

INVESTIGACION *y* CIENCIA

DICIEMBRE 2004
5,50 EURO

Edición española de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

UN UNIVERSO DE DISCOS

LA INTERNET
DE LAS COSAS

EMMY NOETHER

EL CONTROL
DE LOS HURACANES

LOS INTRONES



3

HACE...

50, 100 y 150 años.

4

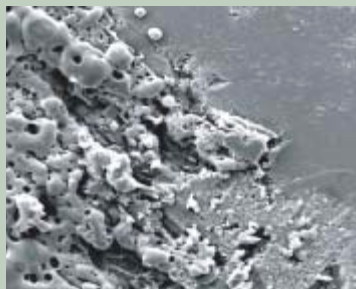
APUNTES

Comportamiento...
Física...
Endocrinología...
Bioquímica...
Neurología...
Paleoantropología.

34

CIENCIA Y SOCIEDAD

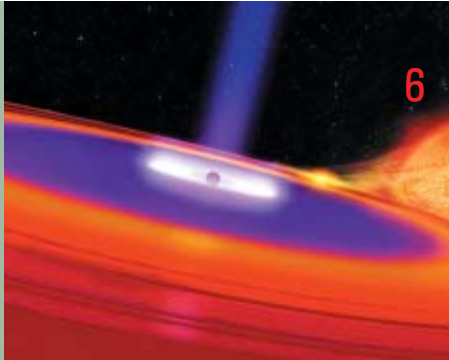
Obesidad, base genética...
La limpieza de la piedra...
Oncogénesis...
Definición de vida,
¿qué son los virus?



40

DE CERCA

Las flores del mar.



Un universo de discos

Omer Blaes

Nuevas investigaciones han descubierto la dinámica de los discos de gas que giran alrededor de estrellas jóvenes y gigantescos agujeros negros.

14

La formación de los supercontinentes

J. Brendan Murphy y R. Damian Nance

Según una hipótesis, se constituyen de acuerdo con un modelo de acordeón, vale decir, de aproximación y distanciamiento; a tenor de otra, los continentes se separan y se desplazan por el planeta hasta reunirse, de nuevo, en el lado opuesto.

26



Los intrones

John S. Mattick

Se creía que en la regulación de los genes de los organismos complejos sólo intervenían proteínas. Sin embargo, un sistema regulador hasta ahora desconocido, basado en el ARN, podría encerrar las claves del desarrollo y la evolución.

50

La Internet de las cosas

Neil Gershenfeld, Raffi Krikorian y Danny Cohen

Los principios que dieron vida a Internet nos están llevando a una red de nuevo tipo, que interconecta dispositivos de uso diario: la "Internet-0".

56

Orión

César Briceño Avila

Los sondeos del cielo nocturno con detectores digitales panorámicos están revolucionando la astronomía. Desde los Andes venezolanos, un gran "ojo electrónico" contribuye a revelar las primeras fases de la vida de las estrellas.



42

El control de los huracanes

Ross N. Hoffman

¿Se pueden moderar o desviar las grandes tempestades tropicales, huracanes, tifones y ciclones?



82

JUEGOS MATEMÁTICOS

Calculistas prodigiosos, por Juan M.R. Parrondo

84

TALLER Y LABORATORIO

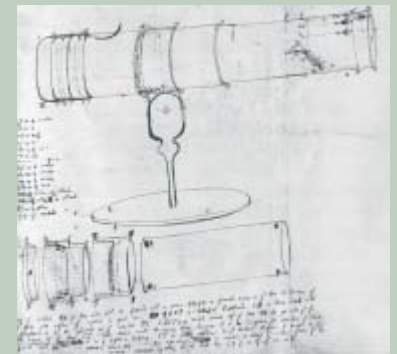
El péndulo de Foucault, por Marc Boada



87

LIBROS

Newton, matemática y *experimentum crucis*.



66

El cristalino

Ralf Dahm

La investigación del cristalino ha abierto la posibilidad de un tratamiento preventivo de las cataratas. Menos esperada era la luz que arroja sobre las enfermedades neurodegenerativas.



90

IDEAS APLICADAS

Las velas y la corona de adviento, por Werner Gans



74



Emmy Noether

Renata Tobies

La matemática más importante del siglo xx hubo de sortear, a lo largo de su vida, los obstáculos con que fue encontrándose por su condición de mujer y sus orígenes judíos. Fue la primera mujer que crearía en Alemania una escuela científica.

92

ÍNDICE 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
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

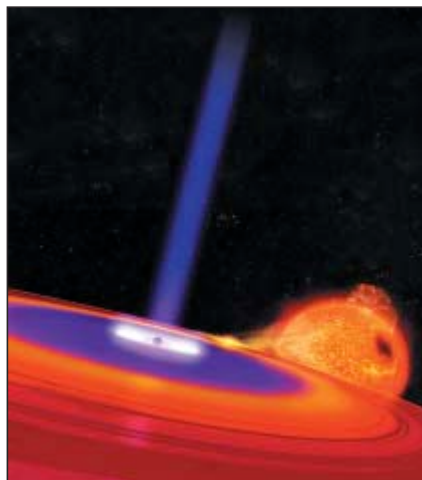
Madrid:
GM Exclusivas Publicidad
Menorca, 8, Bajo, Centro Izda.
28009 Madrid
Tel. y Fax 914 097 046

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 Osorio: *Un universo de discos*; Sònia Ambrós: *La formación de los supercontinentes*; Felipe Cortés: *Los intrones*; Manuel Puigcerver: *El control de los huracanes*; Luis Bou: *La Internet de las cosas*; Esteban Santiago: *El cristalino*; Emilio Elizalde: *Emmy Noether*; J. Vilardell: *Hace...*, y *Apuntes*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*; Jürgen Goicoechea: *Ideas aplicadas*



Portada: Don Dixon

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	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

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

Difusión controlada

Copyright © 2004 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2004 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

KWASHIORKOR. «En 1929, una doctora inglesa que trabajaba entre las tribus de la Costa de Oro, en África Occidental, dio con una enigmática enfermedad. Parecía ésta atacar sólo a niños de corta edad y solía resultar letal. El doctor Cicely Williams creyó que la causa se hallaba en la malnutrición; le dio el nombre de kwashiorkor, tal como la llamaba la tribu Ga. En 1944 se descubrió que el kwashiorkor respondía a una deficiencia proteínica. En las zonas templadas del planeta, donde se concentran la mayor parte de los hospitales y de la investigación biológica, la malnutrición se suele relacionar con deficiencias vitamínicas más que proteínicas. Ello resulta comprensible, pues en las zonas templadas el alimento básico es el cereal, producto rico en proteínas pero pobre en ciertas vitaminas. Una serie de investigaciones y debates, en su mayoría por iniciativa de la Organización Mundial de la Salud y la Organización de Alimentación y Agricultura, muestran que el kwashiorkor se manifiesta probablemente en todos los países tropicales, donde la dieta se basa en cultivos pobres en proteínas (sobre todo frutas y verduras).»

...cien años

PLANTAS MEDICINALES. «EE.UU. cultiva un buen número de sus plantas medicinales, pero son tan adictos a los fármacos que cada año pagan a otros países una cuenta de importaciones de quince millones de dólares. Los primitivos pioneros de este país consideraban el cultivo de hierbas medicinales de suma importancia; pero, al desarrollarse la medicina, y en especial con la expansión de las ubicuas farmacias, aquella práctica cayó en desuso. Las plantas medicinales podían conseguirse con mayor facilidad, y por un módico precio, en las apotecas. Hoy en día, la mayor parte de las plantas medicinales comunes que crecen en el campo se desprecian. En algunos casos, los agricultores destruyen esas plantas silvestres como si se tratara de malas hierbas. Entre esas desdeñadas plantas oficinales se cuentan el diente de león, la grama del norte y la romaza.»

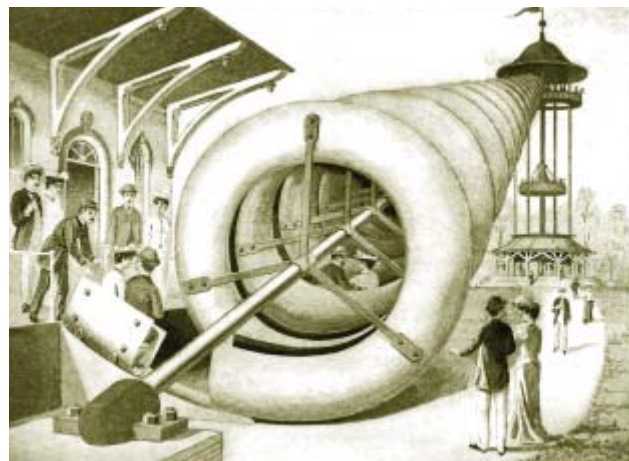
CALÍGULA. «El lago Nemi, que se halla en los montes Albanos, al sur de Roma, es una pequeña y hermosa extensión de agua que llena la cuenca formada por un cráter extinto. Reza una tradición local que en el lago se hundió una gran embarcación perteneciente a un emperador romano. En la presente investigación, a cargo de los señores Borghi y Vittorio Malfatti, se emplearon buzos expertos para explorar el fondo. Se hallaron dos grandes naves, ambas casi hundidas en la arena. La mayor de ellas mide unos 70 metros de largo y 24 de ancho. Por su gran tamaño, mayor que el de las galeras de guerra, y su excepcional anchura, fueron sin

duda utilizadas por uno de los emperadores, tal vez Calígula, como barcasas de recreo.» [Nota de la redacción: Los cascos se recuperaron cuando el lago se drenó en 1924, pero el fuego los destruyó en 1944.]

UNA ATRACCIÓN DE FERIA. «Un ingenioso inventor ha recuperado el antiguo principio del tornillo de Arquímedes [véase la ilustración] y transformado en artefacto de diversión para parques de atracciones, ferias y lugares similares. Un eje central soporta una conducción espiral. Por dentro de ésta viajan carros sobre raíles; cada uno transporta dos o tres personas. Los pasajeros experimentan la insólita sensación de ver girar rápidamente en su torno un túnel espiral, mientras avanzan lentamente y en línea recta hacia la cima de la torre. El artefacto ofrece gran diversión.»

...ciento cincuenta años

FÍLTRESE EL AGUA. «Los vecinos de Boston han estado sufriendo durante algún tiempo un agua de sabor ofensivo. El presidente de la Comisión de Aguas —Thos. Wetmore— declara que, hasta donde ha llegado la investigación, las impurezas del agua son por completo de origen vegetal. Dicho comunicado, suponemos, pretende calmar toda aprehensión acerca de la contaminación del agua por el vertido de sustancias animales. Según la Comisión de Aguas, las lluvias habidas en septiembre y octubre arrastraron hacia el lago numerosas impurezas vegetales, pero podría resultar que el desagradable sabor del agua lo hayan causado minúsculos animáculos, algunos de los cuales, al morir, contaminan fuertemente el agua. Es nuestra opinión que todas las aguas de lagos y ríos que se empleen para abastecer ciudades debe filtrarse. Ello puede hacerse, sin grandes gastos, haciéndola pasar a través de lechos filtrantes de grava, arena y arcilla.»



El tornillo de Arquímedes transformado en atracción de feria, 1904.

COMPORTAMIENTO

Carroñeros de las profundidades

Cuando una ballena muere, los carroñeros de las profundidades devoran la carne del cadáver. Sin embargo, estudiando los huesos de una ballena en la bahía de Monterrey, en California, se han descubierto dos especies de un nuevo género de anélidos, *Osedax*, que se alimentan de los esqueletos. Las hembras de estos gusanos tubulares, tocadas con una cresta en forma de plumas rojas, hinchadas con huevos, hundan unas raíces verdes en el hueso. Parece que en esas raíces viven simbióticamente unas bacterias que, al digerir los ricos depósitos aceitosos de los huesos, mantienen a la hembra. Docenas de machos microscópicos de gusano, portadores de esperma, moran en el tubo de la hembra, alrededor del oviducto. Los descubridores de estos seres los comparan a los dientes de león: diseminan su descendencia para que las corrientes oceánicas las lleven hasta una ballena recién muerta.

—J.R. Minkel



Una nueva especie de gusano tubular, *Osedax frankpressi*, devora los huesos de las ballenas muertas.

INSTITUTO DE INVESTIGACION DEL ACUARIO DE MONTERREY, 2003

FISICA

Una ley que apenas lo es

Justo antes de recibir el premio Nobel de Física de este año, Frank Wilczek reflexionaba en *Physics Today* sobre el principio de la física que más quebraderos le dio durante sus días de estudiante. No se trata de una compleja ecuación, sino de la más sencilla de las igualdades físicas: $F = ma$. Los filósofos de la ciencia acostumbran considerarla un mero esquema, una plantilla o principio-guía. A Wilczek, de mentalidad matemática, le despistaba, cuenta, esa laxitud. Para él, una ley tenía que ser un algoritmo; la segunda ley de Newton, en cambio, se parecía más al lenguaje ordinario. La noción de fuerza no desempeña ningún papel ni en la mecánica cuántica, ni en las teorías de campos, clásicas o cuánticas, como la relatividad general y el

modelo estándar. La propia mecánica clásica puede formularse, mediante la noción de lagrangiano, sin que la fuerza desempeñe un papel primario. Wilczek explica por qué seguimos recurriendo, sin embargo, a la noción de fuerza: viene a ser como un lenguaje de alto nivel en informática, que encierra en sí toda la inasequible complejidad del lenguaje que entiende la máquina, o la naturaleza; la simplificación es posible porque la materia, en circunstancias ordinarias, permanece en un estado estable y sólo varían unos pocos de sus grados de libertad. Por otra parte, la fuerza tiene la ventaja psicológica de que extrapola lo que experimentamos en nuestros músculos. En buena medida, concluye, si seguimos hablando de ella es por la inercia... intelectual.

ENDOCRINOLOGIA

Como si estuviese embarazado

Muchos factores —sociales, hormonales— pueden hacer que un hombre que va a ser padre experimente algunos de los efectos secundarios de un embarazo: náuseas, aumento de peso, cambios del estado de ánimo, hinchazón. En las poblaciones occidentales modernas, las estimaciones de la prevalencia de este síndrome van del 20 al 80 por ciento. Se han enunciado diversas hipótesis. Para empezar, el cambio en la forma de vida de uno de los miembros de una pareja puede afectar al otro: los antojos y apetito crecido de la embarazada pueden llevar al hombre a ganar peso, al ardor del estómago y a la indigestión. Los sentimientos de la madre oscilan a veces entre la frustración de sentirse impedida a una desbordante alegría; quizás induzcan en el padre celos por no poder traer al mundo un hijo, una sensación de culpa por haber causado esa transformación, no siempre bienvenida, en su compañera o un egoísta



querer atraer la atención hacia sí. También puede que contribuyan las alteraciones de la actividad sexual y la vida social.

Estudios recientes nos han enseñado que algunas de las hormonas que fluctúan en las embarazadas quizá se alteren también en los futuros padres. Los hombres con niveles altos de prolactina, que causa la lactación en las mujeres, informan de más síntomas secundarios del embarazo. Su prolactina paterna llega a un máximo justo antes del parto. Los niveles de cortisona (hormona esteroidea segregada como reacción

al estrés) y los esteroides sexuales estradiol y testosterona cambian también en el padre, aunque no de manera tan señalada como en la madre. Pero no sabemos si estos cambios hormonales son la causa de los comportamientos observados o sólo coinciden con ellos. Tienta creer lo primero, pero los factores sociales y emocionales pueden influir otro tanto.—Katherine E. Wynne-Edwards

SARA CHEN

BIOQUIMICA

Enzimas de función variable

Las enzimas pueden ejercer varias funciones, cambiando al instante de una a otra según la posición que ocupen dentro de la célula. Se ha estudiado este fenómeno en las desaturasas de *Arabidopsis*. Desaturan los lípidos eliminando átomos de hidrógeno de las cadenas de ácidos grasos para crear enlaces moleculares. Las células vegetales pueden marcar las desaturasas para que pasen a los citoplastos, donde tiene lugar la fotosíntesis. Sin las marcas, entraban en el retículo endoplasmático, donde establecían enlaces en distintos lugares a lo largo de la cadena lipídica. Alrededor de un cuatro por ciento de las familias proteínicas de la *Arabidopsis* presentan variaciones en las marcas; cuantía considerable, que da a entender que las enzimas multifuncionales podrían ayudar a los organismos en su adaptación a los cambios del entorno. Quizá quepa aprovechar este fenómeno para obtener cultivos con grasas menos saturadas, que son más saludables.

—Charles Choi



CÉSAR LLAVE; FUENTE: JAMES C. CARRINGTON, UNIVERSIDAD DEL ESTADO DE OREGÓN, EE.UU.

NEUROLOGIA

Dislexia cultural

Los niños que aprenden lenguajes alfabéticos y son disléxicos encuentran dificultades a la hora de asociar las letras de una palabra con su sonido respectivo. Los escolares chinos han de habérselas ante otro reto: su cerebro debe conectar la sutil disposición de los trazos de cada carácter con su sonido y su significado, una tarea mucho más visual y espacial. Li Hai Tan, de la Universidad de Hong Kong, acaba de descubrir que en el problema que atenaza a los escolares disléxicos se encuentra implicada una zona cerebral distinta de la que interviene en el aprendizaje del alfabeto. Se venía suponiendo que la lectura incorrecta de un texto se hallaba vinculada a una



deficiente actividad de la región temporoparietal izquierda. Allí el cerebro convierte los “grafemas” (símbolos escritos) en “fonemas” (sonidos del habla). Se suponía también un origen biológico universal de la

dislexia para todo tipo de escolares. Sin embargo, nunca se sometió a prueba entre los niños chinos. Tan se sirvió de la técnica de formación de imágenes conocida por resonancia magnética funcional. Y comprobó que los pequeños disléxicos de su país mostraban, comparados con los normales, una menor actividad en su giro medio frontal izquierdo, pero no discrepaban en punto a excitación de la zona temporoparietal izquierda.

PALEOANTROPOLOGIA

Un homínido en los días del *Homo sapiens*

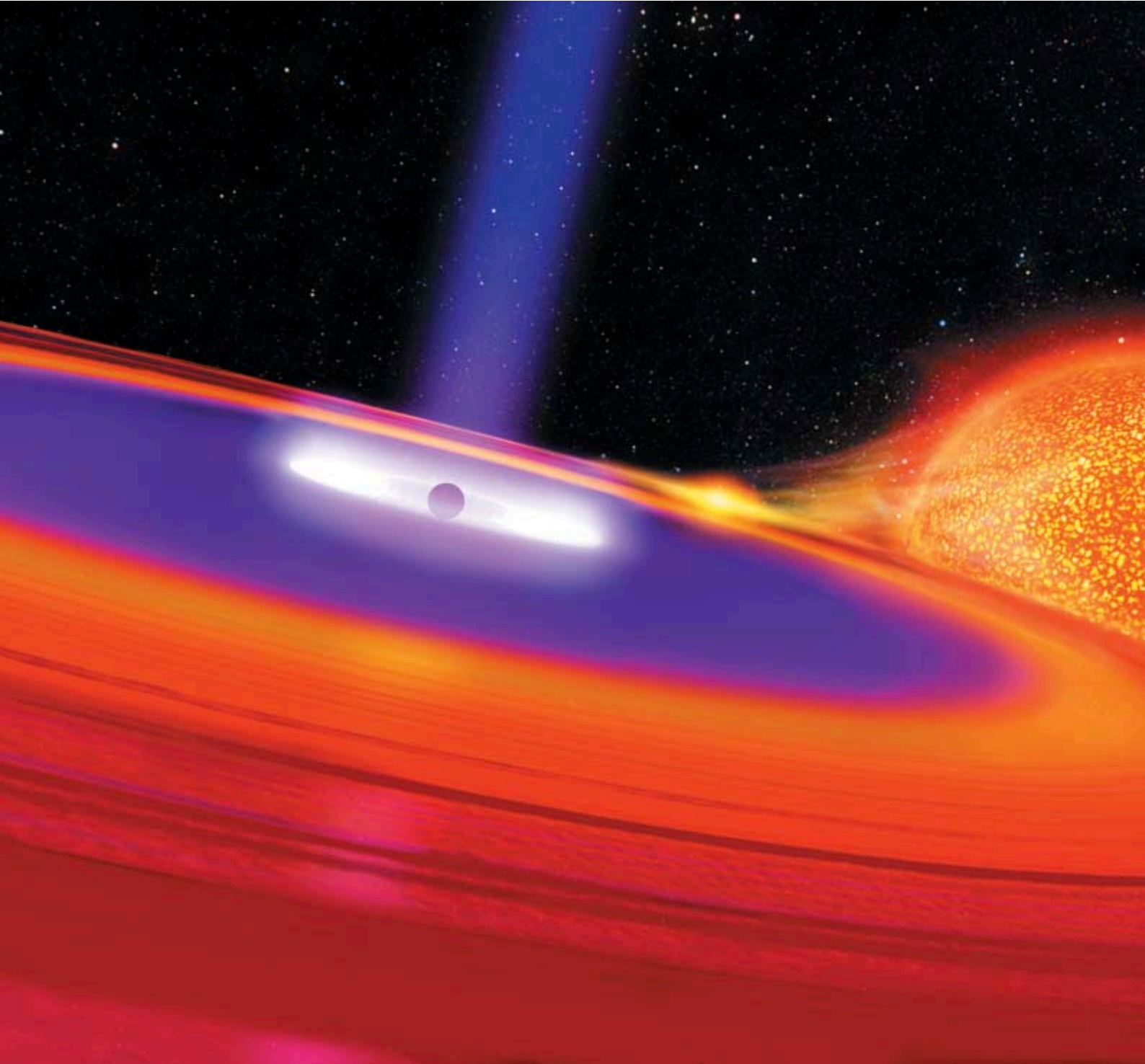
Todos los medios de difusión se han hecho eco del hallazgo espectacular en la isla indonesia de Flores: una nueva especie del género *Homo*, el *Homo floresiensis*. Aquellos homínidos, de apenas un metro de alto, con cerebros del tamaño de un pomelo, vivían aún hace tan sólo 18.000 años. Sus proporciones corporales y cerebrales les asemejan a los mucho más antiguos australopitecos, pero la masticación y deambulación les incluyen en nuestro género. Los descubridores suponen que *H. floresiensis* desciende de *H. erectus*; su pequeñez se debería al limitado suministro de alimentos de la isla. *H. sapiens* llegó a Asia hará unos 35.000 años, cuando debían todavía de sobrevivir, en la cercana Java, poblaciones de *H. erectus*. Durante milenios, pues, tres especies de *Homo* coexistieron en la región (y en Europa discurrían los últimos días de los neandertales). De su interacción, si llegaron a cruzarse por ejemplo, nada se sabe.

—Kate Wong



Homo floresiensis (izquierda) tenía un tamaño mucho menor que el nuestro (derecha).

PETER BROWN



Un universo de discos

DON DIXON



1. UN DISCO DE ACRECIÓN rodea a un agujero negro de un sistema binario de rayos X en esta representación artística. La poderosa gravedad del agujero negro arranca gas de la estrella compañera, una gigante roja. El disco de gas emite cantidades enormes de radiación en rayos X a medida que se enrosca en espiral en su caída hacia el agujero negro. El disco también crea chorros de partículas que salen disparadas desde la región más interna.

Nuevas investigaciones han descubierto la dinámica de los discos de gas que giran alrededor de estrellas jóvenes y gigantes agujeros negros

Omer Blaes

Busquemos en el cielo, durante una noche clara, los planetas que se observan a simple vista: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter, Saturno. Si localizamos tres o más, veremos que se alinean a lo largo de una banda estrecha que describe un gran círculo en el firmamento. Esta banda encierra la eclíptica, el recorrido aparente del Sol a través de las constelaciones del zodiaco en el transcurso de un año. Y si nos fijamos en la lechosa mancha blanca de la Vía Láctea, nos percataremos de que traza otro gran círculo en el cielo.

Estas percepciones geométricas no son accidentales. Los planetas de nuestro sistema solar, incluida la Tierra, se mueven alrededor del Sol en el mismo sentido y casi en el mismo plano (con la excepción de Plutón). Es una prueba directa de que los planetas se formaron en un disco plano, una especie de tabla, cuyo material (gas y polvo) giraba alrededor de un Sol joven. De igual forma, la Vía Láctea —brumosa aglomeración de luz procedente de muchos miles de millones de estrellas— prueba que nuestra galaxia también presenta forma de disco. El sistema solar está inmerso en este disco; por eso parece que la galaxia nos envuelve.

Las estructuras con forma de disco abundan en el universo a escalas muy diversas. Los anillos de Saturno son una elegante muestra cercana a nosotros, pero sólo una: no hay planeta gigante del sistema solar que carezca de anillos. También se han observado discos alrededor de muchas estrellas jóvenes; se los llama discos protoplanetarios porque deben de asemejarse al que dio origen a nuestro sistema solar. En algunos sistemas binarios estelares escapa gas de una de las estrellas de la pareja y lo captura el campo gravitatorio de la otra. Se forma entonces un disco; en su interior, el gas se dirige lentamente hacia la superficie estelar con un apretado movimiento espiral, un remolino. Se cree que también hay estructuras así, o “discos de acreción”, alrededor de los agujeros negros supermasivos del centro de las galaxias. (Por supermasivos hemos de entender aquí de una masa de mil millones de soles.) Pero los discos de mayor tamaño son las galaxias espirales, entre ellas nuestra Vía Láctea, cuyo diámetro abarca más de cien mil años luz.

Dada la ubicuidad de los discos en el universo, entender su naturaleza es una de las cuestiones más relevantes de la astrofísica. Se piensa que los discos de acreción que circundan los agujeros negros supermasivos afectan a la formación y evolución de las galaxias. Y la dinámica de los discos de acreción en torno a estrellas jóvenes podría arrojar nueva luz sobre la historia primitiva de nuestro sistema solar. Gracias a los nuevos desarrollos teóricos y a las modernas simulaciones por computadora, se ha dado no hace mucho con una explicación de la agitada turbulencia que convierte los discos de acreción en fuentes poderosas de energía. Pero existen otros fenómenos que han de explicarse todavía, como los chorros de partículas que con frecuencia manan de los discos. Queda aún mucho que investigar en los miles de millones de discos rotantes que pueblan el universo.

El tiovivo celestial

La rotación de un disco impide que la gravedad lo destruya. Imaginemos que estamos en un tiovivo que gira peligrosamente deprisa. Si no nos agarramos

con fuerza a uno de los caballitos, saldremos disparados a lo largo de una recta tangente al círculo del tiovivo. La tensión de nuestro brazo proporciona con exactitud la fuerza necesaria para que nos movamos en círculo y permanezcamos dentro del tiovivo. La rotación impide el movimiento hacia dentro; haría falta mucho esfuerzo para caminar en dirección al centro del tiovivo. De igual modo, la rotación de la materia de un disco impide que la fuerza de la gravedad lo destruya.

Los objetos que rotan están dotados de momento angular, magnitud que es proporcional a la velocidad de giro del objeto y la distribución de masa alrededor del eje de rotación (cuanto más alejada esté la masa del eje, mayor será el momento angular del objeto). El momento angular reviste importancia fundamental en nuestro análisis de los sistemas rotantes porque, al igual que la energía, es una cantidad que se conserva: no podemos crearla ni destruirla. Un patinador sobre hielo gira alrededor de su eje más rápido al cerrar los brazos sobre sí. Puesto que el momento angular ha de permanecer constante, al concentrarse la masa más cerca de su eje de rotación aumenta la velocidad de giro.

En la conservación del momento angular estriba la razón de que abundan tanto los discos en el universo. Pensemos en una nube de gas que colapsa por el poder atractivo de su propia gravedad. Cualquier agregación de materia del universo rota en una medida u otra; supongamos, pues, que esta nube tiene un momento angular inicial. A medida que vaya contrayéndose, el principio de la conservación del momento angular forzará a la rotación a ser más rápida (*véase el recuadro* “El nacimiento de un disco”). El material de la región ecuatorial de la nube —es decir, en el plano perpendicular al eje de rotación— se desplazará hacia el interior con lentitud creciente a medida que la rotación vaya equilibrando el empuje gravitatorio. El material situado en el eje de rotación caerá en vertical hacia el plano ecuatorial mucho más deprisa. El objeto resultante será un disco sostenido por la rotación.

Se piensa que este proceso explica la formación de discos protoplanetarios alrededor de las estrellas jóvenes, y quizá también la de los discos gaseosos que rodean a los agujeros negros de los centros de las galaxias. Que una galaxia entera se convierta en un disco depende de qué ocurra primero. Las galaxias espirales se constituyen en un gas al que la rotación ha conseguido sostener antes de que las masas del gas se contraigan en estrellas. Pero si las estrellas nacen del

gas antes de que la nube galáctica se concentre en un disco, las estrellas mantendrán sus órbitas alrededor del centro galáctico y la galaxia será elíptica. Por lo general, las galaxias no se crean aisladas; los choques y fusiones galácticas complican mucho el proceso. Algunas de las galaxias elípticas, así como los bulbos y halos de las espirales, pueden haberse originado en choques de ese tipo.

Los discos de acreción aparecen también en sistemas de estrellas binarias cuando la gravedad de una de las estrellas del par (por ejemplo, una enana blanca, densa y compacta) atrae el gas de su compañera (de ordinario, una estrella menos compacta y mayor). Este gas contiene una gran cantidad de momento angular procedente del movimiento orbital de las dos estrellas alrededor del centro de masas común, por lo que no puede caer directamente hacia la enana blanca: el gas terminará formando un disco alrededor de la enana.

Así como el año de Mercurio es bastante más corto que el terrestre —unos 88 días—, el material de las regiones internas del disco necesita menos tiempo para completar una órbita que el material del exterior. Este gradiente de los períodos orbitales provoca una cizalladura: las porciones de material a distancias del centro del disco ligeramente diferentes se deslizarán entre sí. De haber alguna fricción en el material, frenará la rotación de las regiones internas, más rápida, y acelerará la de las externas, más lenta. Se transportará de esa forma momento angular del interior al exterior del disco. En consecuencia, la materia de las regiones internas perderá apoyo rotacional en favor de la gravedad y caerá al centro. El resultado global es una espiral de materia que cae hacia la estrella o agujero negro centrales.

A medida que la materia cae en espiral hacia las órbitas interiores del disco de acreción, deberá ceder energía potencial gravitatoria. Parte de esa energía se invertirá en imprimir al material una mayor velocidad orbital mientras cae; el resto se disipará, por la fricción, convertido en calor u otras formas de energía. De esa forma, el material de un disco alcanza temperaturas muy elevadas y emite cantidades ingentes de radiación visible, ultravioleta y de rayos X. La energía cedida puede hacer de los discos de acreción fuentes formidables de energía.

Este fenómeno alertó a los astrónomos de la existencia de los agujeros negros. Los agujeros negros no emiten luz de suyo, pero los discos de acreción a su alrededor sí la emiten. (Esta afirmación tan general ignora la radiación de Hawking, una emisión indetectable salvo en los agujeros negros más pequeños; todavía no se la ha observado en ningún punto del universo.) De acuerdo con la teoría general de la relatividad de Einstein, la energía cedida por un disco de acreción alrededor de un agujero negro debería equivaler casi al 10% de la energía en reposo del material (igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz). Esta cantidad, espectacular, decuplica de lejos la energía generada por el propio material si sufriese reacciones termonucleares, como en las estrellas o las bombas de hidrógeno. No obstante, esta predicción se ajusta a las observaciones de

Resumen/Discos de acreción

- Los discos de gas se encuentran por todas partes: alrededor de las estrellas recién nacidas, en sistemas de estrellas binarias y en el centro de las galaxias. De ahí el especial interés por comprender su dinámica.
- Para explicar la radiación procedente de los discos, se parte de un supuesto: son turbulentos. Se cree que la “inestabilidad magnetorrotacional” es el origen de esa turbulencia.

la radiación de los cuásares, objetos muy luminosos cuya luz debió de proceder de discos de acreción alrededor de agujeros negros supermasivos en los centros de las galaxias tempranas. Cuando se calcula la energía total irradiada en el transcurso del tiempo por todos los cuásares de una región determinada del espacio, se comprueba que vale aproximadamente un 10% de la masa de todos los agujeros negros supermasivos observados en una región equivalente, multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz.

Turbulencia en el espacio

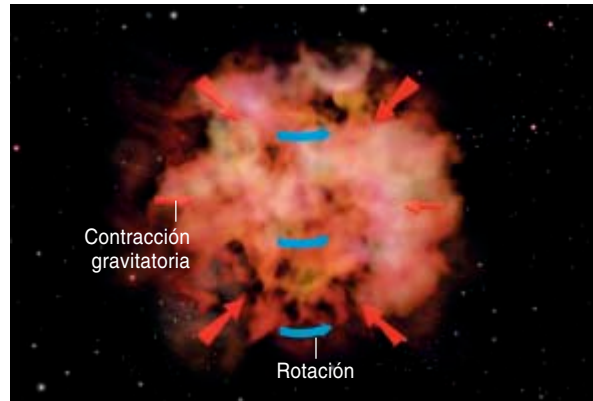
Pero, ¿cuál es la naturaleza de esa fricción en el interior de los discos de acreción, capaz de generar tales energías? Quizá, las partículas que constituyen el material del disco sufran colisiones en las que intercambian pequeñas cantidades de energía y momento angular. Advertimos ese mecanismo en los anillos de Saturno: cuando las piedras y rocas que los pueblan chocan, pierden energía en forma de calor y se transfiere momento angular hacia el exterior. Los fluidos comunes actúan de manera similar: podríamos asociar los anillos de Saturno a un fluido viscoso donde en vez de moléculas chocan piedras. Con las colisiones los anillos tienden a expandirse radialmente, pero las lunas de Saturno actúan de reservas de momento angular y los mantienen dentro de sus límites.

Por desgracia, este proceso tan simple no basta para explicar la actividad de muchos otros tipos de discos de acreción. En los discos de los sistemas binarios o de los centros galácticos, los choques entre partículas generan un flujo de masa demasiado pequeño, en varios órdenes de magnitud, para la luminosidad tan brillante observada. Pudiera ser que ondas espirales de gran escala del disco, parecidas a los brazos espirales de las galaxias, acelerasen el flujo de materia. Así como las ondas de sonido transportan la energía a través del aire, las ondas espirales llevarían energía y momento angular hacia el exterior, facilitando la acreción de materia hacia el interior. Se han encontrado indicios de estructuras espirales en los discos de acreción de algunos sistemas binarios. Pero esas ondas espirales no parecen tener la magnitud necesaria para que la caída de materia ocurra a un ritmo suficiente capaz de generar la radiación medida en los discos.

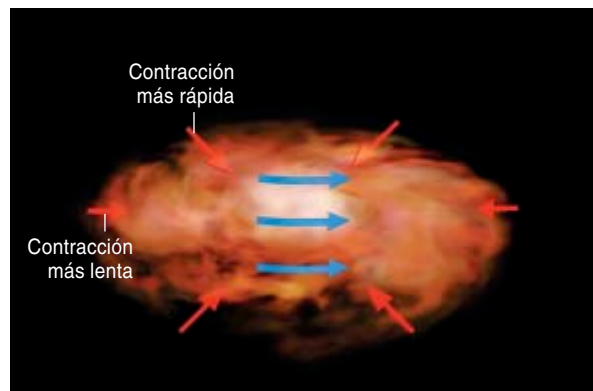
Muchos creen, no obstante, que la turbulencia es el mecanismo de fricción más extendido en los discos de acreción. Aceleraría el flujo de materia mediante choques a gran escala y muy violentos. Cuando el agua fluye por una tubería, la viscosidad del líquido aumenta la velocidad del flujo en el centro y la disminuye cerca del borde interior de la tubería. Si se fuerza al agua a ir más deprisa, las diferencias de velocidad aumentan y, con el tiempo, desestabilizan el flujo, haciéndolo turbulento y caótico. Puesto que los discos de acreción contienen también flujos con gradientes muy notables, se pensó, en los años setenta, que los discos debían de exhibir bastante turbulencia. Sin embargo, cuando se intentó reproducir el fenómeno mediante la aplicación de las ecuaciones básicas de los fluidos y simulaciones por ordenador, no hallaron prue-

EL NACIMIENTO DE UN DISCO

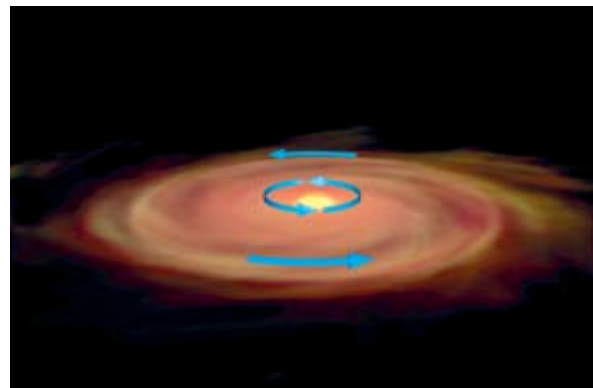
Se debe al principio de la conservación del momento angular el que los discos abundan en el universo. El momento angular es proporcional a la velocidad de rotación de un objeto y a la distribución de su masa en torno al eje de giro. Puesto que el momento angular ha de conservarse, un objeto rotante que se contraiga girará más rápido a medida que disminuye su envergadura.



Una nube de gas interestelar gira lentamente alrededor de su eje; se está desplomando sobre sí misma en razón de la fuerza atractiva de su propia gravedad. A medida que va colapsando, gira más deprisa.



El gas del plano ecuatorial de la nube se desplaza hacia el interior más despacio porque la rotación empieza a contrarrestar la gravedad. El gas suprayacente y subyacente al plano cae a mayor velocidad.



Con el tiempo, toda la materia de la nube cae hacia el plano ecuatorial, donde la rotación sostiene el gas: el movimiento contrarresta la gravedad.

Una galería de discos y chorros

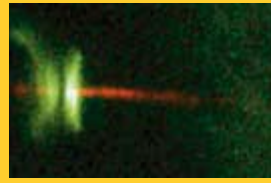
Se han visto discos por todo el universo, tanto alrededor de estrellas jóvenes en nebulosas de nuestra galaxia como en los centros de galaxias a millones de años-luz de distancia.

Discos protoplanetarios

En la nebulosa de Orión, a unos 1500 años-luz de la Tierra, un disco protoplanetario rodea una estrella que existe desde hace apenas un millón de años. El disco tiene un diámetro de unos 40.000 millones de kilómetros (tres veces el tamaño de nuestro sistema solar) y está compuesto por un 99 por ciento de gas y un 1 por ciento de polvo. Cuando este disco evolucione, posiblemente forme un sistema planetario como el nuestro.



Chorro de una estrella al nacer



HH-30, una estrella recién nacida a unos 450 años-luz de la Tierra, está sumergida en un disco protoplanetario (*aparece de canto a la izquierda de la figura*). En direcciones opuestas, a ambos lados del centro, se ven dos chorros de gas que se mueven a unos 960.000 kilómetros por hora. El campo magnético de la estrella podría estar canalizando el gas.

Galaxia espiral

NGC 7331, galaxia espiral a unos 50 millones de años-luz de la Tierra, es un disco parecido a nuestra Vía Láctea. Los datos obtenidos por el Telescopio Espacial Spitzer, un nuevo observatorio que analiza la radiación infrarroja, indican la presencia de un agujero negro supermasivo en el núcleo de esta galaxia.



Chorro de una galaxia activa

El núcleo activo de M87, galaxia elíptica gigante a unos 50 millones de años-luz de la Tierra, emite un chorro de electrones de alta velocidad que se extiende hasta unos 6500 años-luz del centro galáctico. Un disco de acreción que rota alrededor del agujero negro supermasivo envía la mayor parte de su energía al chorro.



bas de que en los discos de acreción se desarrollaran turbulencias.

Se debate todavía la razón de este resultado poco alentador. Pudiera ser que las simulaciones por ordenador fueran incorrectas; cabe también que la analogía con el flujo en una tubería no resulte apropiada y que un sistema rotante del estilo de un disco de acreción presente diferencias intrínsecas. Se han realizado experimentos en los laboratorios para buscar las turbulencias en flujos semejantes a los de los discos de acreción, pero de nuevo los resultados están sujetos a discusión. A pesar de que en estos experimentos se han observado turbulencias ocasionales, quizá se debiesen a efectos no presentes en los discos de acreción reales.

Pese a ello, los astrofísicos persisten en su creencia de que los discos son turbulentos. Con esta hipótesis de partida, la mayoría ha adoptado unas rudas ecuaciones para modelar los efectos de la turbulencia en los discos; las concibieron en 1973 Nikolai Shakura y Rashid Sunyaev. Cortando así el nudo gordiano, se han elaborado modelos teóricos de los discos de acreción que se comparan con las observaciones reales. Este método de trabajo ha cosechado varios éxitos en los últimos años. Por mencionar uno: ciertos discos de estrellas binarias experimentan en ocasiones un aumento temporal de su brillo (las novas, explosiones de luz procedentes de un disco de acreción que rodea a una enana blanca en un sistema binario, corresponden a este fenómeno). Se ha conseguido demostrar que tales incrementos transitorios de luminosidad están desencadenados por una inestabilidad en el disco que provoca que la materia fluya muy rápidamente hacia el interior.

A pesar de este logro, la aproximación de Shakura-Sunyaev es en realidad una tapadera de nuestra ignorancia. Las diferencias entre las predicciones de los modelos y las observaciones podrían deberse simplemente a que las premisas hoy aceptadas acerca de la turbulencia de los discos sean erróneas. Por otra parte, la turbulencia quizá presente otras consecuencias observables, aparte del transporte del momento angular por el disco, pero no resulta posible predecir cuáles sin aclarar los procesos que las originarían.

Un circuito astronómico

Por fortuna, en 1991 se produjo un espectacular avance en el problema de la turbulencia. Steven Balbus y John Hawley, de la Universidad de Virginia, se percataron de que si la materia de un disco de acreción conduce muy bien la electricidad y está magnetizada aunque sólo sea un poco, el campo magnético provocará una inestabilidad en el disco. La inestabilidad termina sin remedio en un flujo turbulento que transporta momento angular hacia fuera y disipa energía gravitatoria. Hoy día se piensa que este fenómeno, la “inestabilidad magnetorrotacional” (IMR), desempeña una función esencial en muchos discos de acreción.

Las líneas del campo magnético en un medio muy conductor se desplazan con el flujo. Allí donde vaya el material se desplazará el campo magnético. Las líneas de campo también ejercen fuerzas sobre el medio. En concreto, ejercen tensiones cuando se doblan o curvan, como las gomas elásticas.

Para comprender el efecto de las líneas del campo magnético, imaginemos dos partículas en órbita alrededor de la Tierra, amarradas entre sí por un resorte