de viajeros norteamericanos. El consumo crecería si lo distribuyeran empresas normales, pero es un negocio en manos de los pescaderos. Una gran parte se importa de Noruega y se fabrica una cantidad considerable.»

...ciento cincuenta años

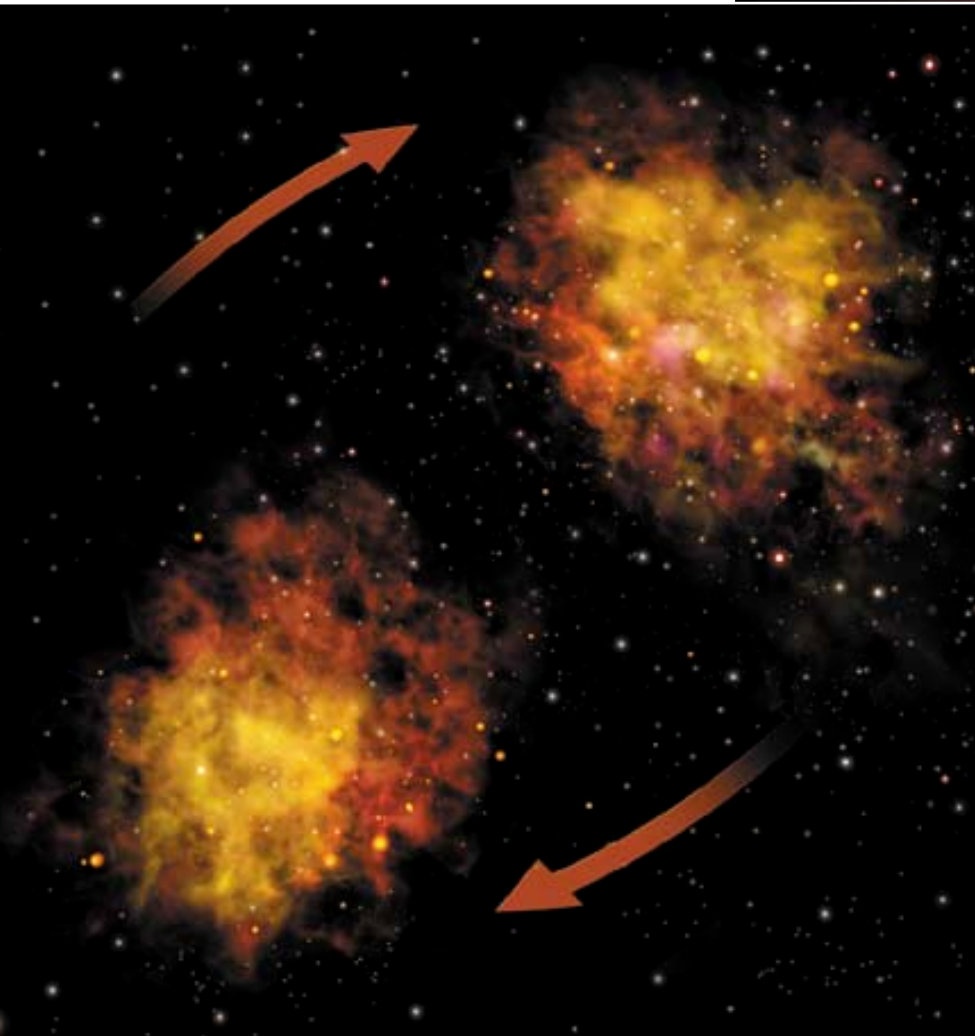
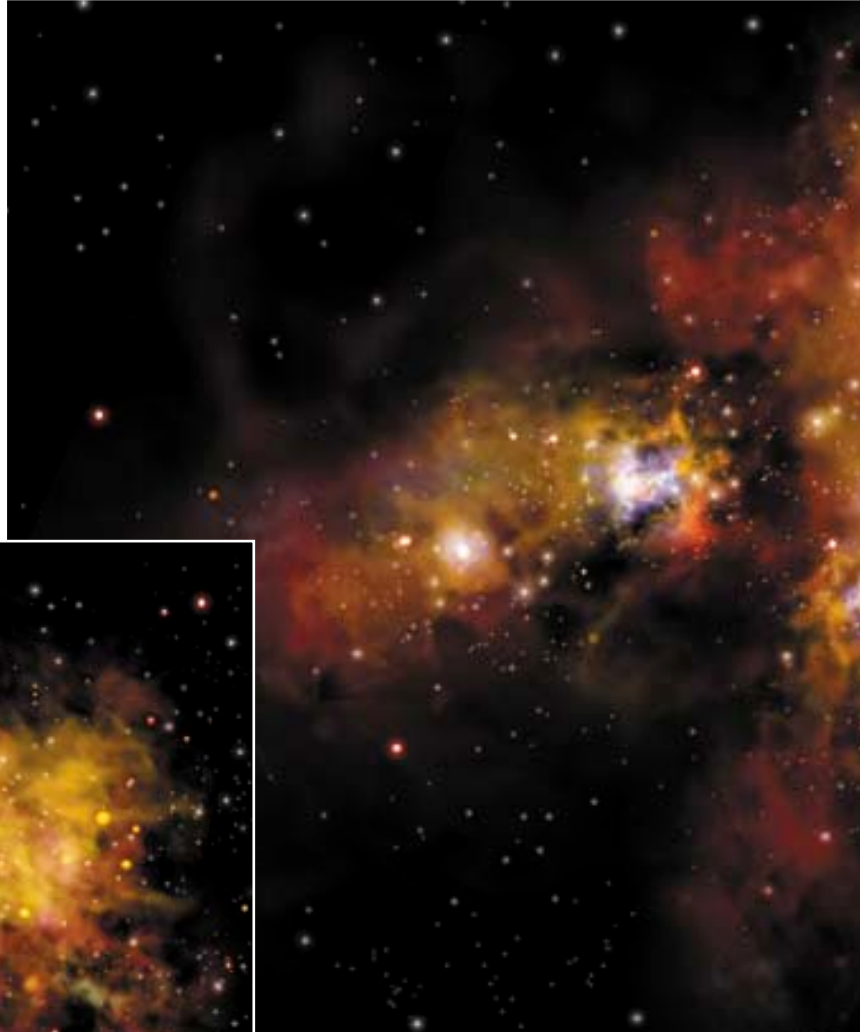
TORMENTA DE FUEGO. «Un corresponsal del Philadelphia Ledger corrobora la teoría del profesor Espy según la cual un incendio de gran magnitud crearía, por culpa de una rápida rarefacción de la atmósfera, una corriente ascendente, que necesariamente succionaría la atmósfera inmediata y cercana a la superficie. A propósito de un reciente incendio desatado en Filadelfia escribe: ‘Hasta las nueve de la mañana, el intenso viento del sureste arrastraba chispas de fuego hasta los edificios vecinos, y parecía como si fuera a devorar toda la parte norte de la ciudad. A las diez y media observé que las chispas ascendían más verticalmente y hasta una altura mayor, muchas moviéndose en espiral. Comprendí enseguida que el fuego seguía un circuito y descubrí que el viento soplabo hacia adentro procedente de todas partes.’» [Nota de la Redacción: La expresión para designar este efecto, “tormenta de fuego”, se acuñó en 1945.]



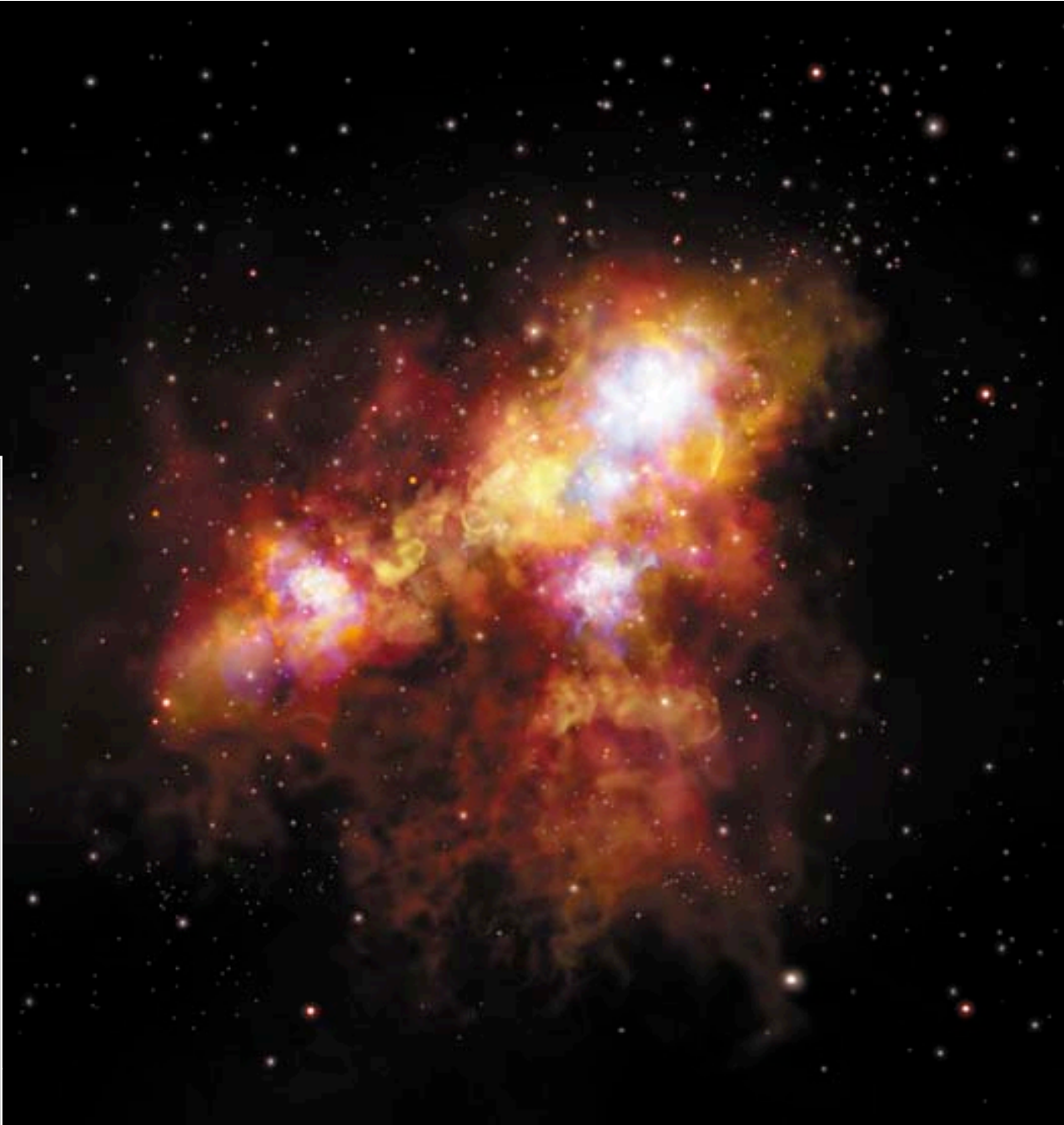
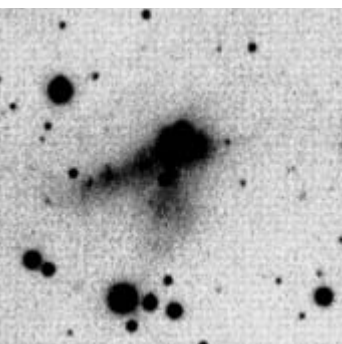
Galaxias enanas y brotes de formación estelar

En esas galaxias minúsculas se producen brotes espectaculares de formación de nuevas estrellas. A través de ellos los astrónomos se adentran en la historia primitiva del universo

Sara C. Beck



1. UNA FUSION GALACTICA es la desencadenante del nacimiento de nuevas estrellas en esta creación artística de la evolución de la galaxia enana II Zw 40 con brotes de formación estelar. En la primera fase (*izquierda*), dos galaxias enanas que alojan estrellas rojas y añosas y nubes de gas atómico (*color amarillo*) se aproximan por atracción gravitatoria para terminar orbitando una alrededor de la otra. A medida que se van acercando, las fuerzas de marea provocan la extracción de estrellas y gas (*arriba*); comienzan a aparecer grupos de jóvenes estrellas azules. En la fase final (*página contigua, arriba*) se obtiene una galaxia fusionada única, tal y como se aprecia en las imágenes de los telescopios (*derecha*).



Hay, a unos 12 millones de años-luz de la Tierra, una enorme galaxia espiral barrada, la M83, cuya imagen suele adornar las portadas de los libros de astronomía. Detengámonos en ella. Hacia el borde de M83 se aprecia una nebulosa pequeña, casi elíptica. Se trata de la galaxia enana NGC 5253. El observador ocasional podría considerarla una compañera irrelevante de M83, pero la vista a veces engaña. La diminuta galaxia se halla en medio de un brote intenso de formación estelar, donde nacen estrellas a un ritmo celerísimo. En relación a su tamaño, la cadencia de formación estelar en NGC 5253 multiplica la tasa registrada en M83.

En los últimos años los astrónomos han descubierto que las galaxias enanas —así NGC 5253— abundan mucho más de lo que se venía suponiendo. Y por decirlo todo, difieren no poco de sus primas mayores: durante miles de millones de años permanecen en estado latente, para explotar luego en breves pulsos violentos de formación estelar. Los brotes de nuevas estrellas se dan también en las grandes galaxias, pero la radiación procedente de ellos queda a menudo velada por otras emisiones galácticas; sólo de los brotes de las galaxias enanas los investigadores extraen información clara de fenómenos tan intrigantes. De esas galaxias pueden también obtenerse pistas sobre la historia temprana del universo, puesto que son vestigios de tiempos muy antiguos y constan de material que apenas ha cambiado desde la gran explosión.

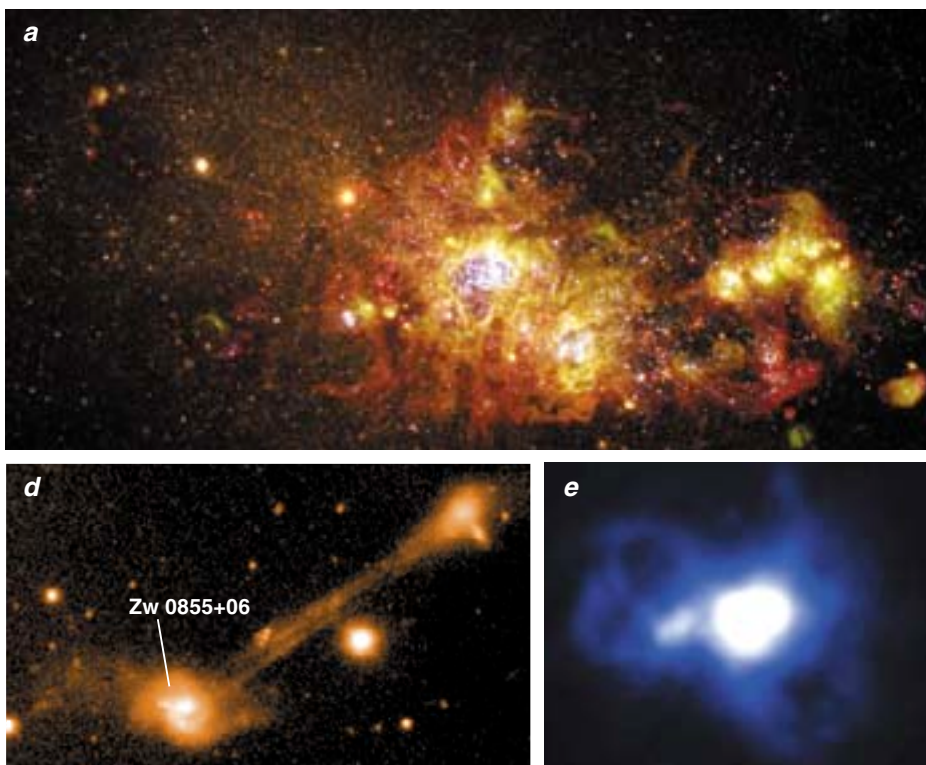
¿Qué es lo que origina los brotes de formación estelar en las galaxias enanas? ¿Por qué revisten tanto interés para los astrónomos? Para responder a tales cuestiones, se

hace obligado revisar los mecanismos del nacimiento de las estrellas. Se sabe que esos astros se han estado formando a lo largo de la vida entera del universo, o casi. Nuestra propia galaxia, la inmensa espiral llamada Vía Láctea, contiene al menos 100.000 millones de estrellas. La formación estelar en la Vía Láctea es un proceso lento y continuo que involucra la contracción de grandes nubes de gas interestelar y polvo. Cada año, en promedio, alrededor de una masa solar de gas y polvo (esto es, una cantidad similar a la masa de nuestro Sol) se convierte en nuevas estrellas.

Por el contrario, un brote de formación estelar implica un período de tiempo relativamente breve —de un millón a 20 millones de años— durante el cual se acelera intensamente el ritmo de nacimiento de estrellas. Los astrónomos han observado galaxias con un ritmo 100 veces superior al de la Vía Láctea. Sabemos que este proceso debe ser de corta duración, pues si se mantuviera durante centenares de millones de años la galaxia consumiría el contenido de gas del que las estrellas están hechas.

Al intensificarse el ritmo de formación estelar se produce una subida drástica del brillo de la galaxia. Por ser breves los tiempos en que aparecen brotes de formación, están dominados por la radiación de las estrellas jóvenes y calientes, cuya masa multiplica al menos por 20 la solar y cuya vida dura sólo unos millones de años. Estas estrellas, que brillan decenas de miles de veces más que el Sol, calientan y ionizan las nubes densas de gas y polvo donde se originaron. Las nubes absorben la luz visible y ultravioleta de las estrellas para emitir energía en radio e infrarrojo. Un brote intenso de formación estelar puede brillar como un cuásar, el objeto más luminoso del universo. La luz procedente del brote se concentra en los intervalos de radio e infrarrojo del espectro; por ello no pudo conocerse y empezar a investigarse hasta hace 20 años, cuando los nuevos telesco-

SARA C. BECK, doctorada por la Universidad de California en Berkeley, enseña física y astronomía en la de Tel Aviv. Para investigar la formación de estrellas en nuestra galaxia y otras galaxias, se sirve de imágenes y espectros en el infrarrojo, radio y ondas milimétricas.



pios y satélites artificiales permitieron la observación en tales longitudes de onda.

Muchos astrónomos creen que los brotes de formación de estrellas desempeñan un papel crucial en la evolución galáctica y en la creación de cúmulos estelares. De ahí el interés por desentrañar los desencadenantes de estos episodios repentinos, cómo proceden y qué es lo que los apaga. Se trata de cuestiones que podrían hallar más fácil respuesta en el ámbito de las galaxias enanas, con sus 100 millones de estrellas o algo menos, que en las grandes espirales, como la Vía Láctea y M83.

Un diluvio de enanas

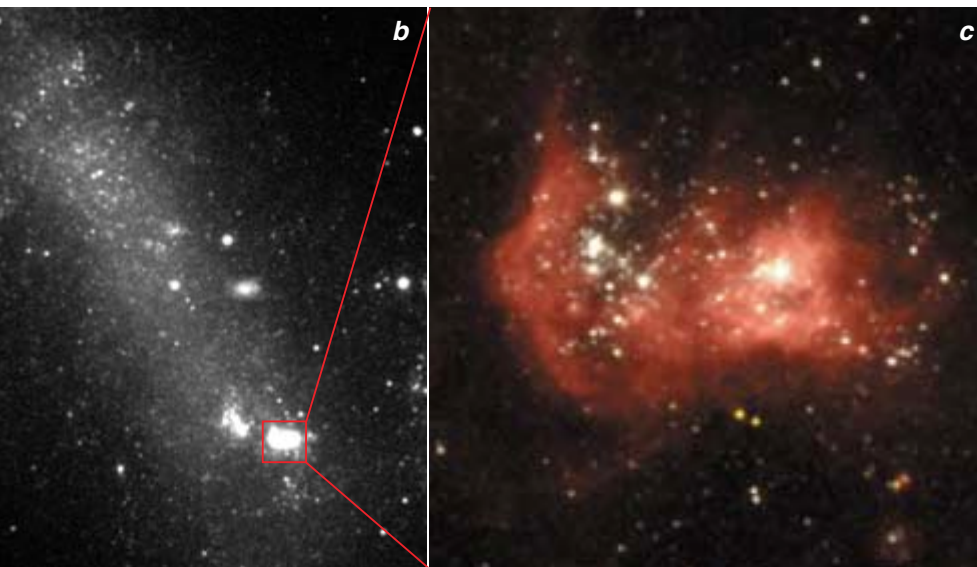
La investigación ha tardado en prestar atención a las galaxias enanas porque la mayoría de estos objetos son débiles. Las dos enanas mejor conocidas, la Gran Nube y la Pequeña Nube de Magallanes, parecen más brillantes debido a su proximidad: se encuentran a menos de 300.000 años-luz de nuestra galaxia. Ninguna otra enana es visible para el ojo humano. Pero los nuevos telescopios y detectores, así como las búsquedas a gran escala en el cielo, nos han revelado que abundan más que las galaxias de mayor tamaño. El Grupo Local, el cúmulo galáctico que incluye la nuestra, contiene (en el último cómputo) dos espira-

les —la Vía Láctea y Andrómeda— y alrededor de 40 enanas. A buen seguro, tal relación numérica predomina en el universo más cercano.

Por razón de su forma algunas de las galaxias enanas se denominan enanas elípticas; las más pequeñas y débiles de éstas se llaman galaxias enanas esferoidales. Pero la mayoría de las enanas carecen de estructura o forma simple; son irregulares.

Las galaxias enanas no son versiones a menor escala de las galaxias grandes. Su evolución está dirigida por mecanismos distintos. Las galaxias espirales cuentan con nubes gigantes de hidrógeno molecular, helio y polvo, prestas a formar estrellas. Se mantiene la estructura de brazos espirales merced a las ondas de densidad, que constituyen el mecanismo inicial de la formación de estrellas al comprimir las nubes moleculares que atraviesan. Como resultado, las galaxias espirales nunca permanecen completamente latentes; siempre presentan estrellas de formación reciente.

Las galaxias enanas, por contra, contienen escaso hidrógeno molecular pero abundante hidrógeno atómico, es decir, átomos de hidrógeno que se encuentran libres, no ligados en moléculas diatómicas. En una galaxia enana típica, la masa almacenada en nubes de hidrógeno atómico decuplica la masa de las estrellas. Estas nubes no alcanzan la densidad de las nubes de hidrógeno molecu-



2. LAS GALAXIAS ENANAS CON BROTES DE FORMACION ESTELAR como NGC 4214 (a) contienen grupos de estrellas azules y jóvenes rodeados de nubes de gas brillante. Otras aglomeraciones de estos brotes se observan también en la enana NGC 2366 (b); una imagen de ampliación tomada con el telescopio espacial Hubble muestra un cúmulo denso de estrellas masivas inmersas en una nube de gas (c). El brote de formación de estrellas en la galaxia enana Zw 0855+06 (d) se originó, cabe pensar, a raíz de una aproximación hacia otra galaxia enana, hecho que tendió el puente de estrellas entre las galaxias. Henize 2-10 (e) presenta una cola de marea de gas, signo de que esta galaxia absorbió otra de menor tamaño.

lar, por lo que es menos probable que experimenten una contracción gravitatoria para producir estrellas. Es más, las galaxias enanas no cuentan con ondas de densidad, ni con cualquier otro movimiento organizado de gas que provoque la contracción de una nube. Así que las enanas permanecen la mayor parte de su tiempo en un estado quiescente, fase durante la cual todas sus estrellas son débiles, rojas y viejas. Sólo las enanas con brotes de formación estelar tienen estrellas azules, brillantes y calientes, que indican procesos recientes de nacimiento de estrellas.

Las pruebas de largos períodos de quiescencia en las galaxias enanas se obtienen del análisis de su contenido químico. La formación estelar modifica la composición metálica de una galaxia. En efecto, cuando las estrellas de mayor masa arriban al final de sus días explotan en violentas supernovas, enriqueciendo el medio galáctico con elementos pesados formados en las reacciones termonucleares de la estrella. Sin embargo, si no se generan nuevas estrellas, la galaxia permanecerá químicamente inalterada, sin evolucionar. Podemos conocer la historia de una galaxia a través de su abundancia de metales, como los astrónomos designan a todos los elementos químicos que no son hidró-

geno y helio (para enojo de los químicos). Cuanto menor sea el contenido metálico, menos evolucionada será la galaxia.

Las concentraciones de metales en las galaxias enanas se hallan en el rango del 2% al 30% del contenido metálico en la vecindad del Sol, con el pico de la distribución localizado alrededor del 10%. Sólo unas pocas enanas con brotes muy activos presentan una composición química equiparable a la de las galaxias espirales. El estado poco evolucionado de las galaxias enanas mueve a pensar en la posibilidad de encontrar una que sea básicamente primordial, inalterada desde la gran explosión. Las galaxias que muestran las menores abundancias en metales detectadas hasta la fecha —las enanas I Zw 18 y SBS 0335-052— no parecen primordiales: cuentan con varias generaciones de estrellas. Mientras prosiga la búsqueda, los cosmólogos estudian este tipo de galaxias explorando las pistas que puedan conducir al conocimiento de cómo se formaron las primeras generaciones de estrellas.

Las galaxias enanas con episodios de formación estelar en su haber presentan una apariencia única. Contienen aglomerados o grumos de estrellas jóvenes, azules y calientes dentro

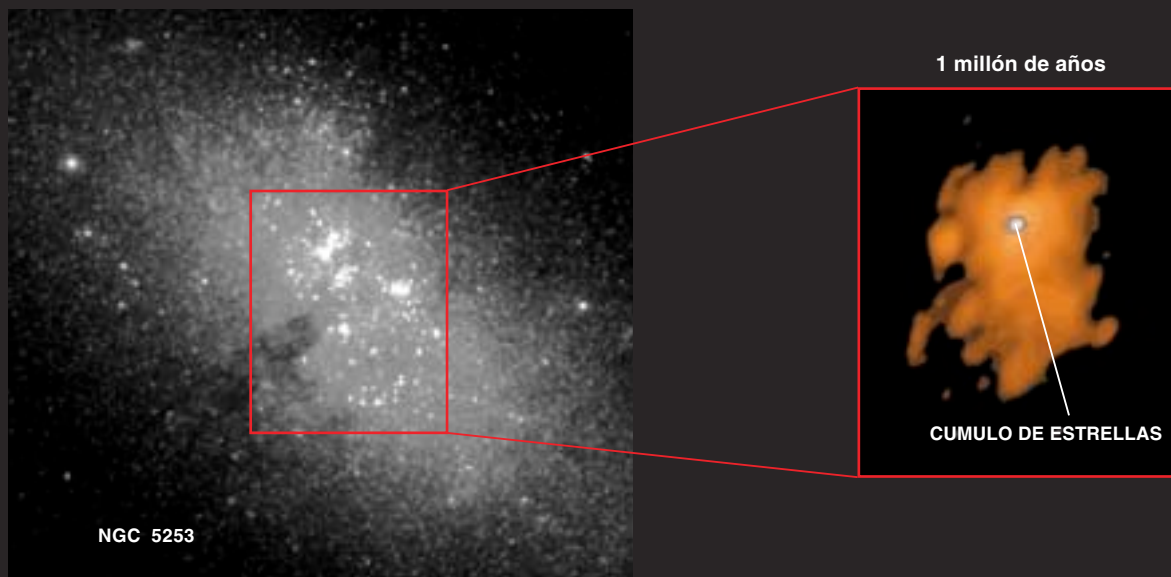
de una envoltura mayor y débil de estrellas viejas, rojas y frías. Las enanas con brotes se caracterizan por su brillo. Durante la fase de intensa formación estelar la galaxia enana puede brillar como una espiral, mientras que en su estado latente la luminosidad de una enana de similar tamaño habría caído hasta un exiguo 1%, si no más débil. Toda esta actividad acontece en una zona restringida: los diámetros de los grupos de brotes oscilan entre unos pocos cientos hasta 1000 años-luz. Las propias galaxias abarcan, por norma, menos de 6000 años-luz de diámetro. Cada grupo de brotes puede constar desde cientos hasta decenas de miles de estrellas brillantes de tipos espectrales O y B. En una misma enana podría haber varios grupos de brotes, no necesariamente confinados al centro de la galaxia.

Estallido de estrellas

A diferencia de lo que se da en la Vía Láctea y en otras galaxias, las enanas con brotes de formación estelar no ofrecen una distribución de estrellas de todas las edades; sólo parecen contener aglomerados de estrellas muy jóvenes y una capa envolvente de estrellas miles de millones de años más viejas. Los astrónomos estiman las edades de las estrellas que hay en estas galaxias mediante el estudio de las distintas fases de la evolución estelar. Es posible que el mejor indicador de edades para las estrellas jóvenes corresponda a la fase de Wolf-Rayet; a ésta llegan entre los 2 y 10 millones de años las estrellas de mayor masa (más de 25 veces superior a la solar). Durante dicho estadio, las estrellas expulsan la mayor parte de su masa inicial a una velocidad de miles de kilómetros por segundo. Las líneas de emisión de los iones que se mueven raudos por ese material se ensanchan en virtud del efecto Doppler; no aparecen en forma de rayas estrechas en el espectro, sino que se extienden hacia los extremos rojo y azul. Cuando los astrónomos observan ese ensanchamiento espectral de un brote de formación estelar, saben que contiene un número significativo de estrellas Wolf-Rayet cuya edad no supera los 10 millones de años.

En las galaxias de gran tamaño los grupos de brotes de formación estelar se superponen, a menudo, sobre el brillante núcleo galáctico o sobre uno de los brazos espirales, con la obstrucción consiguiente de las ob-

EVOLUCION DE UN BROTE DE FORMACION DE ESTRELLAS



3. EL BROTE JOVEN DE FORMACION ESTELAR observado en el centro de la galaxia enana NGC 5253 se desencadenó al absorber ésta una nube de gas intergaláctico. La parte más joven del brote, con una edad inferior al millón de años, se detecta sólo en imágenes en radio e infrarrojo (*arriba a la derecha*), ya que las estrellas ahí contenidas se encuentran todavía enterradas dentro de la nebulosidad en la que nacieron. Transcurridos unos 10 millones de años, los vientos estelares expulsarán el gas circundante, como ha imaginado el artista (*página contigua, a la izquierda*); después de varios miles de millones de años, el brote evolucionará hacia un cúmulo globular, quizá parecido a NGC 6093 en nuestra propia galaxia (*página contigua, a la derecha*).

servaciones. Es más, la radiación originada en el proceso continuo de nacimiento de estrellas en la galaxia se confunde con las emisiones procedentes de los brotes. Este problema se agrava en la región radio del espectro electromagnético. Como antes expusimos, las estrellas jóvenes de los brotes ionizan las nubes circundantes de gas. Estas producen emisiones en radio caracterizadas por un espectro térmico de energías: la intensidad de la emisión varía distintamente con la frecuencia. Ahora bien, cuando las estrellas masivas pasan a la fase de supernova, los remanentes de la explosión emiten ondas de radio cuyo espectro no es térmico. El espectro observado en radio procedente de una galaxia de gran tamaño resulta de la combinación de la radiación térmica de la generación actual de estrellas muy masivas y de la luz no térmica de generaciones estelares precedentes. La radiación no térmica, pues, puede ser más intensa y de mayor duración que la radiación térmica. Esa es la razón de que, en una galaxia de gran tamaño, la luz emitida por los brotes de formación de estrellas quede velada por otro tipo de emisiones.

Las galaxias enanas, sin embargo, no presentan una historia continua del nacimiento de las estrellas. Los cúmulos de brotes se convierten así en objetivos prestos a la observación por separado. En las galaxias enanas con brotes, por ejemplo NGC 5253 e II Zw 40, se detectan sólo las emisiones térmicas procedentes de las estrellas jóvenes, ya que se ha debilitado la contribución en radio de los brotes anteriores. La ausencia de radiación no térmica sirve de indicador de la edad; implica que ninguna de las estrellas de mayor masa de los brotes ha madurado en supernova y, por ende, la edad del brote debe ser inferior a la edad a la que estas estrellas explotan (unos millones de años). Esta estimación coincide con otras observaciones que apoyan que los brotes de NGC 5253 e II Zw 40 son los más jóvenes identificados hasta la fecha.

Las regiones más jóvenes de los brotes de formación estelar en NGC 5253, rodeados de la nube densa de gas y polvo originaria, no se detectan en el visible. Los estudios realizados en el infrarrojo y en radio muestran que la luz en estos intervalos del espectro electromagnético proviene de

una fuente muy pequeña; allí, en una zona de apenas 3 a 6 años-luz de diámetro, coexisten, sospechamos, unas 100.000 estrellas jovencísimas. El contenido en estrellas y el tamaño de la fuente son muy similares a los cúmulos globulares, agrupaciones densas y esféricas de estrellas de la Vía Láctea y de otras galaxias de gran tamaño.

Los cúmulos globulares de la Vía Láctea, sin embargo, cuentan con varios miles de millones de años, por lo menos; de hecho alojan las estrellas más viejas de la galaxia. La conclusión lógica es que nuestra galaxia no ha formado cúmulos globulares en muchos miles de millones de años, o, si lo ha hecho, los cúmulos recién engendrados quedaron desplazados y disgregados por acción gravitatoria conforme trazaban órbitas alrededor del disco. Los brotes de formación estelar en NGC 5253 y otras galaxias enanas podrían haber sido cúmulos globulares en el momento de su nacimiento. De resultar así, nos habrán de revelar aspectos hasta ahora desconocidos de la historia de nuestra galaxia.

Se debe recordar, no obstante, que lo que puede ser verdad para las enanas no siempre resulta cierto en las galaxias de mayor tamaño. Divergencia que se produce, por ejemplo, en la "propagación estelar", el mecanismo en cuya virtud el nacimiento de las estrellas en una parte de la galaxia puede conducir a la formación estelar en otras regiones. La aparente aleatoriedad de la distribución de los grupos de brotes en las enanas lleva asociada la pregunta de cómo