

INVESTIGACION *y* CIENCIA

AGOSTO 1999
800 PTA. 4,81 EURO

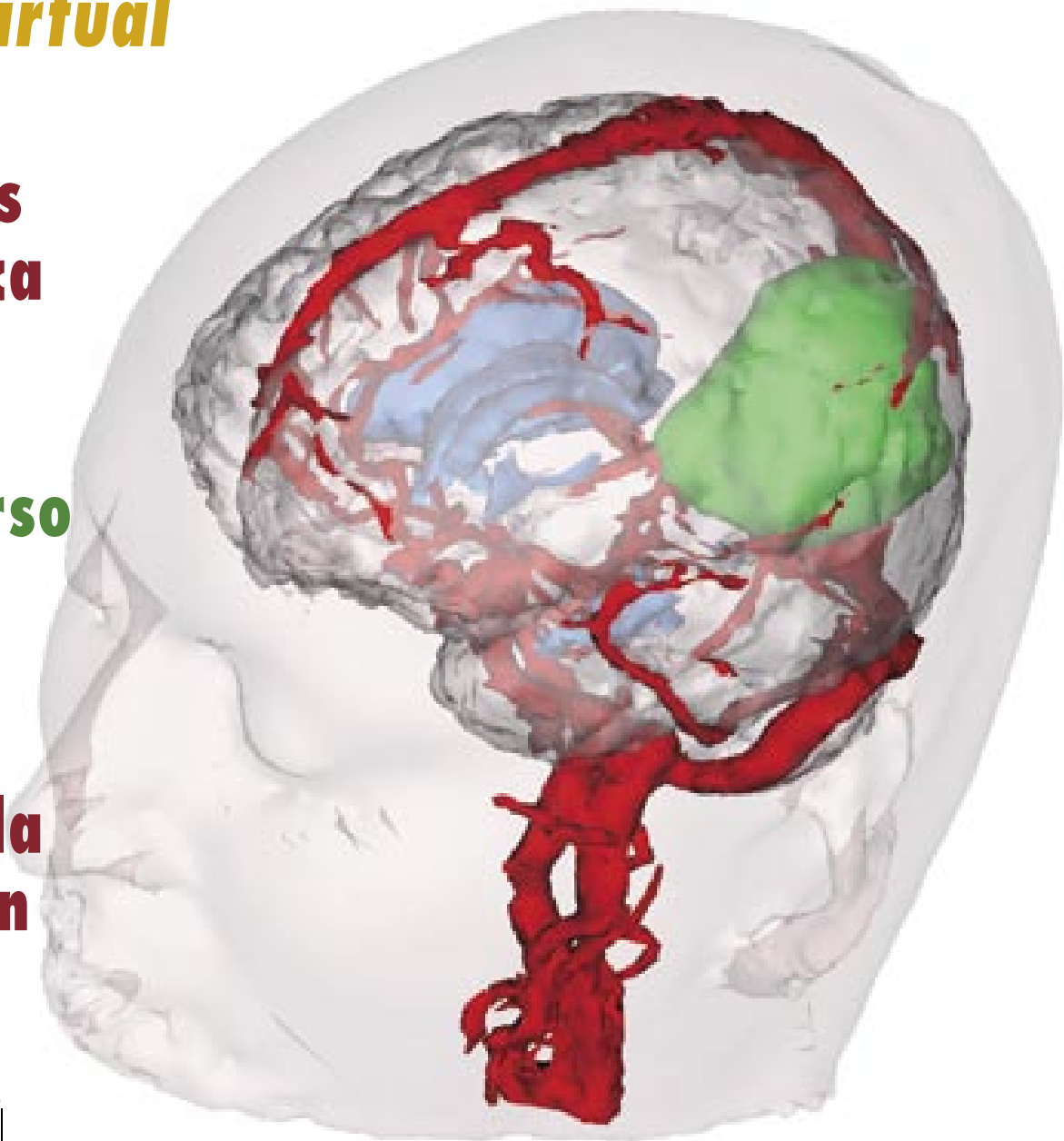
Edición española de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

Cirugía virtual

**Los límites
de la lógica**

**El mapa
del universo**

**Armas
biológicas
de segunda
generación**



SECCIONES

3

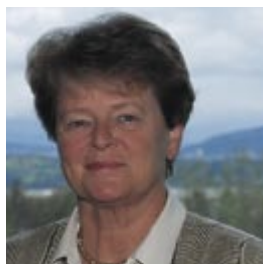
HACE...

50, 100 y 150 años.

26

PERFILES

Gro Harlem Brundtland:
Cuando la salud
es el mejor negocio.



28

CIENCIA Y SOCIEDAD

Técnicas de formación
de imágenes...

Biología molecular...

Antigravedad... Arqueología...

Magnetismo...

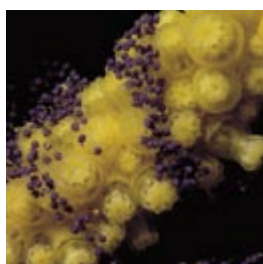
Instituciones del estado
moderno.



34

DE CERCA

Juntos y bien avenidos,
por R. Coma y J. M.^a Gili



36

**Cirugía
guiada por imágenes**

*W. Eric L. Grimson, Ron Kikinis,
Ferenc A. Jolesz y Peter McL. Black*

Con la ayuda de modernos
sistemas de formación
de imágenes, el cirujano
se centra en sutiles estructuras
anatómicas del paciente
que está operando.



4



Cartografía del universo

Stephen D. Landy

Las galaxias se agrupan y forman cúmulos; los cúmulos, supercúmulos, y así sucesivamente. La cartografía de los cielos nos confirma que no hay escala en que la materia no tienda a agruparse. Ahora bien, tomada en su conjunto, la textura del universo es uniforme y ejecuta una armoniosa “música de las esferas”.

Búsqueda en la Red

Miembros del Proyecto Clever

La WWW, la Telaraña, está creciendo a razón de un millón de páginas diarias. Se requieren buscadores nuevos y eficaces para encontrar en ella información fiable y completa. La estructura de vínculos de la Red puede ser la clave que oriente a los buscadores hacia colectivos interconectados con información solvente.



20



El lenguaje XML

Jon Bosak y Tim Bray

Un útil para páginas de la Red Mundial, el lenguaje “extensible” XML, promete ser la causa de otra revolución informática. Las páginas escritas en XML suministran las informaciones requeridas con mayor rapidez y eficiencia que el hipertexto. Además, permite un acceso cómodo desde el ordenador.

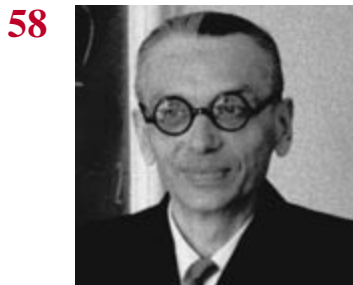


44 **Guerra biológica contra los cultivos**
Paul Rogers, Simon Whitby y Malcolm Dando

Las armas biológicas no tienen por qué ser patógenos mortales para los seres humanos como el ántrax o la peste. Los gérmenes destructores de las cosechas también forman parte del arsenal biológico. Estas armas poco controladas pueden usarse para arrasar economías enteras.

50 **Prevención de las catástrofes volcánicas**
Vicente Araña

La volcanología tiene como objetivo principal la mitigación de las catástrofes. Su progreso se basa en un mejor conocimiento de los procesos eruptivos y en la eficaz detección de fenómenos precursoros.



58 **Gödel y los límites de la lógica**
John W. Dawson, Jr.

Kurt Gödel fue un genio torturado por una enfermedad crónica. De su compleja mente salió uno de los teoremas de mayor trascendencia de este siglo: hasta en los sistemas matemáticos dotados de mayor consistencia lógica, ciertos enunciados pueden ser verdaderos y, a pesar de ello, indemostrables.

64 **En busca del murciélago fantasma**
Glenn Zorpette

En una zona remota y no cartografiada todavía de la pluviselva de Belice, dos zoólogos estaban identificando especies de murciélagos en vuelo a partir de sus llamadas ultrasónicas. Y, de repente, un gran fantasma blanco entró revoloteando en sus vidas...

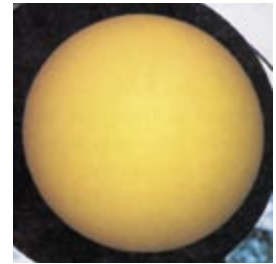


72 **El secreto de Nabada**
Joachim Bretschneider

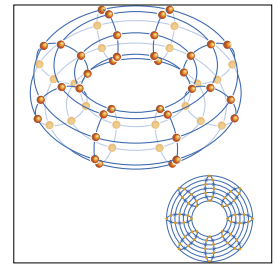
Durante décadas los orientalistas han creído que las ruinas del norte de Siria eran de segundo rango en comparación con los yacimientos de Irak. Las excavaciones de Tell Beydar han proporcionado una sorpresa: en el norte de Mesopotamia existía ya en la temprana edad del bronce la metrópolis de Nabada.

SECCIONES

84
TALLER Y LABORATORIO
Pistola solar,
por Shawn Carlson



86
JUEGOS MATEMÁTICOS
Cruces de vías en la fábrica de ladrillos, por Ian Stewart

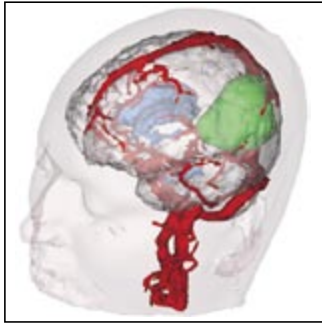


88
NEXOS
Una habitación con (pocas) vistas, por James Burke

90
LIBROS
Catástrofes naturales...
De Asclepio a Galeno.



96
IDEAS APLICADAS
Pegamento instantáneo,
por Louis A. Bloomfield



Portada: Imagen cortesía de Michael Leventon

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Cortesía de Steve Maddox
6-7	Don Dixon
8	Observatorios Carnegie
9	Laurie Grace
10	Laurie Grace; fuente: Inspección de Corrimiento hacia el Rojo de Las Campanas
11	Laurie Grace (<i>izquierda</i>), Don Dixon (<i>derecha</i>); fuente: Inspección de Corrimiento hacia el Rojo de Las Campanas
13-17	Bryan Christie
20	Brucie Rosch
21	Laurie Grace (<i>esquema</i>)
23	Laurie Grace (<i>esquema</i>)
36	Michael Leventon, Laboratorio de Inteligencia Artificial, Instituto de Tecnología de Massachusetts
37	Sam Ogden
38-39	Michael Leventon
40	Michael Leventon (<i>arriba</i>), Arya Nabavi y Alexandra V. Chabrerie (<i>abajo</i>)
41-42	Michael Leventon
43	Najlah Feany, SABA
45	Dick Swanson
46	Matt Collins
47	<i>Scientific American</i>
48	Holt Studios International (<i>izquierda</i>), Nigel Cattlin/HSI (<i>derecha</i>), Randall C. Rowe (<i>abajo</i>)
49	Steven R. King
50-51	M. C. Solana
52-53	Vicente Araña
54	R. Ortiz (<i>fotografía</i>), Vicente Araña (<i>esquema</i>)
55-56	Vicente Araña
57	H. Moreno (<i>arriba</i>), Vicente Araña (<i>abajo</i>)
59	Cortesía de los archivos del Instituto de Estudios Avanzados
60	Cortesía de John W. Dawson, Jr.
61	Cortesía de los archivos del Instituto de Estudios Avanzados
62	Bryan Christie
63	Cortesía de Richard Arens
64-70	Steve Winter (<i>fotografías</i>), Jenny Keller (<i>dibujos</i>)
72-75	Joachim Bretschneider
76-77	Joachim Bretschneider/Spektrum der Wissenschaft (<i>mapa</i>), J. Bretschneider (<i>fotografía derecha</i>), Bildarchiv Preussischer Kulturbesitz, Berlín (<i>fotografías en barra inferior</i>)
78-79	J. Bretschneider (<i>fotografía derecha</i>), Bildarchiv Preussischer Kulturbesitz, Berlín (<i>fotografías en barra inferior</i>)
80-82	Joachim Bretschneider
84-85	Daniels & Daniels
86-87	Bryan Christie
88	Dusan Petricic
96	George Retseck

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Cartografía del universo*; Luis Bou: *Búsqueda en la Red, El lenguaje XML, Gödel y los límites de la lógica y Juegos matemáticos*; Alfonso Susanna: *Guerra biológica contra los cultivos*; Joandomènec Ros: *En busca del murciélago fantasma*; Francesc Asensi: *El secreto de Nabada*; J. Vilardell: *Hace...*, *Taller y laboratorio e Ideas aplicadas*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

Ciencia y sociedad:

Juan Carlos Rodríguez Rubio: *Biología molecular*; Juan Pedro Campos: *Arqueología*

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

BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*;

Ricki L. Rusting, *Senior Associate Editor*; Timothy M. Beardsley y Gary Stix,

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

Editor; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Madhusree Mukerjee,

George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette, *Editors*;

Graham P. Collins; Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich,

Contributing Editors

PRODUCTION William Sherman

CHAIRMAN Rolf Grisebach

PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.

Muntaner, 339 pral. 1.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	11.150 pta. 67,01 euro	20.700 pta. 124,41 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro

Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados

es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

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

Copyright © 1999 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 fotocopros reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona

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

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

EDUCANDO A LA PROLE. «Las influencias culturales comienzan a obrar sobre los niños desde el instante de nacer. Según las costumbres de su entorno social, puede que al niño se le deposite desnudo sobre un tablón de madera dura (en Nueva Caledonia), que se le introduzca en una cuna acolchada (entre los indios de las llanuras norteamericanas) o que se le vende ceñidamente del cuello para abajo (en Europa meridional). El alimento lo recibirá siempre que llore (en Malaya), a horas establecidas (en la América moderna) o cuando le plazca a su madre (en Nueva Guinea). Será objeto de los mimos de la familia (en Japón) o no se le prestará mayor atención que la mínima para asegurar su supervivencia (en Alor). Tan tempranas experiencias son importantes para sentar los cimientos del desarrollo de la personalidad.»

¿PIENSAN LOS MONOS?

«Los psicólogos estudiosos de los procesos mentales superiores hablan de la existencia de un mecanismo organizativo o principio que explicaría el aprendizaje y el pensamiento: el conjunto de aprendizaje. De acuerdo con nuestros experimentos, las palabras serían estímulos o señales que inspirasen los conjuntos de aprendizaje más adecuados para resolver un problema dado. Aunque los monos no hablan, están capacitados para aprender que ciertos símbolos representan conjuntos de aprendizaje específicos. En un ensayo, a un mono se le entregó un triángulo sin pintar como señal para elegir todos los objetos rojos situados ante la jaula (véase ilustración), y un círculo sin pintar como señal para seleccionar todos los objetos azules. —Harry F. y Margaret Kuenne Harlow».

...cien años

HELEN KELLER. «Miss Helen Kellar [sic], la joven con tan notorias aflicciones como talentos, acaba de culminar su preparación para la universidad. No es probable que ninguna persona se haya presentado hasta ahora a unos exámenes en tan extrañas condiciones. Es ciega, sorda y muda, por lo que un caballero del Instituto Perkins, que no la conocía con anterioridad, se hacía cargo de los documentos del examen a medida que eran presentados y los traducía a caracteres Braille. La joven aprobó los exámenes de todas las disciplinas y en griego avanzado recibió una nota muy alta.»

MUNICIÓN PROHIBIDA. «El Congreso de la Paz examinó con todo detalle la bala 'dum-dum' (de punta hueca) e Inglaterra se opuso a toda limitación en su uso entre las tribus salvajes. Hoy día todas las principales potencias están expuestas a entrar en guerra con razas más o menos salvajes, como es el caso cuando sus posesiones coloniales se ven amenazadas, por lo que muchas no quieren trabas contra el uso de esos proyectiles. El cartucho inglés 'Mark IV' lleva una carga de cordita; la bala tiene un hueco en la cabeza y la vaina de níquel acaba en una boca labiada. Ese proyectil, al entrar en contacto con el cuerpo humano, se abre adquiriendo una suerte de forma oblonga y redondeada.» [Nota de la Redacción: Las Convenciones de La Haya de 1899 y 1907 prohibieron el uso bélico de esos proyectiles.]



Mono aprendiendo a reconocer símbolos

EL JARDINERO DE KARNAK.

«En Tebas se ha descubierto la tumba de Nekht, jardinero principal adscrito al templo de Karnak, hacia el 1500 a.C. Un muro primorosamente pintado muestra la casa particular de Nekht, un edificio de barro y ladrillo, de dos pisos, con el exterior encalado y una gran puerta principal de madera. A la izquierda de la casa está el jardín, rodeado de árboles umbrosos y con un minúsculo canal que alimenta dos pequeños estanques en los que florecen nenúfares blancos y azules. Los árboles no eran

palmeras datileras sino higueras de hojas anchas, bajo cuya sombra tupida, nos dice Nekht, 'se refrescaba durante el calor del verano y aspiraba el aire del fresco viento del norte'.»

...ciento cincuenta años

SERRERÍAS ANTICUADAS. «Una de las mayores curiosidades de Zelanda, la floreciente colonia de Holanda en el condado de Ottawa (Michigan), es el Molino de Viento, enorme, incómodo e inmanejable. Se trata de una monstruosa mole de madera en forma de torre octogonal. La máquina se mueve por la fuerza del viento incidente en cuatro listones cubiertos de lona. Encontrándome yo allí, estaban aserrando, o más bien intentándolo. A veces, con un viento favorable, las sierras trabajaban durante algunos minutos con gran viveza, para seguir con unas cuantas carreras más lentas y luego detenerse del todo, quizá durante media hora. Una persona emprendedora está ahora construyendo una serrería a vapor, que rendirá más.»

Cartografía del universo

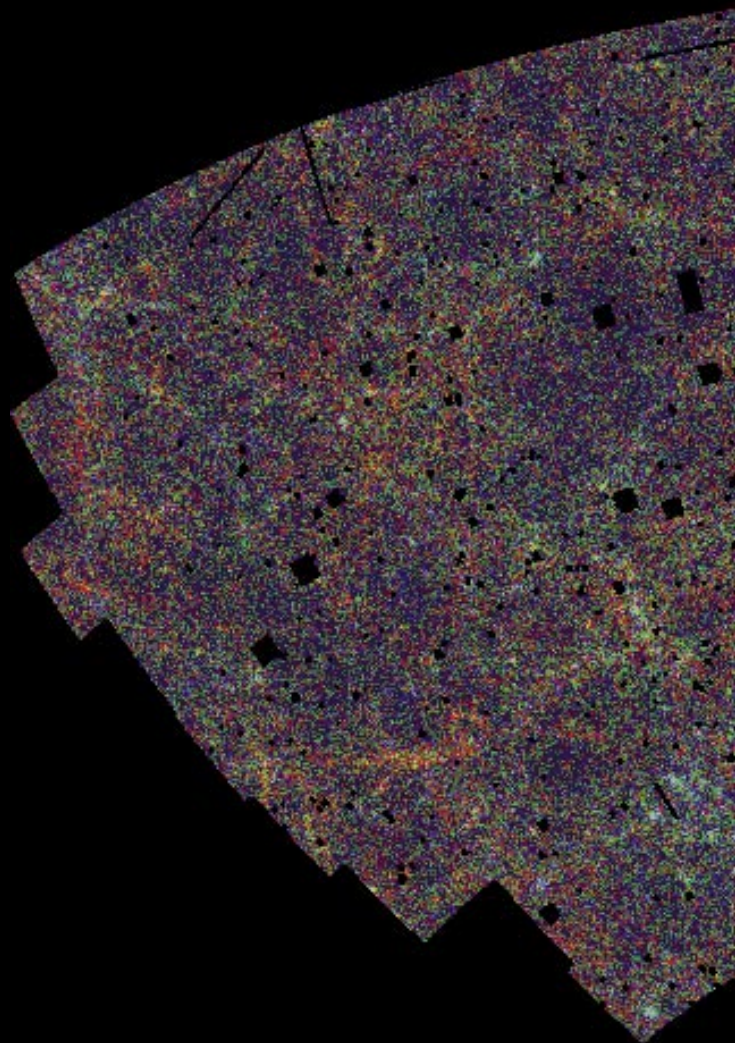
*Mediante técnicas procedentes del análisis musical,
los astrónomos estudian la formación de agrupamientos
galácticos de tamaño creciente*

Stephen D. Landy

Hasta para un astrónomo avezado, las galaxias resultan imponentes. Con una extensión de cientos de miles de años luz de un extremo a otro forman enjambres de cientos de miles de millones de estrellas hilvanadas por nubes gigantescas de gas y polvo. Para los cosmólogos, ocupados en el estudio de la naturaleza a escalas inmensas, una galaxia no es más que la unidad básica de la materia. Llenan el universo visible miles de millones de ellas. Se congregan en cúmulos de una envergadura de tres millones o más de años luz, que a su vez constituyen conjuntos cada vez mayores. En todas las escalas observadas hasta ahora se ha visto que las galaxias se agrupan y forman estructuras complejas; cabe suponer que sucede así en virtud de los procesos físicos que dominaban en los comienzos de la expansión del universo y, luego, en virtud de la acción de la gravedad.

Ahora bien, semejante fenómeno encierra una paradoja. La agrupación de galaxias atenta contra una de las premisas fundamentales de la cosmología moderna: el principio cosmológico. Afirma éste que el universo, entendido en su conjunto, es homogéneo e isotrópico; o lo que es lo mismo, carece de lugares u orientaciones que se distingan de los demás. Cuando los cosmólogos estudian las propiedades globales del universo —densidad media, velocidad de expansión y morfología— se guían por ese principio. A cierta escala considerable, por ejemplo la total del cosmos observable, que tiene un radio de 15.000 millones de años, la distribución de esos puntos galácticos debería acercarse a la uniformidad. Pero, ¿cómo reconciliar la regularidad de la materia en la mayor de las escalas con su irregularidad en las demás?

Merced al avance de la técnica de los últimos años, astrónomos y cosmólogos han podido investigar la estructuración de las galaxias a grandes distancias. La idea un tanto simple de que el universo, alcanzada determinada escala, se torna uniforme va cediendo terreno a la opinión de que la macroestructura del universo sólo puede entenderse basándose en procesos aleatorios. No se niega que sea homogéneo e isotrópico, pero tales atributos se interpretan ahora en un sutil sentido estadístico. Así se están desbrozando algunas de las cuestiones más espinosas de la cosmología: ¿cuál era la configuración del universo en el alba del tiempo? ¿Cómo creció y se desarrolló hasta convertirse en el que vivimos? ¿Qué formas de materia, corrientes y exóticas, contiene?



La investigación actual hereda veinte años de descubrimientos apasionantes. A finales de los años setenta y principios de los ochenta, los cosmólogos empezaron a cartografiar sistemáticamente las galaxias. Buscaban con ello medir la distribución de la materia, incluida la intergaláctica "materia oscura" que, a diferencia de las galaxias, no desprende luz. (El supuesto de que las galaxias luminosas informan de la masa total no es más que una aproximación, pero constructiva; se ha hecho otro esfuerzo por cuantificar el sesgo que se deriva de la aceptación de ese postulado.)

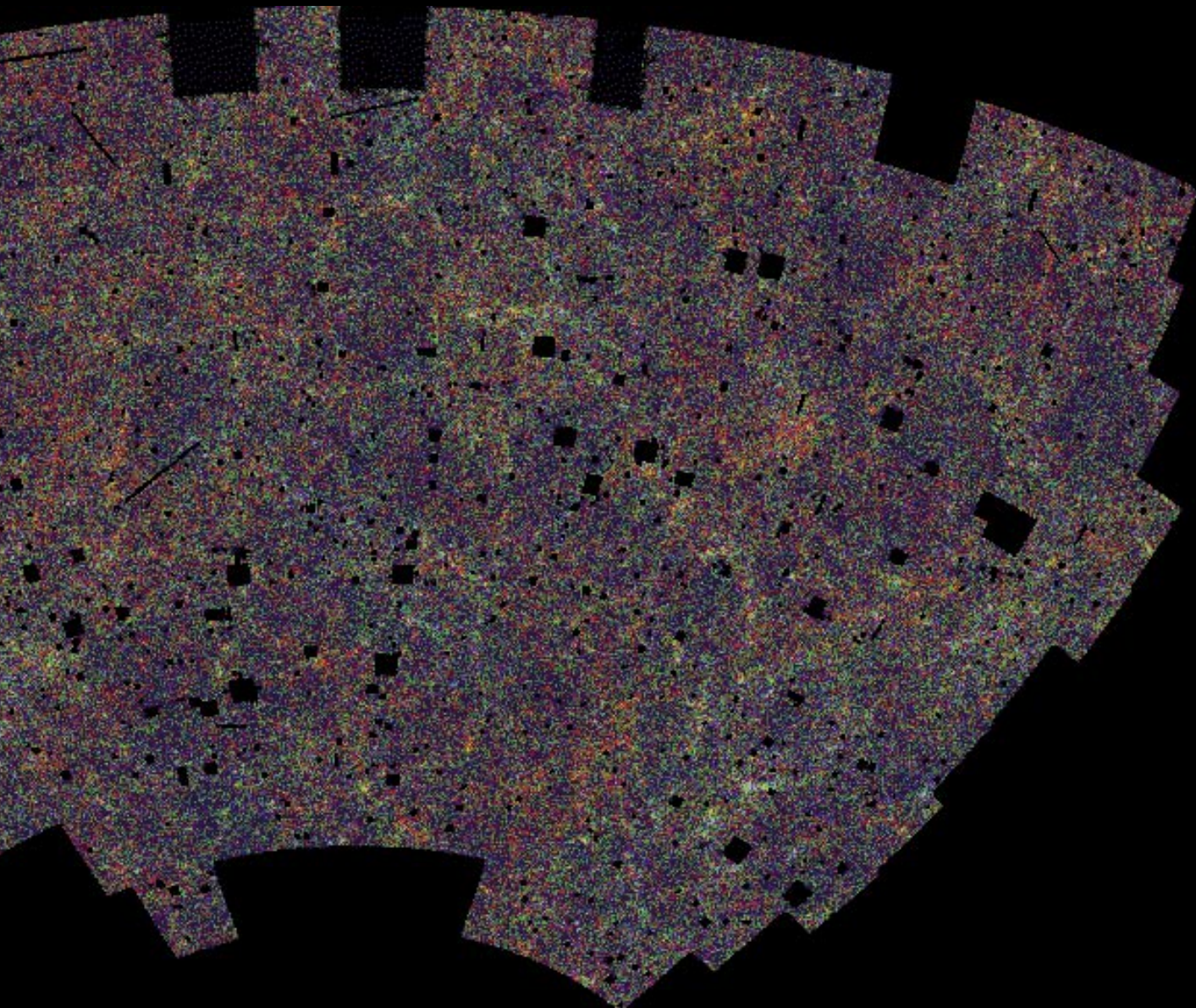
A escalas de hasta cien millones de años luz, las galaxias siguen una distribución fractal, de dimensión entre uno y dos. La disposición fractal de la materia constituiría un serio problema para el principio cosmológico si se extendiese a escalas mayores,

porque una distribución fractal nunca es homogénea ni isotrópica. Visto a cierta distancia, el fractal no se acerca a la homogeneidad; como la línea de la costa, parece irregular a cualquier escala. En un universo fractal de dimensión dos, la masa esperada encerrada en un volumen esférico centrado en una galaxia al azar crecería con el cuadrado del radio, no con el cubo. En un universo así, la densidad media sería una función de la escala; la velocidad de la expansión cósmica y otros parámetros universales perderían su significado. En pocas palabras: la fractalidad parecía arruinar la base de la cosmología moderna.

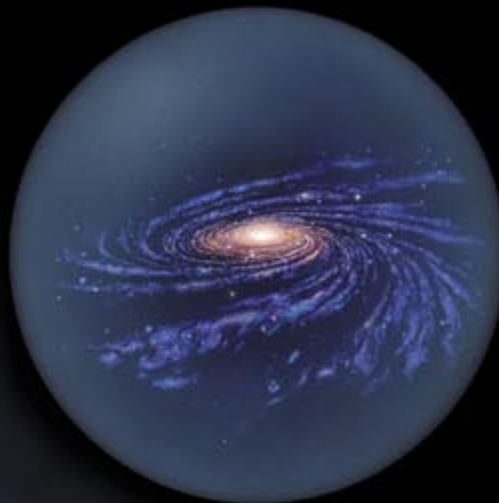
Pero la inspección astronómica ulterior reveló que, a escalas de cientos de millones de años luz, desaparecía la fractalidad. Para describir esa más amplia distribución podía apelarse a un proceso estadístico

1. TRES MILLONES DE GALAXIAS, cada una con miles de millones de estrellas, aparecen en este mapa del 15 por ciento del cielo, centrado en la constelación del Escultor. Aunque llenan el cielo de manera que, se mire en la dirección que se mire, su aspecto es más o menos igual, las galaxias tienden a agruparse en cúmulos, aglomeraciones y cadenas. El mapa, en el que el brillo de cada punto

es proporcional al número de galaxias, fue compuesto a partir de fotografías en blanco y negro obtenidas por el Telescopio Schmidt del Reino Unido. En esta versión en color, los puntos azules, verdes y rojos representan galaxias de brillo intenso, medio y débil, respectivamente. Las áreas negras son alrededores de estrellas brillantes que el estudio no pudo sondear.



10⁵ AÑOS LUZ
GALAXIAS



10⁶ AÑOS LUZ
GRUPO DE GALAXIAS



A medida que el espectador pase de la Vía Láctea al universo observable entero irá viendo una distribución irregular de las galaxias. Mas, al final, se impondrá la uniformidad. Cada una de estas esferas es diez veces más ancha —mil veces, pues, más voluminosa— que la precedente. Las galaxias reúnen estrellas, gas, polvo y una “materia oscura” sin clasificar aún. Se agrupan entre sí en cúmulos, los mayores cuerpos existentes en el universo que se mantienen unidos por la gravedad. Los cúmulos galácticos,

10⁷ AÑOS LUZ
CUMULOS



Estructuras a gran escala del universo

10¹⁰ AÑOS LUZ
EL UNIVERSO



a su vez, se congregan en supercúmulos y murallas, separados por vacíos en los que el espacio intergaláctico apenas si contiene materia. Al llegar a cierta escala, cifrada en torno a los cien millones de años luz, estas estructuras de tamaño creciente siguen un patrón fractal, es decir, se agrupan de una misma manera en todas las escalas. Pero entre esa escala y el tamaño del universo observable la irregularidad acabará por ceder paso a una uniformidad casi completa.

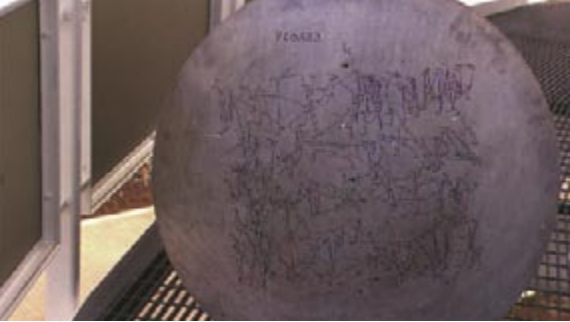
—S.D.L.

10⁹ AÑOS LUZ
MURALLAS Y VACIOS



10⁸ AÑOS LUZ
SUPERCUMULOS





2. PARA ACELERAR la inspección astronómica de más de 26.000 galaxias, Stephen A. Shectman diseñó un instrumento que podía medir 112 galaxias a la vez. En una placa metálica perforó unos agujeros que correspondían a las posiciones celestes de las galaxias. Cables de fibra óptica llevaban la luz de cada galaxia a un canal distinto de un espectrógrafo en el telescopio Du Pont de 2,5 metros de los Observatorios Carnegie, en el chileno Cerro Las Campanas.

simple, con una media y una varianza bien definidas: un proceso con ruido. El principio cosmológico quedó a salvo. Pero avanzado el decenio de los ochenta surgieron nuevos problemas. Una inspección astronómica de elevada resolución detectó una “Gran Muralla” de galaxias de 750 millones de años luz de largo, más de 250 millones de años luz de ancho y más de 20 millones de años luz de grosor. Un proceso ruidoso no podía explicar semejante estructura, colosal y consistente. Estos descubrimientos instaron proyectos cartográficos de ambición mucho mayor, incluida la “Inspección astronómica Las Campanas sobre el corrimiento hacia el rojo”, en el que trabajé con mis compañeros de 1988 a 1994.

Puesto que se pretendía medir la distribución de las galaxias a una escala varias veces mayor que la de inspecciones precedentes, hubo que hacer frente a varios problemas observacionales. De entrada, el brillo tenue de las galaxias remotas; para fotografiarlas se requería una exposición larga. Además, el gran volumen de espacio abarcado en la inspección aumentaba el número de objetos que había que observar. En suma, teníamos que observar más objetos con una exposición más larga, y sólo disponíamos del telescopio durante un tiempo limitado. Ante esas dificultades, decidimos concentrarnos en una zona muy profunda (hasta dos mil millones de años luz), ancha (85 grados a lo largo del cielo) y delgada (1,5 grados); era como si hubiésemos tomado una muestra bidimensional de la distribución de galaxias. La delgadez ponía en peligro la señal, pero brindaba un primer atisbo de la organización del cosmos a escalas de miles de millones de años luz.

Se cartografiaron seis franjas de universo. Se registraron las posiciones de más de 26.000 galaxias. Los datos se tomaron en los Observatorios Carnegie, en el Cerro Las Campanas, del desierto chileno de Atacama. Stephen A. Shectman, de los Observatorios Carnegie, Robert P. Kirshner y Huan Lin, del Centro Smithsonian para la Astrofísica de Harvard, Augustus Oemler y Douglas L. Tucker, de la Universidad de Yale, Paul L. Schechter, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y yo analizamos la información.

El trabajo de inspección astronómica atravesó varias etapas. Empezó con la realización de las observaciones fotométricas —fundamentalmente, unas fotografías muy sensibles del cielo— con una cámara de dispositivo acoplado a la carga (CCD), instalada en el telescopio Swope de un metro de Las Campanas. Para extraer el máximo rendimiento, recurrimos a la fotometría de barrido de deriva: se apunta el telescopio hacia donde comienza uno

de los campos que se estudian y se desconecta el movimiento automático; queda entonces inmóvil y el espacio pasa ante él. Los ordenadores leen la información del detector CCD a la velocidad con que rota la Tierra; de esa forma se produce una sola imagen larga y continua, con una latitud cósmica constante. En completar la fotometría se tardó 450 horas.

Vino luego el análisis de las bandas obtenidas para determinar las galaxias probables, a incluir en la inspección. Nos guiamos de acuerdo con el doble criterio de brillo y borrosidad característica. Las observamos, por último, con un espectrógrafo del telescopio Du Pont de 2,5 metros, en Las Campanas, que descomponía la luz en un espectro de colores, a partir del cual calculábamos el corrimiento al rojo de cada galaxia, una forma de saber a qué distancia están.

Reunir, en esa inspección, luz bastante para medir el espectro de una galaxia exige un par de horas. Si nos hubiésemos limitado a una por vez, hubiera sido imposible un estudio de esta magnitud. Pero Shectman diseñó un sistema múltiple de fibra óptica que medía el espectro de 112 galaxias de consuno. El sistema operaba como sigue: escogidas las galaxias probables, agujereábamos la placa metálica que se instalaba en el foco del telescopio. Los agujeros correspondían a sus posiciones en el cielo y los atravesaban cables de fibra óptica, que portaban la luz procedente de cada galaxia a un canal distinto del espectrógrafo. Pese a este procesamiento en paralelo, consumimos 600 horas de tiempo de observación (cien noches) en medir todos los espectros.

Basta fijar los ojos en los mapas de la inspección para darse cuenta de que las galaxias no se distribuyen al azar. Antes bien, tienden a agruparse. Pero hay que andar con tiento con las impresiones visuales. El cerebro acostumbra buscar regularidades donde no las hay. Pero no nos engaña en este caso; la estadística respalda la realidad de los agrupamientos.

Para medir un agrupamiento nada mejor que servirse de funciones de correlación; éstas representan el número de pares de objetos en función de la distancia que los separe. Por ejemplo, la distribución de los venados de un bosque tiende a formar acumulaciones de microescala, de unas decenas de metros para entendernos. Quien cazase al azar un ciervo en el bosque se percataría de que es mucho más probable encontrar otro a unos metros que a unos cientos de metros. La función de correlación daría una clara señal positiva en la escala de decenas de metros y una débil o negativa en la de los cientos de metros. Esa sería la descripción matemática de un fenómeno de la naturaleza hartamente conocido, el del desplazamiento de los venados en grupos pequeños.

STEPHEN D. LANDY se interesó por la cosmología una noche que se perdió en el bosque y se distrajo contemplando las estrellas. Tras doctorarse en la Universidad Johns Hopkins, pasó luego por los Observatorios Carnegie de Pasadena y la Universidad de California en Berkeley.

Podemos aplicar a las galaxias un análisis similar. Método que funciona bien a escalas mucho menores que el tamaño de la inspección astronómica. A grandes escalas, sin embargo, no sirve para mucho. Lo que ocurre es que el número de galaxias —y por tanto el número de pares de galaxias— viene dado de antemano. Si hay una cantidad excesiva de pares con separaciones pequeñas, existirá un déficit de distancias grandes, pues el número total de pares es fijo. Este juego de suma cero contamina la señal de agrupamiento a grandes escalas.

Para nuestra fortuna disponemos de una técnica complementaria que puede medir fiablemente el agrupamiento a escalas grandes. Pensamos en el análisis armónico, llamado también análisis por distribución espectral de potencia. El análisis armónico, como sugiere su nombre, guarda una relación estrecha con el estudio del sonido. En realidad, el análisis matemático de la distribución de galaxias y el del ruido aleatorio son idénticos. (El espectro de potencia, aunque mantiene un parentesco conceptual con el que los astrónomos suelen usar, el luminoso, difiere en su naturaleza física.)

Las ondas de la superficie del agua, las fluctuaciones de la presión del aire en una habitación y otros fenómenos corrientes se describen de una forma más natural por medio de sus espectros de potencia. El oído humano realiza un análisis similar de las fluctuaciones de presión, es decir, del sonido. Cabe ver una fluctuación como una colección de notas puras, cada una de cierta intensidad. La cóclea descompone en el oído las fluctuaciones de las notas (frecuencias) que las constituyen. La señal enviada al cerebro describe la intensidad (o amplitud) de cada nota.

El espectro de potencia mide la intensidad de las fluctuaciones de la presión en función de la frecuencia. Es lo que muestra el ecualizador gráfico de un equipo

de sonido. Los instrumentos musicales grandes, el contrabajo, la tuba, colocan una gran parte de su potencia en las longitudes de onda largas, correspondientes a frecuencias bajas. El sonido de un cristal que se rompe consta de frecuencias altas.

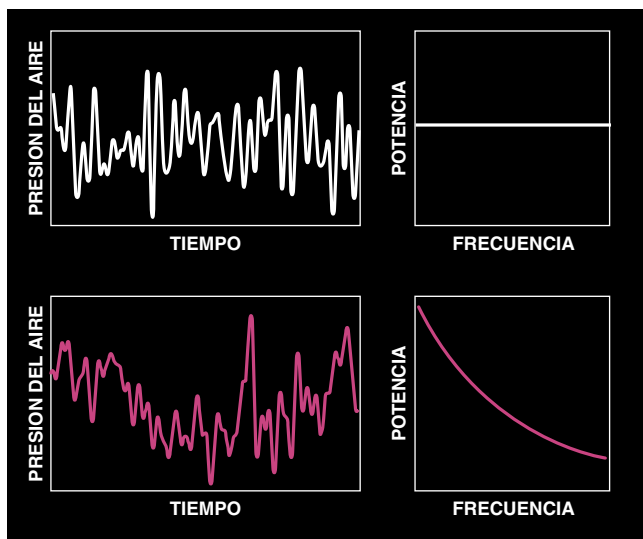
El ruido aleatorio es especial; admite una plena descripción mediante su espectro de potencia. Imagínense dos personas que acuden a una cascada con unos minutos de diferencia. Ambas graban varios minutos de sonido. Aunque sus grabaciones no serán iguales —el sonido de la caída de agua cambia sin cesar—, no por ello dejarán de registrar el murmullo típico de un salto de agua. Si los observadores realizasen un análisis armónico de sus grabaciones obtendrían el mismo espectro de potencia. Las propiedades estadísticas de las dos grabaciones serían idénticas.

Al ruido que tiene un espectro de potencia plano, es decir, que reparte la misma potencia en cada frecuencia, se le llama blanco. La denominación remite a su analogía con el color. Cada color tiene una frecuencia diferente; si se mezclan todos los colores por igual saldrá el blanco. Volviendo al sonido, se llama blanco al ruido que se oye entre emisora y emisora. Es un sonido perfectamente aleatorio; en ningún instante guarda relación alguna —no está correlacionado— con el que vino antes. Otro espectro de potencia especial es el ruido rosa, en el que cada octava emite la misma potencia. Las cascadas producen ruido rosa.

El análisis armónico nos permite reconciliar el principio cosmológico con la tendencia de la materia a agruparse. En un universo homogéneo e isótropo, los observadores que vivieran en planetas de galaxias distintas medirían, a sus mayores escalas, las mismas propiedades. Verían, por supuesto, diferentes distribuciones de galaxias, a la manera en que divergirían entre sí dos sectores de universo de la inspección de Las Campanas. Mas tras varias inspecciones, o una sola de magnitud suficiente, ambos observadores medirían las mismas fluctuaciones estadísticas. Igual que las del sonido de una cascada, las fluctuaciones podrían describirse mediante el espectro de potencia.

Conforme siguen su curso la expansión y evolución del universo, varios procesos físicos modifican el espectro de potencia de la estructura a gran escala. Los cosmólogos sospechan que, al poco de la gran explosión, ciertas fluctuaciones mecanocuánticas crearon el espectro de potencia inicial. A finales de los años sesenta, Edward R. Harrison, físico inglés, y Yakob B. Zel'dovich, ruso, dedujeron la configuración de ese espectro de potencia primigenio. Se trata de una ley exponencial, cuya forma funcional se expresa en la razón de frecuencia al inverso del cubo de la potencia; por tanto, un espectro tridimensional de ruido rosa.

Harrison y Zel'dovich razonaron que la mayoría de las fuerzas naturales, gravedad incluida, carecían de una escala de longitud intrínseca; eran leyes exponenciales. En consecuencia, el espectro de potencia inicial tenía que ser una ley exponencial en la frecuencia; no se singularizaría, pues, ninguna escala de longitud determinada. Barruntaron también el papel del tamaño del horizonte en la evolución del universo. Por tamaño del horizonte se entiende la distancia recorrida en el universo por un rayo de luz desde la gran explosión hasta el momento considerado. Puesto que la influencia de la gravedad se propaga a la velocidad de la luz, dos puntos del universo pueden interactuar gravitatoriamente sólo si



3. LOS RUIDOS BLANCOS Y ROSAS nos rodean. El ruido blanco, el chisporroteo que se oye en una radio o una televisión mal sintonizadas, es aleatorio. El sonido fluctúa de un instante al siguiente sin patrón alguno (*arriba*). El ruido rosa, el sonido de una cascada o de las olas en la playa, es fractal (*abajo*). La diferencia se refleja en los espectros de potencia (*gráficos a la derecha*): el ruido blanco tiene la misma potencia en todas las frecuencias, mientras que el rosa reparte más potencia en los bajos que en los agudos, en proporción inversa a la frecuencia.

les separa una distancia menor o igual al tamaño del horizonte. Conforme el universo envejece, aumenta el tamaño del horizonte. Tamaño que define, por tanto, una escala de longitud natural en referencia a la cual puede operar la gravedad.

Harrison y Zel'dovich percibieron que, si el espectro de ley exponencial de partida no hubiese sido exactamente el inverso del cubo de la frecuencia, sólo habría podido ocurrir dos cosas. En el caso de una ley exponencial más drástica —el inverso de la cuarta potencia, por ejemplo—, las fluctuaciones a escalas muy pequeñas habrían sido mayores. Al calcular las fluctuaciones de la densidad en los primeros tiempos del universo, cuando el tamaño del horizonte era limitado, hallaron que muchas regiones habrían adquirido tal densidad de materia, que tendrían que haber caído desplomadas sobre sí mismas enseguida, sembrando el universo de agujeros negros. Por suerte, no fue así. Nuestra mera existencia descarta un espectro de potencia de ese estilo. En el otro extremo, si la ley exponencial hubiese sido más llana, la densidad habría sufrido luego, a grandes escalas, fluctuaciones ingentes; esa clase de fluctuaciones no existe.

Aunque el razonamiento convence a los cosmólogos, no explica por qué se produjo ese espectro concreto. La inflación cosmológica ofrece una explicación; fue uno de los éxitos que tuvo en sus comienzos y una de sus pocas consecuencias contrastables.

El espectro de potencia del universo difiere hoy bastante del espectro de Harrison-Zel'dovich primigenio. La gravedad ha ampliado las fluctuaciones iniciales y hecho que nazcan macroestructuras, como los cúmulos de galaxias. Antaño, se intensificaba o demoraba el crecimiento de las fluctuaciones a escalas concretas según la materia o la radiación dominasen el universo y según las partículas elementales fuesen ligeras y veloces o pesadas y lentas. Los cosmólogos tienen ante sí el reto de determinar cómo evolucionó el espectro de potencia inicial hasta convertirse en el que observamos hoy. A partir de la distribución de galaxias y de la radiación del fondo cósmico de microondas se ha empezado a recoger datos suficientes con los que refrendar las teorías.

Los modelos de materia oscura fría aportan la explicación más difundida y aceptada del nacimiento de las estructuras. Se parte de la premisa según la cual la mayor cantidad de la materia del universo corresponde a un tipo de partícula bastante pesada y oculta a la vista. Es "fría" porque, debido a su masa, se mueve despacio. La partícula, que interactuaría con la materia corriente sólo por medio de la fuerza de la gravedad, podría dar cuenta, además, de la masa que falta en las galaxias y cúmulos galácticos.

Nuestra inspección astronómica se desviaba del modelo de la materia oscura fría a escalas de alrededor de 600 millones de años luz. Un resultado sorprendente. A escalas menores, las predicciones del modelo concordaban con nuestros hallazgos. Había algo extraño tras las escalas grandes. Los trabajos de inspección anteriores habían ya insinuado la existencia de esa discrepancia. Al estudio de Las Campanas le ha correspondido validarlo. A partir de la magnitud de la desviación y del tamaño abarcado en el estudio hemos calculado que la probabilidad de que se deba al mero azar es de uno en varios miles.

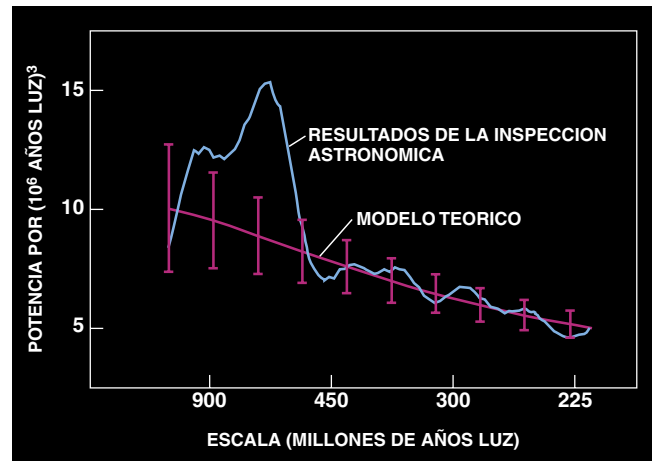
La desviación puede, y ello reviste sumo interés, remontarse hasta las macroestructuras observadas en la

distribución de galaxias. Esas estructuras están definidas en los mapas galácticos por fronteras tajantes, filamentos y vacíos. Las mayores abrazan unos tres mil millones de años luz, varias veces el tamaño de la Gran Muralla. La asociación de estas murallas y vacíos con la desviación en el espectro de potencia constituye un descubrimiento clave en el trabajo de inspección de Las Campanas. Quiere ello decir que, a esta escala, la distribución de galaxias no puede quedar bien especificada mediante las matemáticas del ruido aleatorio. Otros procesos físicos tienen que haber impreso esa escala característica en las fluctuaciones de densidad.

Esa incompatibilidad es la que, en realidad, posibilita que podamos denominar estructuras a las paredes y los vacíos, sin menoscabo de exactitud. Con un proceso ruidoso puro aparecerían de vez en cuando, por azar, murallas y vacíos, pero serían hartos menos frecuentes, en coherencia con la estadística del ruido. No serían estructuras genuinas, sino fluctuaciones estadísticas o superposiciones aleatorias.

¿Qué originaría las murallas y los vacíos inmensos? Podría apostarse por la gravedad, si no fuera porque hace que las fluctuaciones de una escala menor desaparezcan más deprisa; en escalas menores la gravedad congrega antes la materia involucrada. Si la gravedad fuera la causa, el agrupamiento de las galaxias debería haber comenzado a escalas pequeñas y haberse generalizado a otras mayores. A lo largo de los últimos veinte años se ha privilegiado este proceder de abajo arriba, o agrupamiento jerárquico, para justificar la estructuración a escalas menores de unos 150 millones de años luz. Pero las desviaciones encontradas en nuestro estudio empiezan a aparecer a escalas mucho mayores. El agrupamiento jerárquico seguiría valiendo en las pequeñas, pero no puede explicar las murallas y vacíos de las mayores.

Se han presentado varias hipótesis. Ninguna de ellas encaja con los diversos tipos de datos disponibles. Se defiende, por ejemplo, el predominio de la materia oscura caliente, en cuyo marco el universo estaría dominado por partículas ligeras y veloces, como los neutrinos. Si así fuese, la formación de estructuras progresaría de arriba



4. LOS ESPECTROS DE POTENCIA del cosmos, medidos en el trabajo de inspección astronómica de Las Campanas (línea azul), siguen la predicción del modelo de la materia oscura fría (rosa). Pero la potencia aumenta drásticamente en las escalas de 600 millones a 900 millones de años luz. Esta discrepancia significa que el universo se muestra más propenso a las agrupaciones en esas escalas de lo que pueden explicar las teorías actuales.