

MUY INTERESANTE

EDICION COLECCIONISTA

EL ABC DE LA ASTROFÍSICA

UNA GUÍA COMPLETA PARA ENTENDER
EL UNIVERSO Y SUS ENIGMAS

ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

O escanea el código QR:





SHUTTERSTOCK

El conocimiento que la humanidad tiene sobre nuestro entorno celeste inmediato gracias a la exploración espacial ha permitido comprender y predecir los fenómenos astronómicos que nos rodean, aunque todavía queda mucho que aprender...

**«Mira a las estrellas y
no a tus pies. Intenta
entender qué es lo que
ves y pregúntate qué es lo
que hace que el universo
exista. Ten curiosidad»**

Stephen Hawking (1942-2018),
físico teórico, astrofísico, cosmólogo
y divulgador científico británico



El universo explicado

Hay viajes que empiezan mirando al cielo y terminan en los confines de la imaginación. La astrofísica es uno de ellos: una aventura intelectual que, a golpe de telescopio, ecuaciones y observación paciente, ha conseguido que comprendamos de dónde venimos y hacia dónde vamos. Guiados por el astrofísico Miguel Ángel Sabadell, te proponemos emprender un recorrido tan completo como apasionante por los grandes enigmas del cosmos. El viaje comienza en nuestro barrio cósmico: el sistema solar, su origen, los enigmas de Marte, la incógnita de un posible noveno planeta y el sobrecogedor recordatorio de que el fin del mundo llegará, dentro de 7000 millones de años, cuando el Sol agote su combustible y nuestra Tierra sea devorada o abrasada por su furia final. Desde nuestro rincón del universo asistimos al ciclo de la vida y la muerte de las estrellas, fábricas de elementos y protagonistas de las más deslumbrantes metamorfosis. Sus últimos latidos se convierten en explosiones cósmicas que iluminan galaxias enteras o en abismos insondables como los agujeros negros, esas regiones donde el espacio y el tiempo se rinden a la gravedad.

No nos detenemos. Exploramos las galaxias lejanas con sus brazos espirales, fusiones y colisiones. Algunas se revelan como galaxias activas y cuásares, faros que nos hablan del universo joven. Más allá aparecen cúmulos, supercúmulos y murallas, megaestructuras que desafían las teorías. Y seguimos, desde el Big Bang que dio origen al espacio y al tiempo hasta el misterio de qué hubo antes, pasando por la revelación del universo oscuro, esas anomalías que desconciertan y el papel central de la cosmología moderna.

¡Adelante! Miremos más allá de lo evidente, maravillémonos con la belleza de lo que conocemos y aceptemos con humildad lo que todavía se nos escapa. Lo que veremos no es solo el cosmos, es nuestra propia historia escrita en las estrellas.

CRISTINA ENRÍQUEZ
SUBDIRECTORA

CONTENIDOS

CIUDADANOS DEL COSMOS	8
LAS ARMAS DE LA ASTROFÍSICA: LA LUZ	14
LAS ARMAS DE LA ASTROFÍSICA: LAS ONDAS DE RADIO	22
MISTERIOS DEL SISTEMA SOLAR	30
EL NACIMIENTO DEL SISTEMA SOLAR	40
ASTRONOMÍA SUBTERRÁNEA	48
EL DIAGRAMA MÁS IMPORTANTE (O CASI) DE LA ASTROFÍSICA	54
UN UNIVERSO DE ANOMALÍAS	62
EXPLOSIONES CÓSMICAS	70
AGUJEROS NEGROS, EN EL LÍMITE DEL ESPACIO-TIEMPO	78
EL SONIDO DEL COSMOS	88
LA VÍA LÁCTEA, NUESTRA CIUDAD CÓSMICA	98
GALAXIAS, UNIVERSOS-ISLAS	108
DE LAS GALAXIAS ACTIVAS A LOS CUÁSARES	116
CÚMULOS, SUPERCÚMULOS Y MURALLAS	124
LA GRAN REVOLUCIÓN CÓSMOLÓGICA	134
UNIVERSO OSCURO	140
BIG BANG, ASÍ SURGIÓ TODO	150
¿QUÉ HUBO ANTES DEL BIG BANG?	158
EL FINAL DE LAS ESTRELLAS	166
AÑO 7 000 000 000 D. C., EL FIN DEL MUNDO	174
3 GRANDES INTERROGANTES SOBRE EL UNIVERSO	180
BIBLIOGRAFÍA	192

ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

Ó escanea el código QR:





Ciudadanos COS mos

Los seres humanos, al comprender nuestro lugar en el cosmos a través de la astrofísica, desarrollamos una identidad que trasciende las fronteras terrestres y nos conecta con el universo.

SHUTTERSTOCK





La astronomía amateur ha sido fundamental para el avance de la ciencia, con contribuciones como el seguimiento de asteroides, la búsqueda de supernovas y el monitoreo de estrellas variables.

Si escogiéramos 30 000 personas al azar en España, 29 999 tendrían algo en común: sus negocios e intereses se encontrarían en la superficie terrestre o cerca de ella. El otro sería astrónomo. Pero la astronomía no es solo para astrónomos. Todo el cosmos forma parte de nuestro entorno. De hecho, el cielo nocturno es una característica que se ha mantenido inalterada a lo largo de la historia de la humanidad, compartida por todas las culturas, aunque se haya interpretado de muchas maneras diferentes. Los astrónomos son herederos de una larga tradición. La astronomía es la ciencia más antigua, excepto quizás la medicina. Sus orígenes se encuentran en la necesidad de establecer un calendario, medir el tiempo e interpretar los patrones y regularidades que se observan en el cielo. Nuestro conocimiento avanza ahora más rápido que nunca gracias a potentes telescopios y sondas que viajan a otros planetas. No podemos enviar sondas más allá de nuestro sistema solar, pero con nuestros telescopios podemos estudiar las estrellas, que no son simples puntitos de luz centelleantes. Nos hemos dado cuenta de la inmensa escala del universo, tanto en el espacio como en el tiempo. Vivimos en una galaxia con más de cien mil millones de estrellas; pero esta galaxia es en sí misma solo una de los cien mil millones visibles con los telescopios modernos. Al mirar a lo lejos en el espacio, podemos retroceder mucho en el tiempo, porque la luz de los objetos distantes tardó mucho en llegar hasta nosotros. Los astrónomos tienen una ventaja sobre los geólogos y los buscadores de fósiles: pueden observar el pasado y rastrear la historia cósmica hasta la formación de las primeras estrellas y galaxias. De hecho, existen pruebas contundentes de que nuestro universo es el resultado de una gran explosión que sucedió hace casi 14 000 millones de años.

EL COSMOS ES UNA UNIDAD

Pero todo esto lo hemos podido averiguar gracias a alguien que, según dijo, vio lejos porque estuvo sentado a hombros de gigantes. Cuando Isaac Newton afirmó que los fenómenos naturales debían comprenderse en función de las leyes físicas subyacentes, fue una afirmación revolucionaria; nadie lo había dicho antes. Mucho más profunda fue su afirmación de que las leyes de la naturaleza tienen validez universal; es decir, las mismas leyes se aplican en todo el universo. Así empezó la astrofísica, la rama de la física que aplica lo que aprendemos en nuestros laboratorios al universo. Esta es, quizá, la enseñanza más importante sobre el universo: se rige por leyes físicas que podemos comprender, y estas leyes parecen ser las mismas en todas partes. Al analizar la luz de una galaxia distante, podemos inferir que los átomos que la componen se comportan igual que los que estudiamos en el laboratorio. Gracias a ello, podemos comprender la estructura de las estrellas y sus ciclos de vida, y cómo, a partir de los orígenes más simples que podamos imaginar, surgieron estrellas, galaxias y planetas para formar el complejo cosmos estructurado del que formamos parte.

El cosmos es una unidad. Existen vínculos entre lo muy pequeño —el micro-mundo de los átomos— y lo muy grande —estrellas y galaxias—. Las estrellas se forman, evolucionan y mueren. Se alimentan de la fusión nuclear y, a lo largo de su vida, este proceso genera, a partir del hidrógeno, átomos de carbono, oxígeno y hierro. Todos los átomos de nuestros cuerpos son cenizas de estrellas extintas hace mucho tiempo. Somos los «residuos nucleares» de la energía de fusión que hace brillar a las estrellas. Para comprendernos plenamente a nosotros mismos y nuestros orígenes, debemos entender no solo la evolución darwiniana, sino también los átomos que componen toda la vida y las estrellas que los formaron. Esta maravillosa historia debería formar parte de la educación de todos.

Con la llegada de la era espacial se han abierto nuevas ventanas al universo. Gracias a los gigantescos observatorios que orbitan a gran altura sobre la atmósfera terrestre es posible explorar el Universo en una amplia gama de longitudes de onda: ondas de radio, ondas milimétricas, radiación infrarroja, radiación visible, radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Esto nos ha permitido lograr avances sin precedentes en diversas cuestiones: la naturaleza de las estrellas y su ciclo vital; la formación de los planetas; el nacimiento y la muerte de las estrellas; el cementerio de estrellas: enanas blancas, estrellas de neutrones y agujeros negros; las galaxias; los cuásares, y los cúmulos y supercúmulos de galaxias. Y quién sabe qué otras maravillas nos aguardan allá, en la tercera estrella a la izquierda.

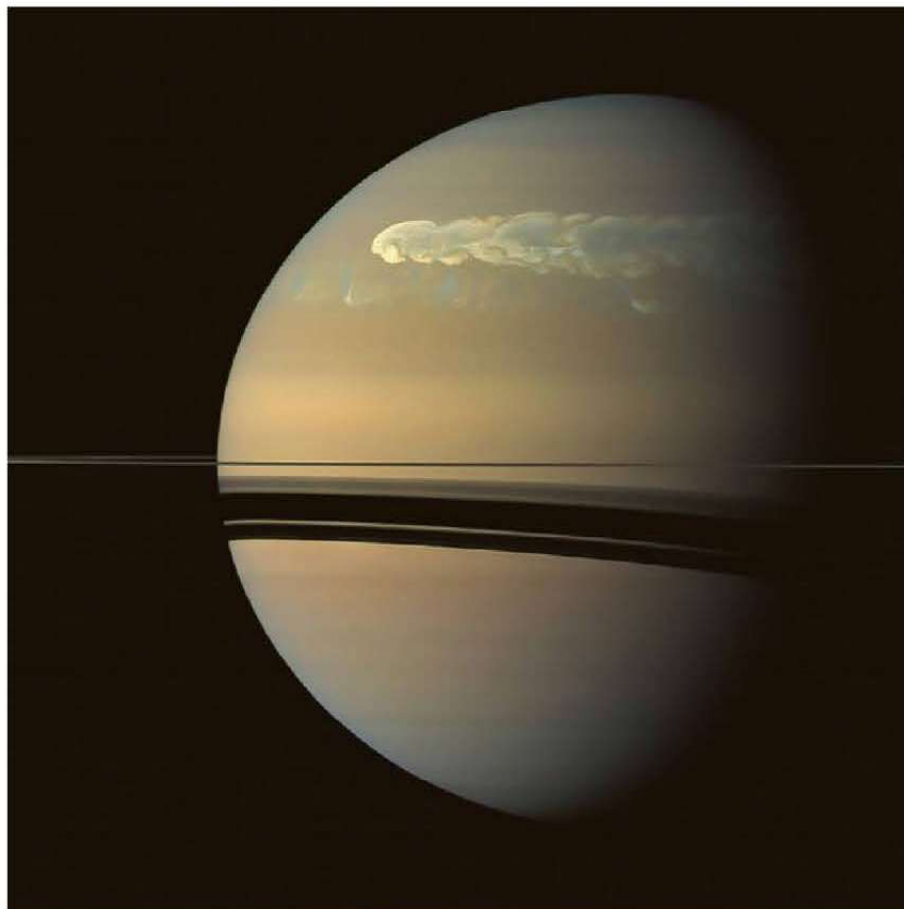
La astronomía es algo más que una descripción de los cielos. Es la historia del intento de la humanidad por comprender lo que nos rodea a la máxima escala posi-

LOS ORÍGENES DE LA ASTRONOMÍA SE ENCUENTRAN EN LA NECESIDAD DE ESTABLECER UN CALENDARIO, MEDIR EL TIEMPO...

GRACIAS A LA RADIOASTRONOMÍA DESCUBRIMOS QUE TODO SURGIÓ DE UNA GRAN EXPLOSIÓN, EL BIG BANG

ble. Y lo mejor de todo: el cielo está a disposición de todo aquel que quiera mirarlo. Hermann Goldschmidt, un pintor alemán del siglo XIX que vivía en París, recurrió a la astronomía para combatir la depresión y descubrió catorce asteroides. Will Hay, un cómico y director de cine inglés en las décadas de 1930 y 1940, descubrió la «Gran Mancha Blanca» de Saturno y que consideraba a quienes tenían interés en la astronomía «las únicas personas que ven la vida en su verdadera proporción». Un ministro holandés fue el primero en descubrir la estrella variable Mira; un farmacéutico se dio cuenta del ciclo de las manchas solares.

Todos los astrónomos, ya sean aficionados o profesionales, cada vez que levantan la vista al cielo se enfrentan a dos sentimientos contradictorios: uno de asombro infantil y el otro de profunda tristeza. La astronomía es, parafraseando a Pascal, gloria y desperdicio del universo: es la ciencia más popular pero también la más maltratada. Y por partida doble.



Fotografía de Saturno, tomada por la sonda *Cassini*, con la «Gran Mancha Blanca», una tormenta masiva que se extiende por todo el hemisferio norte del planeta.

NO SOMOS EL CENTRO DEL UNIVERSO...

Hoy Gaugin sería incapaz de pintar su famoso cuadro de un café de París bajo el cielo estrellado. Nadie es consciente de las fases de la Luna: ¿Cuántas mujeres enamoradas podrían exclamar con Julieta: «No jures por la Luna, por la inconstante Luna que cambia todos los meses»? Venus, Mercurio, Marte, Júpiter o Saturno son solo unos nombres que se aprenden en la escuela. Hoy nadie ve, de noche en noche, de mes en mes, cómo unos brillantes puntitos luminosos, fácilmente discernibles porque su luz no parpadea, van cambiando su posición en el cielo. Son los planetas. A ellos les debemos mucho, pues al querer explicar por qué se mueven de ese modo fuimos capaces de comprender que no estamos en el centro del cosmos, que no somos el ombligo del universo. Todo ese cielo estrellado se perdió cuando encendimos el alumbrado nocturno sin mirar por encima

de nuestras propias narices.

Pero no ha sido esta la única pérdida. Todo un universo invisible a nuestros ojos ha ido evaporándose a causa de nuestra obsesión tecnológica por la conectividad total: es el mundo de las ondas de radio y las microondas. Lo más llamativo es que ha sido en ese rango de longitudes de ondas donde más sorpresas nos ha dado un cosmos que ha demostrado tener una casi infinita capacidad para asombrarnos.

Gracias a la radioastronomía descubrimos que todo surgió de una gran explosión, que el universo tiene forma de esponja, con grandes acumulaciones de galaxias y grandes vacíos. Un universo donde existen galaxias en las que cabrían, holgadamente, cien vías lácteas, donde colosales dinamos cósmicas generan



Nuestro «hogar» astronómico, el sistema solar (en la imagen de arriba), es extraordinariamente diminuto en el contexto universal.

tanta energía como un billón de soles. Las observaciones radioastronómicas nos muestran objetos que no deberían estar ahí, que lo que imaginamos no es lo que realmente es. Así, solo gracias a esas inmensas orejas que escuchan el universo en la banda de radio se pudo obtener en 2017 la primera imagen del superagujero negro que se encuentra en el centro de la Vía Láctea.

De una cosa podemos estar seguros: quien asimile cómo se estructura el universo y cómo se compone, cuál es su residencia y dónde se encuentra, tras ser consciente de que todo evoluciona, se dará cuenta de que no solo ha aprendido algo del mundo en el que vive, sino que verá su propia vida bajo un nuevo punto de vista y llegará a sentirse lo que siempre había sido sin saberlo: un ciudadano del cosmos. ■

Las armas de la astrofísica: la luz

En la dispersión de la luz, cada color, cada longitud de onda, porta información específica sobre el objeto que la emitió: su temperatura, composición química, velocidad, campo magnético, densidad...

SHUTTERSTOCK





El arcoíris nos conecta con uno de los conceptos fundamentales de la astrofísica: la interacción luz-materia. Arcoíris sobre Alicante (España).

Cuando salimos de casa la luz del Sol nos da en la cara, encendemos la radio y escuchamos las noticias, nos hacen una radiografía, en casa enchufamos el aspirador, vemos la televisión, nos llaman por teléfono... Nuestras vidas serían imposibles sin lo que los físicos llaman radiación electromagnética; muy pocas cosas en este mundo tienen tanta utilidad.

Los seres humanos solemos confundir las partes con el todo y en el caso de la luz, así lo hacemos. Como nuestros ojos están diseñados para ver ciertas ondas electromagnéticas creemos que la luz son solo los colores del arcoíris. Sin embargo hay muchos más «colores» que no vemos. Lo que nuestros ojos reciben es una pequeñísima parte de lo que se conoce como el espectro electromagnético, donde debemos incluir las ondas de radio, las microondas, los infrarrojos, el ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Todo lo que existe en el universo, desde el virus más pequeño a la galaxia más enorme, emite luz en alguno de estos rangos.

LA LONGITUD DE ONDA

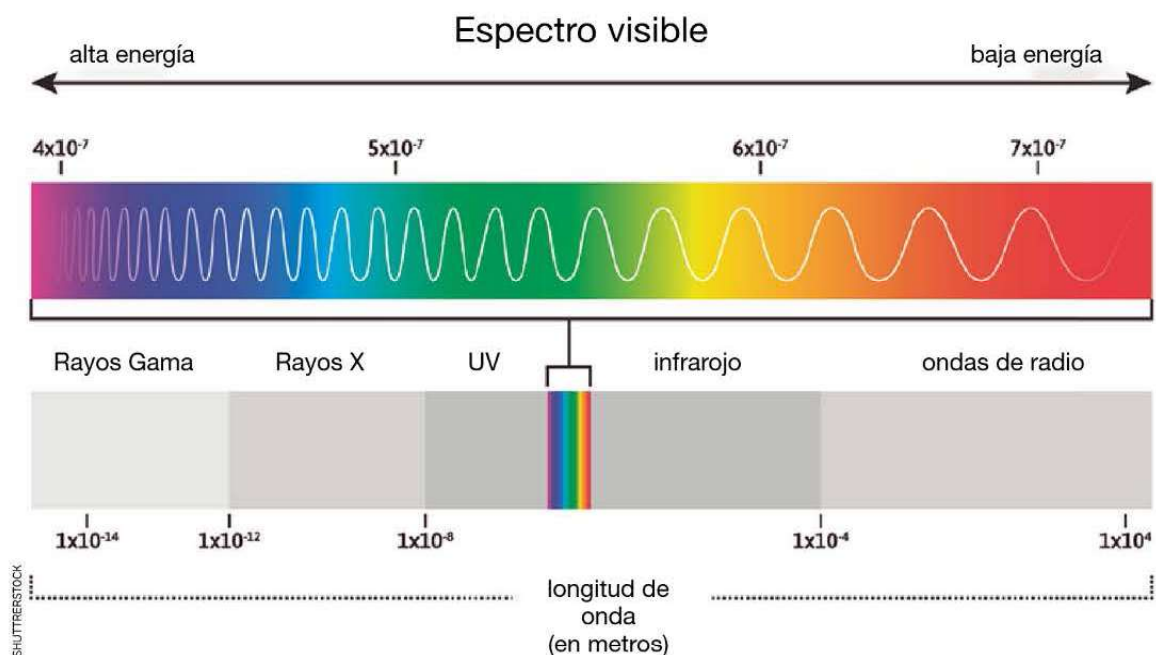
¿Cómo los ordenamos? Los físicos usan la longitud de onda. Para entender lo que es imaginemos olas avanzando hacia la playa: la distancia entre dos crestas consecutivas es la longitud de onda. Teniendo en cuenta esto, los colores no son más que luz de distintas longitudes de onda. Las ondas de radio tienen las longitudes de onda más largas –mayor distancia entre crestas– y la peligrosísima radiación gamma, las menores. ¿Por qué es peligrosa? Porque la longitud de onda está relacionada con la energía que transporta: cuanta mayor sea, menor es la energía. Por eso la radiación gamma es la más energética de todo el espectro electromagnético y, por ende, la más peligrosa, seguida muy de cerca por los rayos X.

NUESTRAS VIDAS SERÍAN REALMENTE IMPOSIBLES SIN LO QUE LOS FÍSICOS LLAMAN RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Hasta bien entrado el siglo xx la única fuente de información que disponíamos del mundo era la que nos llegaba de la parte visible del espectro electromagnético. Poco a poco fuimos siendo capaces de construir otros «ojos» capaces de «ver» más allá del espectro visible. Y una nueva visión del mundo, hasta entonces inaccesible, apareció ante nuestros limitados ojos.

La zona más amplia del espectro electromagnético es el de las ondas de radio, que abarcan longitudes de onda desde los milímetros a los kilómetros, y son una de las fuentes más importantes de información astrofísica. Es en este rango donde se sitúa la radioastronomía. Gracias a ellas hemos descubierto cómo es la estructura de nuestra galaxia, encontrado galaxias en explosión, y con ella hemos conseguido obtener la primera «fotografía» del superagujero negro que se encuentra en el centro de la Vía Láctea.

Después de la zona de radio, y yendo hacia longitudes de onda más pequeñas, nos encontramos con las microondas, que además de formar parte de nuestra cocina es la radiación que está detrás de ese radar con el que te ponen multas de tráfico si vas a una velocidad superior a la permitida. Como su nombre indica, son las más pequeñas de las radioondas y su longitud va de los pocos milímetros a los diez centímetros. Por esta ventana el universo nos muestra el mundo de las moléculas interestelares: el dióxido de carbono, el formaldehído y el agua son una pequeña parte de una larga lista de moléculas que emiten y absorben microondas. Pero observar



Lo que llamamos «luz visible» (arriba, ese pequeño fragmento coloreado en el centro de la ilustración) es solo una minúscula fracción del espectro electromagnético completo.

NUESTRA ATMÓSFERA IMPIDE QUE LA MAYOR PARTE DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA DEL ESPACIO EXTERIOR LLEGUE A LA SUPERFICIE

esas emisiones resulta complicado porque el vapor de agua de nuestra atmósfera causa estragos en nuestros intentos por observarlas. Al contrario que sucede con los radiotelescopios, que puedes colocarlos en cualquier lugar de la superficie terrestre, los telescopios de microondas deben estar situados en la cima de las montañas y por encima de la capa de nubes. Quizá el mayor descubrimiento en esta zona del espectro fue la confirmación de que el universo nació con una gran explosión hace casi 14 000 millones de años. De los billones de grados centígrados con los que comenzó el universo, ahora ha caído a unos 270 grados bajo cero, y la energía de aquella explosión primigenia, aunque se encuentra distribuida por todo el espectro electro-

magnético, tiene su pico —su máxima emisión— en las microondas.



NATIONAL PORTRAIT GALLERY

Retrato del astrónomo y músico germano-británico William Herschel (1785), de Lemuel Francis Abbott.

RAYOS CALORÍFICOS

La radiación infrarroja es la que mantiene calientes durante horas las patatas fritas que has comprado en tu restaurante preferido de comida rápida y es la que te permite cambiar de canal en la televisión con el mando a distancia. La descubrió el astrónomo y músico William Herschel en 1800 y las llamó «rayos caloríficos» por la peculiar forma que tuvo de descubrirlos (y que nosotros podemos repetir en nuestra casa). En una habitación a oscuras dejamos pasar un rayo de sol hacia un prisma, que descompondrá la luz formando un arcoíris sobre una pantalla que situemos detrás. Ahora pongamos un poquito más allá de donde termina el color rojo

un termómetro: descubriremos que la temperatura sube. Allí llega un tipo de radiación que es invisible a nuestros ojos: el infrarrojo.

El problema de observar el cielo en el infrarrojo es el mismo que con las microondas: el vapor de agua de la atmósfera se encarga de absorberlo en una cantidad significativa. Además, la propia atmósfera emite en esta parte del espectro electromagnético lo que enmascara cualquier emisión llegada del cosmos. Por esta razón la mayoría de los telescopios infrarrojos se construyen en lugares muy

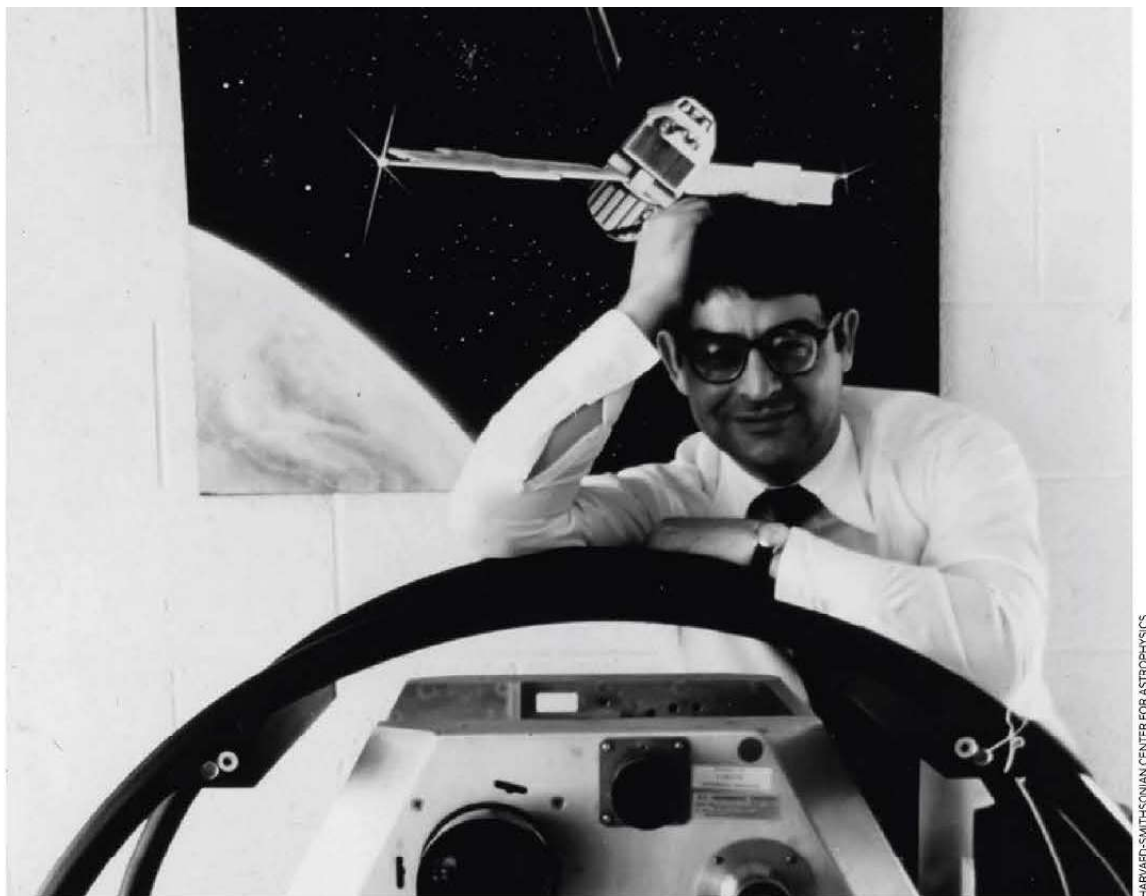


El *Satélite Astronómico Infrarrojo* (IRAS) exploró más del 96 % del cielo durante diez meses en 1983, donde reveló por primera vez el núcleo de nuestra galaxia, la Vía Láctea.

secos y a gran altitud, como Hawái o el desierto de Atacama, o a bordo de aviones o globos. Pero hay un lugar que es mejor para colocar un telescopio infrarrojo: el espacio. En 1983, el satélite IRAS inauguró la época de la astronomía infrarroja en el espacio, que en estos momentos está en mano de los observatorios espaciales SPHEREx, EUCLID y el famoso *James Webb*. De este modo podemos estudiar regiones como el centro galáctico y el interior de nubes donde se están formando estrellas, que no dejan pasar la luz visible o la ultravioleta, pero son transparentes al infrarrojo. Más cerca de nosotros tenemos un lugar que luce en el infrarrojo como una bengala: Venus. Esto es debido a que bajo su atmósfera nos encontramos un planeta con un efecto invernadero desbocado: la temperatura en su superficie es tal que funde el plomo, el zinc, el estaño... y a los humanos.

REGIÓN ULTRAVIOLETA CERCANA

Al otro lado del espectro visible se encuentra la radiación ultravioleta, responsable de ese color moreno de la piel que buscamos todos los veranos. Al igual que las flores de nuestro jardín lucen diferente si las observamos con nuestros ojos (que usan el espectro visible) que con los ojos de las abejas (que ven el mundo en el ultravioleta), el universo se ve bastante diferente a como lo vemos en luz visible. La mayoría de las estrellas son, en realidad, objetos relativamente fríos que emiten gran parte de su radiación electromagnética en la parte visible o infrarroja del espectro. Por contra, la radiación ultravioleta es característica de los objetos más calientes. Como no podía ser de otra forma, la atmósfera de la Tierra impide que la mayor parte de la radiación ultravioleta que proviene del espacio exterior llegue a su superficie. Solo la llamada «región ultravioleta cercana» —la



Riccardo Giacconi posando junto al satélite *Uhuru*. El trabajo del astrofísico italiano demostró que el espacio no es el vacío frío que imaginábamos.

que se encuentra, como su nombre indica, más cerca del azul— puede alcanzar la superficie terrestre. Eso quiere decir que si fuéramos capaces de mirar el cielo con los ojos de una abeja, la mayoría de las estrellas se desvanecerían. Solo algunas estrellas masivas muy jóvenes, así como algunas estrellas y galaxias muy antiguas, que se calientan y producen radiación de mayor energía cerca de su nacimiento o muerte, serían visibles. Otros objetos luminosos en este rango son las novae, supernovas, galaxias con brote estelar (las que tienen una tasa de nacimiento de estrellas muy superior a una galaxia normal) y los cuásares. En esencia, el universo ultravioleta nos abre la puerta a los fenómenos más energéticos y exóticos del cosmos.

Pero quien más información nos ha proporcionado sobre los procesos más violentos del universo es la radiación situada por encima del rango ultravioleta. La astronomía de rayos X nos enfrenta a objetos inefablemente extraños, como los inmensos agujeros negros —con masas millones de veces la de nuestro Sol— que se encuentran situados en los centros de las galaxias. Debido a su constitución, estas gigantescas máquinas cósmicas de producción de energía permanecen ocultas a los telescopios convencionales y únicamente se hacen visibles cuando observamos la radiación de alta energía que nos llega de ellos. Por eso, gracias

**SOLO LA LLAMADA «REGIÓN ULTRAVIOLETA
CERCANA» —LA QUE SE ENCUENTRA MÁS CERCA
DEL AZUL— PUEDE ALCANZAR LA TIERRA**

a los observatorios espaciales de rayos X podemos comprender mucho mejor aquellos procesos que ocurren en el interior de las galaxias y llenan el universo de una radiación altamente energética de la que el ser humano se encuentra a salvo gracias a esa fina capa de gas que llamamos atmósfera.

GAMMA RAY BURST

El descubrimiento de intensas fuentes cósmicas de rayos X fue toda una sorpresa, porque ningún astrónomo se esperaba que otros astros más lejanos pudieran emitirlos en cantidades suficientes para ser observados. Nuestra percepción del cosmos cambió julio de 1962 cuando un equipo liderado por el italiano Riccardo Giacconi lanzó un cohete con detectores de rayos X que consiguió estar unos minutos por encima de los 80 kilómetros de altura. La misión de este experimento era detectar los escasos rayos X que, emitidos por el Sol, se reflejaban en la Luna. Pero en lugar de eso, Giacconi descubrió una fuente muy intensa (la estrella binaria Sco X-1) y la radiación cósmica de fondo de rayos X que procede de la contribución conjunta de un enorme número de galaxias activas.

Desde entonces, la astronomía de rayos X ha permitido radiografiar supernovas, galaxias, cúmulos de galaxias y cuásares. Gracias a ella se ha podido constatar que la mayoría de los agujeros negros que moran en el centro de galaxias activas y cuásares están ocultos por nubes de gas y polvo. Y no solo en otras galaxias. El observatorio Chandra —lanzado en 1999— ha podido identificar casi mil fuentes de rayos X en un espacio de 400 por 900 años-luz en el centro de la Vía Láctea. En su mayoría son objetos tan fantásticos como estrellas de neutrones, agujeros negros y nubes de gas extremadamente calientes.

Pero aún hay una radiación más energética, la radiación gamma. Al igual que sucede con los rayos X, los gamma los detiene nuestra atmósfera, lo que es toda una suerte, porque si no estaríamos en serio peligro. La astronomía de rayos gamma nos revela la parte más violenta del universo. Así, el 23 de febrero de 1999 los observatorios espaciales de rayos X y rayos gamma detectaron una impresionante fulguración de energía en un punto del cielo situado en la constelación del Boyero. A la Tierra llegaron dos oleadas de radiación 25 y 40 segundos después de comenzar la explosión. Durante los siguientes 50 segundos llegaron otros pulsos más débiles. Después se hizo la calma. Calculada la energía liberada, el resultado es impresionante: el estallido brilló como 20 000 billones de soles. Si hubiera sucedido a tan solo 2000 años-luz de nosotros en el cielo hubiera aparecido una estrella ¡dos veces más brillante que nuestro propio Sol!

Este tipo de explosiones gamma fueron descubiertas a finales de 1960 y principios de 1970 con una constelación de satélites de defensa estadounidense que poco tenían que ver con la astronomía: la serie *Vela*. Diseñados para detectar los fogonazos gamma producidos por las explosiones nucleares —un medio de estudiar las propias y controlar las del enemigo—, encontraron que también se producían tremendas explosiones gamma en el espacio, con una duración de fracciones de segundo a minutos: son los *gamma ray burst*. Se trata de las explosiones cósmicas más intensas —de hecho, no ha sucedido nunca ningún otro evento más energético, salvo el propio comienzo del universo— y su origen ha motivado uno de los debates más intensos de la astrofísica moderna que todavía continúa. ■



Las armas de la astrofísica: las ondas de radio

Las ondas de radio son una de las pocas bandas del espectro electromagnético que atraviesan la atmósfera terrestre, permitiendo la radioastronomía desde observatorios en superficie.

SHUTTERSTOCK

En 1932 un joven ingeniero de los Laboratorios Bell, Karl Jansky, escribió a su padre: «Últimamente he estado recibiendo una descarga atmosférica muy débil y uniforme. Lo curioso es que siempre viene en la misma dirección... Parece interesante, ¿verdad?». Tras observar esta «descarga» durante cierto tiempo, Jansky determinó que se repetía cada 23 horas y 56 minutos, es decir, lo que tarda la Tierra en dar una rotación completa. La conclusión era obvia: la «descarga» tenía muy poco de «atmosférica» y mucho de «cósmica». El descubrimiento de Jansky, que publicó en 1933, no era solo interesante, sino también revolucionario: había encontrado que el centro galáctico emitía ondas de radio. Al contrario que *The New York Times*, que lo sacó en portada, los astrónomos no se lo tomaron muy en serio, pues según sus estimaciones esas emisiones debía ser muy débiles. Por suerte había un radioaficionado que le traía sin cuidado lo que opinaran los astrónomos. Grote Reber quedó fascinado por esa «descarga atmosférica» y en 1937 decidió construir un plato de acero de casi un metro de diámetro en el jardín trasero de su casa en Wheaton, Illinois. Durante años ese fue el único radiotelescopio del mundo y con él Reber trazó el primer mapa en ondas de radio del cielo.

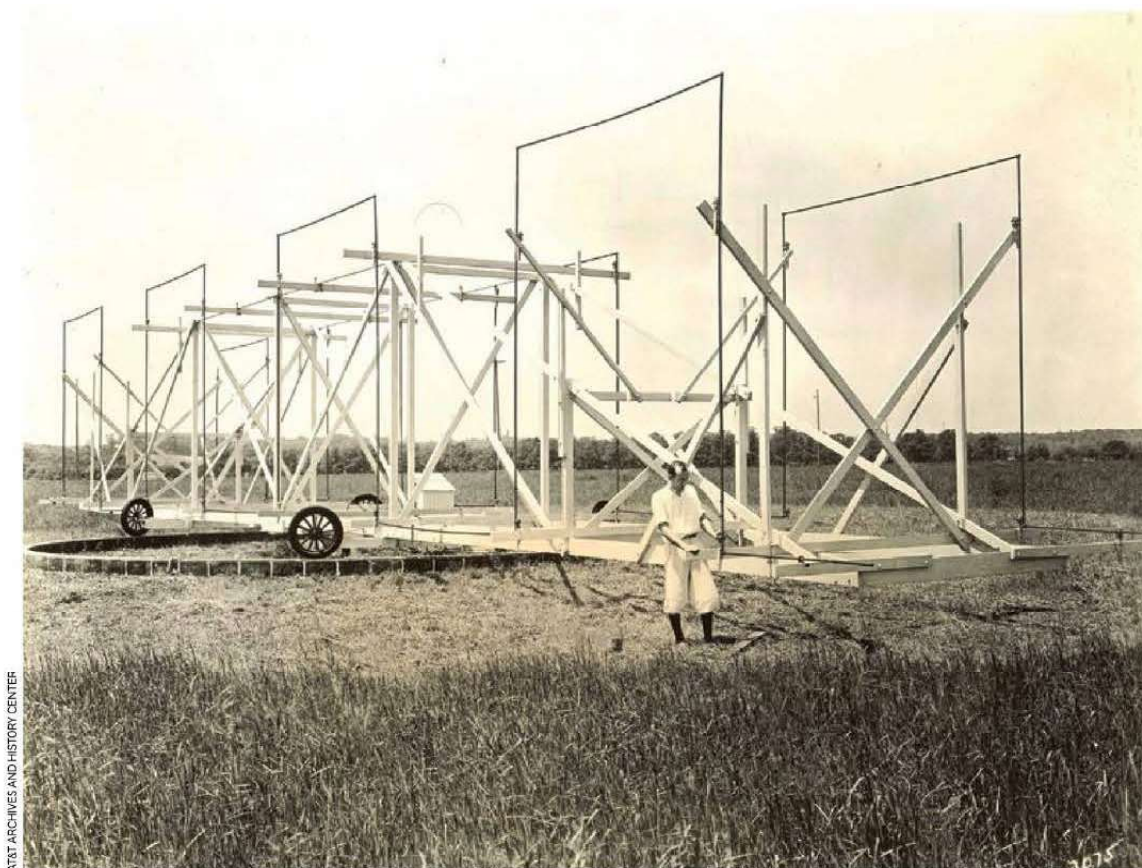
DE PARALELO A ANTIPARALELO

Como sucediera con Jansky, ningún astrónomo le hizo caso. Únicamente un holandés, Jan Oort, fue capaz de intuir que algo podría habérseles pasado por alto. Oort pidió a uno de sus estudiantes, Hendrik van de Hulst, que estudiase si esas radioemisiones podían tener alguna utilidad. Y vaya si la tenían...

Estudiando el hidrógeno en su forma neutra, sin ionizar, van de Hulst calculó que tenía que emitir en la longitud de onda de 21 cm, a 1,42 MHz. El porqué es simple de calcular pero casi increíble de idear: si imaginamos al protón y al electrón que componen el átomo de hidrógeno como dos partículas en rotación, descubrimos que pueden hacerlo una respecto a la otra de dos formas: o rotan en el mismo sentido (y se dice que tienen el espín paralelo) o en sentidos contrarios (y se dice que sus espines son antiparalelos). Pues bien, el joven astrónomo holandés descubrió algo que iba a revolucionar la astronomía: una vez cada once millones de años un átomo neutro del gas interestelar cambia espontáneamente de paralelo a antiparalelo, emitiendo un fotón con una longitud de onda de 21 cm, o una frecuencia de 1,42 MHz.

Once millones de años es mucho tiempo, pero hay tal cantidad de hidrógeno en el universo que las nubes interestelares emiten un zumbido constante en la línea de 21 cm. Fue el 25 de marzo de 1951 cuando dos físicos de la Universidad de Harvard, Harold Ewen y Edward Purcell, la lograron detectar. Por desgracia, Jansky no logró ver cómo su descubrimiento se iba a convertir en una de las armas más poderosas de la astronomía: murió en 1950 con tan solo 44 años debido a un fallo hepático.

EL DESCUBRIMIENTO DE JANSKY ERA REVOLUCIONARIO: HABÍA ENCONTRADO QUE EL CENTRO GALÁCTICO EMITÍA ONDAS DE RADIO



Karl Jansky junto a su antena rotatoria en los Laboratorios Bell (1932). Con este dispositivo, detectó por primera vez ondas de radio procedentes del espacio exterior.

El valor de la radioastronomía está en que nos revela fenómenos que de otro modo se nos escaparían porque no podemos verlos con nuestros telescopios ópticos. Un ejemplo es cierto descubrimiento cuya historia comienza en 1943, cuando el astrónomo Carl Seyfert, mientras hacía un reconocimiento de rutina de las galaxias espirales, descubrió algo que le extrañó muchísimo. Algunas de ellas se parecían a la Vía Láctea, pero había una diferencia crucial. Mientras su disco —la zona de la galaxia que contiene la estructura espiral— era similar al nuestro, el bulbo —la pelota anaranjada que se encuentra en el centro— brillaba cien veces más. La observación de Seyfert fue el primer indicio de que las galaxias eran algo más que aburridas colecciones de estrellas que arden en un sosegado universo. Ahora resultaba que había algunas con una personalidad explosiva. Con la llegada de la radioastronomía emergió un nuevo retrato del universo: galaxias que con los telescopios no parecen distintas al resto cambian completamente cuando las observamos en ondas de radio.

Un ejemplo es Cygnus A, la segunda fuente de radio más potente del hemisferio norte (la primera es el Sol). Se trata de una galaxia situada a 600 millones de años-luz de nosotros cuya emisión de radio es 100 millones de veces mayor que la Vía Láctea. Pero la sorpresa llega cuando descubrimos que esa emisión no viene del centro de la galaxia, sino de dos enormes lóbulos, con aspecto de gigantescos manguitos flotadores, situados a ambos lados de ella. Nos encontramos ante uno de los espectáculos más extraordinarios de la naturaleza: dos

chorros de materia salen a altísimas velocidades del centro y perforan el tenue gas del espacio intergaláctico hasta chocar con una región de gas más denso, como sucede con el chorro de agua de una manguera al toparse con un muro. En los lóbulos los electrones se encuentran dando vueltas en espiral en torno a las líneas del campo magnético, como coches girando continuamente en una curva. Pero mientras los coches chirrían, los electrones difunden ondas de radio. Y son estas radioondas las que nos cuentan una historia muy diferente a la que vemos con la luz visible que emana de ella.



William y Caroline Herschel observando con un telescopio reflector, la noche del descubrimiento de Urano en 1781.

RADIACIÓN BASURA

La radioastronomía nos ha mostrado un universo totalmente nuevo, repleto de misterios, y nos ha traído al salón de casa los grandes monstruos del cosmos. Entre ellos, la galaxia más grande del universo, IC 1101, situada a mil millones de años-luz de nosotros. Fue observada por primera vez en 1790 como una débil mancha difusa por el más famoso astrónomo del siglo XVIII y descubridor de Urano, William Herschel, usando el mayor telescopio de la época (de algo más de un metro de espejo que el propio astrónomo construyó). Poco podía imaginarse que justo 200 años más tarde un grupo de astrónomos del National RadioAstronomy Observatory (NRAO), operando con el radiotelescopio de Green Bank situado en Virginia Occidental —el mayor del mundo totalmente

dirigible—, descubrió lo que ocultaba esta estrella situada en el centro del cúmulo Abell 2029: una gigantesca galaxia elíptica —con forma de huevo— rodeada por una vasta pero débil envoltura de estrellas que hace que este monstruo contenga 2000 veces la masa de nuestra galaxia. ¿Su tamaño? Aún está en discusión, pero se puede afirmar que tiene un diámetro efectivo de 500 000 años-luz y extiende su área de influencia a lo largo de 6 millones de años-luz, formando una envoltura de estrellas provenientes de las galaxias que IC 1101 se ha ido «tragando» lentamente con el tiempo. Para hacernos una idea de lo que esto significa basta con recordar que la distancia que nos separa de la galaxia de Andrómeda es 2,5 millones de años-luz...

El NRAO es un lugar que encanta a los directores de Hollywood: una singular «plantación», situada a unas cuantas decenas de kilómetros al oeste de Socorro (Nuevo México), que aparece tras subir un cambio de rasante de la carretera 60: 27 radiotelescopios con platos de 25 metros de diámetro formando una Y, situados sobre el antiguo lecho de un antiguo lago. Los pilotos comerciales que la sobrevuelan la llaman «el campo de setas»: es el Very Large Array (VLA), cuyos platos se mueven al unísono siguiendo las consignas de «la Jefa», el ordenador que los controla.

LA RADIOASTRONOMÍA NOS HA MOSTRADO UN UNIVERSO TOTALMENTE NUEVO Y REPLETO DE GRANDES MISTERIOS

Pero lo que inquieta a los radioastrónomos es algo mucho más mundano que los misterios del universo. El NRAO, uno de los mayores centros de radioastronomía del mundo, funciona en un rango de frecuencias que va de 1 a 50 GHz, una banda amenazada no solo por las necesidades pantagruélicas de las empresas de telecomunicaciones, sino de las megaconstelaciones de satélites, la mayoría del Starlink de Elon Musk, que ya lleva colocados en órbita más de 6000, y subiendo a un ritmo de 40 satélites por semana. Según los últimos estudios, las ondas de radio que emiten estos satélites son hasta 10 millones de veces más brillantes que las fuentes astrofísicas más tenues. Es como comparar el brillo de las estrellas más débiles del cielo con el de la luna llena. Si esto sucede, ¿cuánto más del universo vamos a perdernos? Si no hacemos nada pronto, se estima que dentro de 30 años —si no es antes— tendremos que tirar todos los radiotelescopios a la basura. Y lo peor es que esas señales que empiezan a inundar el cielo de radiación electromagnética no intencionada, esto es, emisiones de radio que no cumplen ninguna función en el satélite, sino que aparece por la operación propia del mismo. De otro modo, es radiación basura.



Very Large Array (VLA) en Nuevo México, Estados Unidos. Este conjunto de veintisiete radiotelescopios funciona como un instrumento gigante mediante interferometría.

LOS CONVENIOS INTERNACIONALES PRESERVAN ZONAS DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO PARA USO EXCLUSIVAMENTE ASTRONÓMICO

La cuestión es peliaguda. En las condiciones actuales, hoy en día no habiéramos podido descubrir la existencia de uno de los cadáveres estelares más sorprendentes del universo, las estrellas de neutrones, soles superdensos del tamaño de una ciudad.

Los astrónomos luchan por algo que nuestra sociedad actual no entiende: el derecho al silencio. Las ondas de radio no son como los países, no conocen fronteras y no se pueden detener. Quien gestiona las frecuencias de la amplísima banda de radio es una organización dependiente de la ONU, la Unión Internacional de Telecomunicaciones, con sede en Ginebra. Bajo sus auspicios convoca, cada dos o tres años, la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (la última se celebró en 2025), que revisa las regulaciones, elabora disposiciones y reparte el pastel de radio que va desde los 10 KHz a los 275 GHz, esto es, de longitudes de onda de decenas de kilómetros a los milímetros.

CIUDADANOS DEL COSMOS

Gracias a estas reuniones se protegen algunas frecuencias que son de especial interés, como la de 121,5 MHz usada para las emergencias aéreas, el famoso «mayday». En esta conferencia se decide qué frecuencias se pueden usar y por



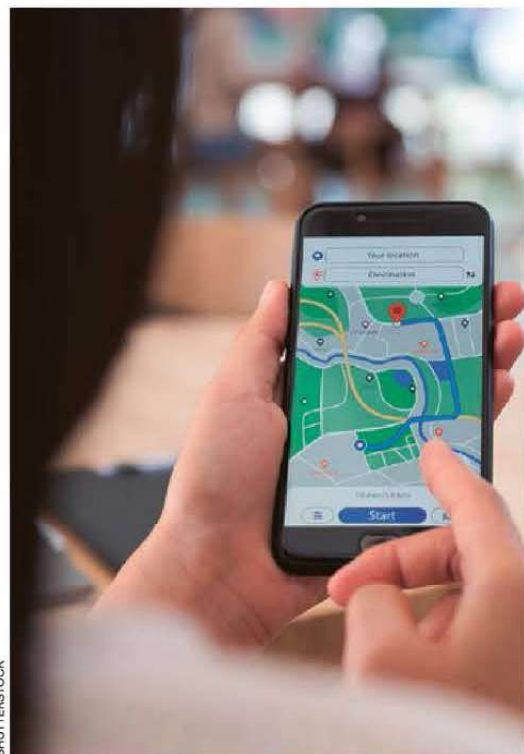
Las ondas de radio para las telecomunicaciones ocupan las mismas frecuencias que la radioastronomía, lo que obliga a los observatorios a ubicarse en zonas de «silencio radioeléctrico».

quién, ya sean móviles, emisoras de radio o de radioaficionados, televisiones, GPS, satélites... En definitiva, todo aquello que utiliza de una forma u otra las radioondas —y que es prácticamente todo— debe tener reservado un espacio para su uso. Y es aquí donde está planteada la batalla, pues las grandes compañías de telecomunicaciones necesitan aire para respirar. Por supuesto, con billones de euros en juego —en esas cantidades se valora esta parte del espectro electromagnético— la radioastronomía no se cuenta entre los grandes *lobbies* de presión. Peor aún, los científicos exigen algo que a los ojos de cualquier empresa tecnol

ógica es mentar a la bicha: no buscan compartir bandas de radio, sino que se queden sin usar. Obviamente para las diferentes compañías de telecomunicaciones mirar el cielo no se encuentra en sus panes de negocio.

Los convenios internacionales preservan ciertas zonas del espectro electromagnético para uso exclusivamente astronómico. Una de ellas se encuentra entre los 1400 y los 1427 MHz, donde se encuentra la importantísima línea de 21 cm del hidrógeno neutro. Por desgracia está colocada entre dos bandas reservadas para los móviles, cuyas necesidades son cada vez más voraces. Muchos astrónomos están convencidos de que esta batalla está perdida en el hemisferio norte.

Entre 2,69 y 2,70 GHz se encuentra la línea del hidrógeno ionizado (la famosa banda del HII), acosada por el 4G. Los agujeros negros, cuásares, galaxias activas... emiten en una banda amplia que comienza en los 5 GHz

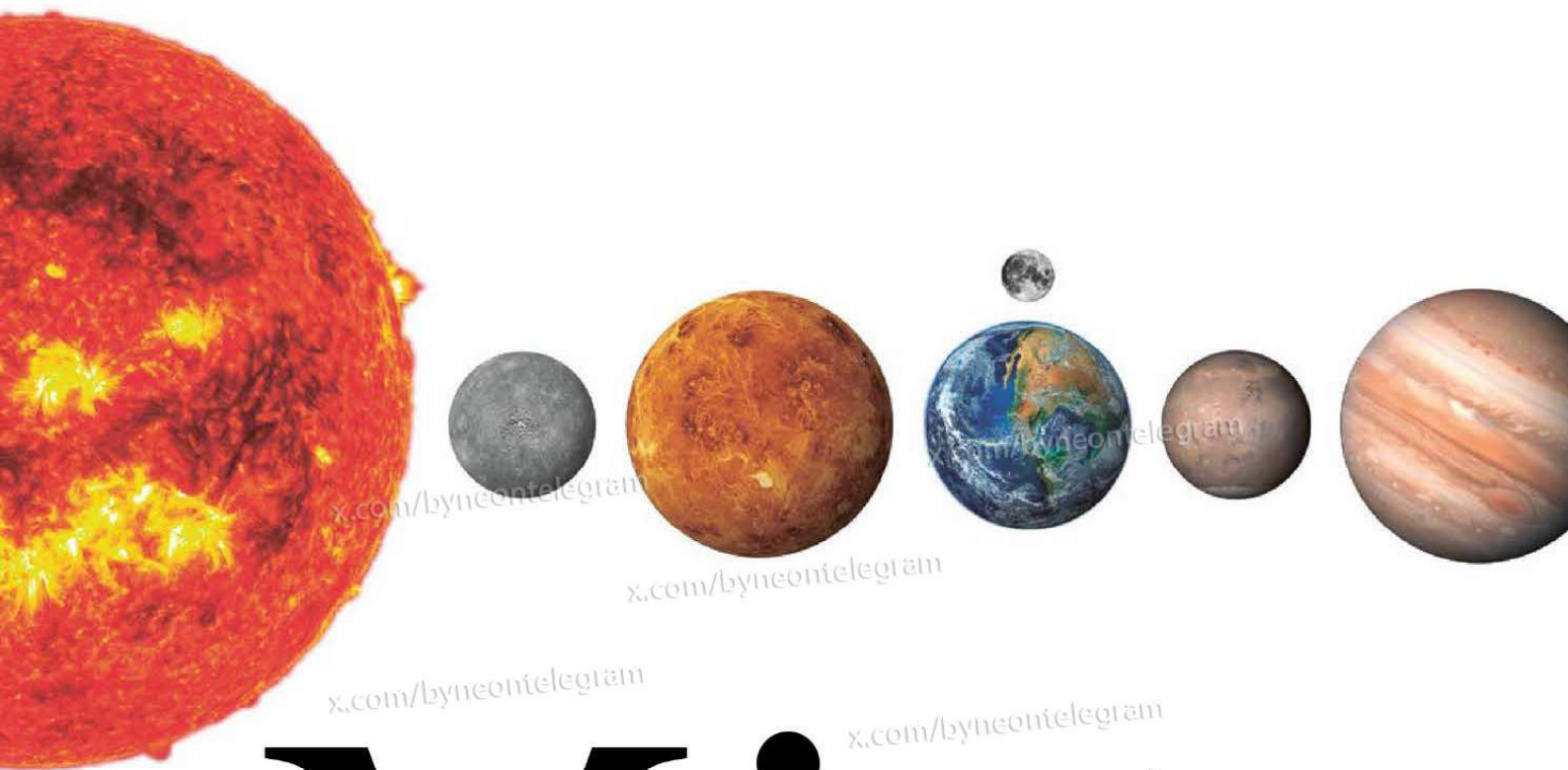


SHUTTERSTOCK

El GPS utiliza señales de radio de satélites para determinar la posición exacta del receptor.

que los radioastrónomos comparten con los dispositivos de geolocalización y otros satélites. De 22 a 24 GHz tenemos la zona de emisión del agua y el amoníaco, con las que se estudian las nubes moleculares, los sistemas estelares en formación y lo que en un futuro será la búsqueda de planetas con capacidad para albergar vida. Pero justo ahí se encuentran también los radares anticolidión de los coches. Finalmente, por encima de los 100 GHz la astronomía submilimétrica es importante para estudiar las moléculas del medio interestelar. Aunque por ahora es un país desconocido para los operadores de telecomunicaciones, han empezado a exigir una parte (grande) de ese pastel.

Dicen los soñadores que quizá la única forma de combatir este acorralamiento que sufre la astronomía sea obligarnos a echar una mirada al cielo para descubrir lo que siempre hemos sido sin saberlo: ciudadanos del cosmos. Solo así sentiremos ese cosquilleo que recorre el espinazo al saber que estamos contemplando nuestro verdadero hogar. ■



Miste

del sistema

solar

ENLACE AL CANAL

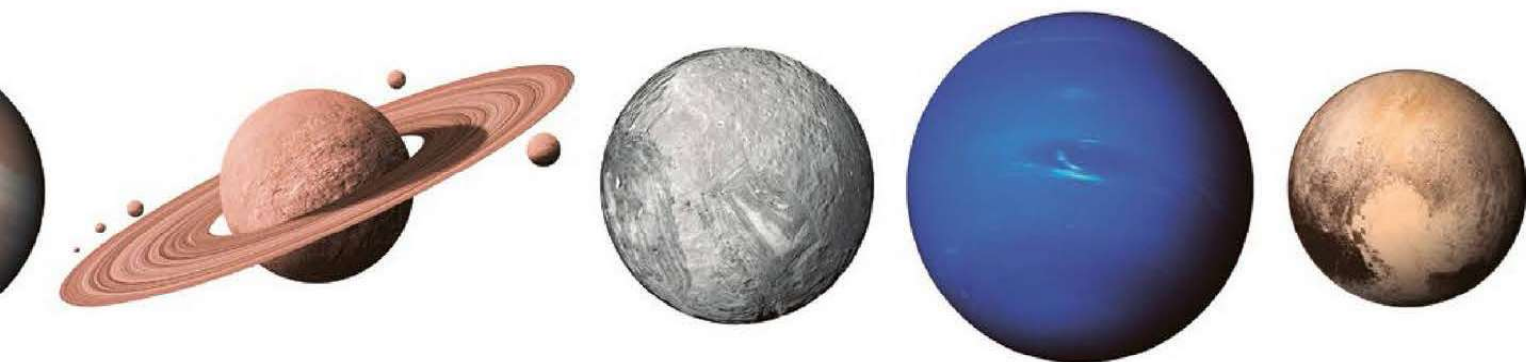
x.com/byneontelegram

O escanea el código QR:



A pesar de los avances acumulados durante décadas de exploración espacial, el sistema solar sigue presentando grandes incógnitas. La investigación ha permitido comprender ciertos aspectos fundamentales de su dinámica, composición y evolución, pero cada hallazgo abre a su vez nuevas preguntas.

SHUTTERSTOCK



rios

En 2006 la comunidad astronómica internacional echó a Plutón del exclusivo grupo de los planetas del sistema solar dejándolo en tan solo ocho miembros. Ahora, una década más tarde, dos astrónomos del conocido Instituto Tecnológico de California (CalTech), Konstantin Batygin y Michael Brown, han publicado en la revista *Astronomical Journal* que tienen indicios para pensar en la existencia de un noveno planeta situado más allá del cinturón de Kuiper, una región situada detrás la órbita de Neptuno y del que Plutón es un miembro destacado. Poblada de planetas enanos, asteroides y otros cuerpos rocosos, la densidad de objetos es 200 veces la del cinturón de asteroides que se encuentra entre Marte y Júpiter.

Todo comenzó en 2014, cuando un antiguo estudiante de Brown, Chadwick Trujillo, y su colega Scott Sheppard publicaron un artículo en el que llamaban la atención sobre la manera peculiar en que se movían 13 de los objetos más distantes de este cinturón. Todos ellos tenían cierta característica orbital muy parecida y sugerían que una forma de explicarlo era suponiendo que había un planeta aún no detectado por los alrededores. Brown no se la creyó mucho, pero le pareció lo suficientemente intrigante como para dedicarle cierto tiempo de investigación. Él es un astrónomo observacional y este trabajo necesitaba de las habilidades de un teórico, así que pidió ayuda a Batygin, un experto



Más allá de Neptuno se encuentra un gran disco de pequeños objetos llamado cinturón de Kuiper, y más después está la Nube de Oort, hogar de los cometas.

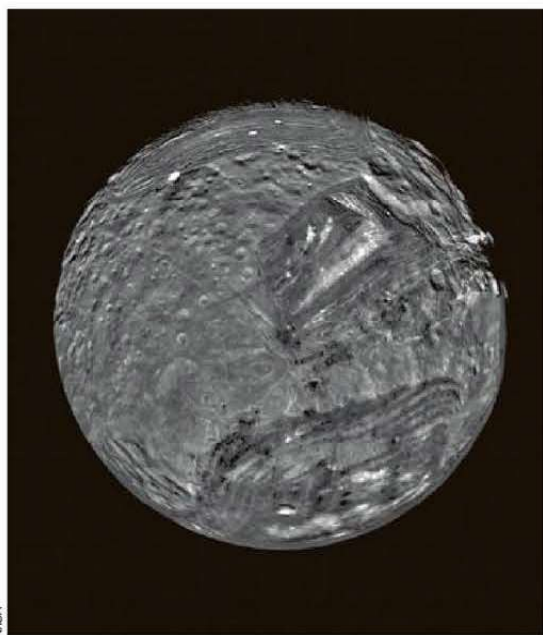
en dinámica del sistema solar. Tras año y medio de cálculos encontraron que seis de los objetos más distantes del conjunto original de Trujillo y Sheppard seguían órbitas elípticas que apuntaban en la misma dirección en el espacio. Las órbitas eran tan parecidas que la probabilidad de que hubiese ocurrido por casualidad era de 0,007 %. «Es como si tuviéramos seis manillas en un reloj, cada una moviéndose a un ritmo distinto y cuando se te ocurre mirar todas están en el mismo lugar», comentó Brown.

EL MONSTRUO DE FRANKENSTEIN DEL SISTEMA SOLAR

Así que Brown y Batygin retomaron la idea del planeta perdido y postularon la existencia de un cuerpo muy masivo que sigue una órbita muy excéntrica —no circular como creían Trujillo y Sheppard— bautizado con el nombre de Noveno Planeta. Según sus cálculos el punto más cercano al Sol se encuentra a 300 unidades astronómicas (UA, que se define como la distancia media de la Tierra al Sol) y el más alejado puede alcanzar las 700 UA, lo que implica que tarda en dar una vuelta completa al Sol entre 10 000 y 20 000 años. También han deducido su masa y tamaño: 10 veces superior a la de nuestro planeta y de 2 a 4 veces su diámetro. Dicen estos astrónomos que este hipotético planeta, además de explicar esas peculiaridades orbitales, también da cuenta de la extraña dinámica que tienen ciertos planetoides de la zona, como Sedna. Sea como fuere, encontrarlo va a ser difícil: primero porque en la zona más alejada de su órbita su brillo es indetectable para nuestros telescopios, y segundo porque la región en la que supuestamente se encuentra coincide con el plano de la Vía Láctea; con la cantidad de estrellas de fondo que existen hace su búsqueda aún más complicada. Incluso con el telescopio espacial WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) de la NASA, que ha descubierto un buen número de júpiteres y saturnos alrededor de otras estrellas, lo tendrá difícil pues estamos ante un mini-Neptuno. La única forma de confirmar su existencia es de forma indirecta, estudiando la distribución orbital de más cuerpos del cinturón de Kuiper. Curiosamente, el propio cinturón tiene su misterio: a 50 UA del Sol la población de objetos prácticamente desaparece, algo que va en contra de los

modelos teóricos, que predicen que debería incrementarse. ¿Será debido al efecto de ese planeta aún no descubierto?

Los confines de nuestro sistema solar guarda muchas incógnitas. Por ejemplo, antes de la llegada de la misión *New Horizons* a Plutón no conocíamos con precisión el tamaño de este explaneta. De hecho se pensaba que era más pequeño que otro de los grandes cuerpos de la zona, Eris, pero las mediciones tomadas por la sonda lo han reinstaurado en el trono. Y no solo eso, sino que hemos descubierto en él colinas de



Miranda es el más interior y pequeño de los cinco satélites uranianos principales, con tan solo 480 kilómetros de diámetro.

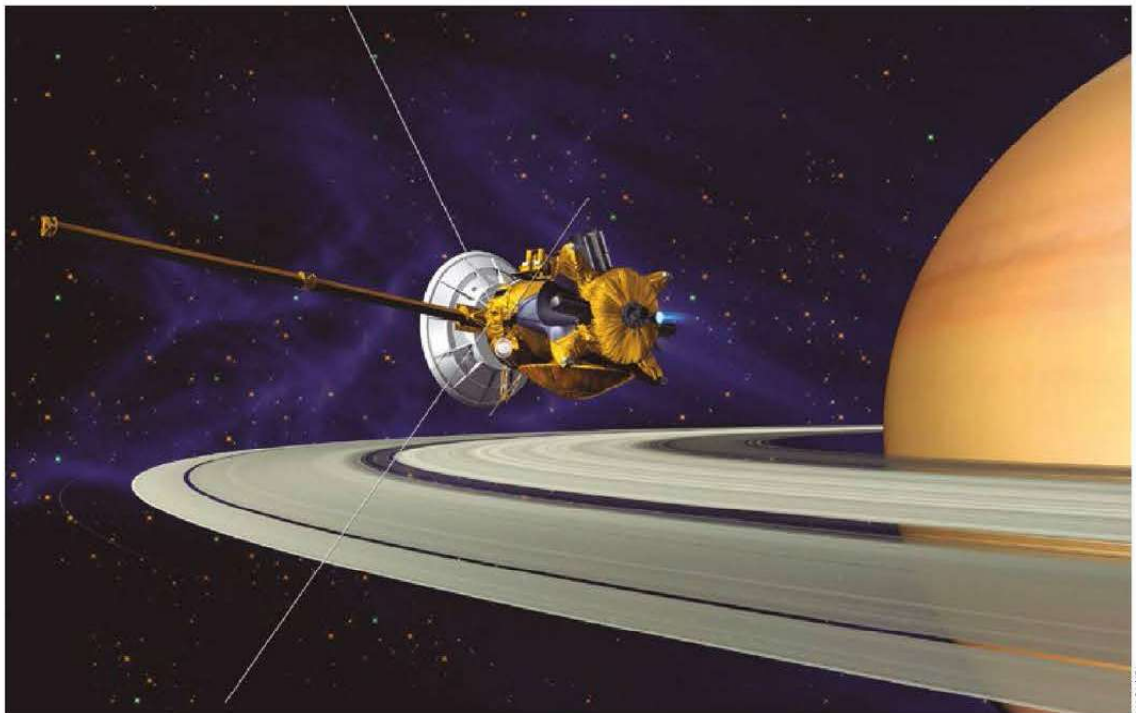
lo que parece ser hielo, montañas muy altas —de 3 a 4 km—, glaciares de nitrógeno congelado y unos campos de dunas que desafían toda explicación habida cuenta de que la atmósfera de Plutón no es lo suficientemente densa como para que haya viento.

En 2006 el telescopio espacial *Hubble* y el *Keck* de Hawái descubrieron una mancha negra en Urano. Anteriormente ya se habían observado otras similares y se supone que son causadas por remolinos de la atmósfera. Pero lo que se desconoce es por qué son negros: algo oscuro debe venir de debajo. Cinco años más tarde, en 2011, se descubrió justo lo contrario: puntos blancos y brillantes. Creemos que son nubes de metano y parecen estar asociados a los puntos negros, pero hasta el momento nadie ha sido capaz de dar una explicación convincente.

Orbitando alrededor de Urano se encuentra lo que algunos astrónomos llaman el monstruo de Frankenstein del sistema solar, Miranda, la luna más deforme de nuestro barrio cósmico. Recibe tan peculiar sobrenombre porque parece haber sido construida con trozos que no se ajustan entre sí, y nadie sabe por qué. Una de las hipótesis que se manejan es que sufrió una colisión que estuvo a punto de romperla en pedazos, pero por suerte la gravedad pudo recomponerla. Claro que echarle la culpa a un peculiar billar cósmico es uno de los recursos más habituales que usan los astrónomos para explicar aquello que no entienden; el satélite Júpiter es un buen ejemplo de ello.

Es la tercera luna más grande de Saturno y ha resultado ser fuente de misterios desde que el italiano Giovanni Cassini la descubriera en 1671. El primero de ellos fue planteado por el propio Cassini, al darse cuenta de que la cara del satélite que encara su ór-

HAY INDICIOS PARA PENSAR EN LA EXISTENCIA DE UN NOVENO PLANETA SITUADO MÁS ALLÁ DEL CINTURÓN DE KUIPER



Representación de la sonda *Cassini* durante la maniobra de inserción en la órbita de Saturno (SOI), justo después de que el motor principal comenzara a funcionar.

bita era diez veces más oscura que su cara posterior. Este enigma se mantuvo durante 336 años, hasta que la sonda *Cassini* llegó al planeta de los anillos. Lo que se descubrió es que Jápeto, a medida que se desplaza, barre el polvo que se encuentra en su camino orbital. Esto oscurece la parte frontal, lo que conlleva una mayor absorción de luz y causa que el hielo se funda, lo que hace que la superficie se oscurezca aún más y, por tanto, absorba más luz... Ahora bien, resuelto el misterio la sonda de la NASA y la ESA nos dejó otro: una cresta montañosa de 18 km de altura que recorre prácticamente todo el ecuador del satélite, 1600 km. Démonos cuenta de lo que significa: una luna que tiene la novena parte del diámetro de la Tierra posee una cordillera montañosa dos veces más alta que el Everest. ¿Qué demonios hace ahí? Unos dicen que Jápeto tenían un anillo a su alrededor que acabó cayendo y formó esa cordillera; otros que fue ocasionado por el impacto —¡cómo no!— de un asteroide de 1000 km de diámetro.

LA GRAN MANCHA ROJA

Y eso no es todo. Las imágenes tomadas por la *Cassini* han revelado que en su superficie se han producido hasta 30 enormes avalanchas de hielo, que se desplazan por el terreno a gran velocidad y viajan muchos kilómetros antes de detenerse. Estas avalanchas tienen asombrados a los científicos pues son más grandes de lo que deberían ser: no han encontrado un mecanismo que las explique. En nuestro planeta también se dan y reciben el nombre de «sturzstrom» y, al igual que en Jápeto, no está nada claro su origen. Estas avalanchas pueden alcanzar una velocidad de 100 km/h e incluso ir cuesta arriba, y nadie sabe por qué.

¿Qué decir de lo que sucede en el sistema de satélites de Júpiter? En Io, el cuerpo volcánicamente más activo del sistema solar, algunos lanzan lava a 375 km por encima de la superficie. Eso no es lo raro, sino que los volcanes aparecen en lugares donde los modelos teóricos dicen que no deberían estar. ¿Y Europa? En 2013 unos

JÚPITER OCULTA UNO DE LOS GRANDES MISTERIOS HISTÓRICOS DEL SISTEMA SOLAR: LA GRAN MANCHA ROJA

astrónomos usando el telescopio *Hubble* dijeron haber observado géiseres que lanzaban vapor a 200 km de altura. La cuestión es que nadie más los ha vuelto a observar. ¿Realmente están ahí? ¿Fue un suceso único?

Por su parte Júpiter oculta uno de los grandes misterios históricos del sistema solar: la Gran Mancha Roja. Después de cientos de años nadie sabe por qué sigue ahí esa tremenda tormenta en la que caben dos tierras; ya tendría que haber desaparecido. Así ha pasado con la llamada Gran Mancha Oscura de Neptuno, descubierta en 1989 por la *Voyager 2* y que desapareció en 1994, volviendo a aparecer al poco tiempo pero esta vez en el hemisferio norte. En la actualidad no sabemos si todavía está ahí.

Entre Marte y Júpiter, en medio del cinturón de asteroides, nos encontramos con Ceres, el planeta enano más pequeño del sistema solar. En las imágenes tomadas en 2005 apareció una mancha blanca solitaria sobre su superficie. Cuando la sonda *Dawn* de la NASA lo sobrevoló en abril de 2015 esa peculiar y enigmática formación era más que evidente. Poco a poco, a medida que la sonda se iba acercando, se descubrieron más de 130 puntos brillantes, la mayoría asociados a cráteres de impacto, pero ninguno tan grande y brillante como Spot 5 o Big One, localizado dentro de un cráter de 90 km de diámetro llamado Occator: imágenes de alta resolución mostraban que tenía unos 10 km de ancho. ¿Qué es y a qué se debe? Se supone que el hielo o algún tipo de sal tiene algo que ver pues Ceres tiene mucha agua, más que cualquier otro cuerpo del sistema solar interior, exceptuando la Tierra. De hecho, según el análisis de los datos obtenidos realizado por Andreas Nathues del Instituto de Investigación del Sistema Solar del Instituto Max Planck alemán y publicado en diciembre pasado en *Nature*, solo caben tres posibles explicaciones: hielo, depósitos de sal o minerales arcillosos. Quien parece tener más boletos son los acúmulos de sal, pero esto nos conduce a una cuestión sin respuesta: ¿Hay un océano salobre situado entre la superficie rocosa y el manto? Si es así, ¿qué es lo que evita que se congele? Por si fuera poco, este planeta enano nos regaló otro misterio cuando el telescopio espacial *Herschel* descubrió que arroja agua líquida al espacio. ¿Puede tener relación con los puntos blancos encontrados por *Dawn*?

¿DÓNDE ESTÁ EL METANO?

Pero para enigmas sin resolver, ahí tenemos a Marte. El planeta rojo se lleva la palma, pero no porque sea un lugar especialmente misterioso, sino porque es el lugar más explorado de todo el Sistema Solar. Por supuesto los que se llevan la palma es dónde está toda el agua que corrió por Marte en el pasado y si alguna vez tuvo vida. Asociado a este último, el más llamativo es el descubrimiento de metano en la atmósfera. Es un misterio que lleva entre nosotros medio siglo, desde que la *Mariner 7* detectó su tenue presencia cerca del polo sur. Claro que al poco tiempo los investigadores se retractaron diciendo que en realidad la señal provenía de dióxido de carbono congelado. En 2003 y 2004 la cuestión del metano volvió a aparecer al afirmarse que se habían en-



NASA/SCIENCE SOURCE

Ilustración digital de la *rover Curiosity*, de la misión Laboratorio Científico de Marte de la NASA, mientras utiliza su instrumento de Química y Cámara (ChemCam).

contrado grandes nubes de metano en la atmósfera, lo que significó que los que piensan que el planeta rojo oculta algún tipo de vida se entusiasmaran: en la Tierra este gas lo originan en su mayoría organismos vivos —solo una pequeña fracción viene de procesos no biológicos—. Pero pocos años más tarde las nuevas misiones fueron incapaces de detectar ni la más leve brizna, lo que añadió más misterio al asunto. El metano no puede desaparecer en cuestión de pocos años, pues se mantiene en la atmósfera de manera estable al menos durante tres siglos. Cuando llegó la *rover Curiosity* estábamos seguros de que el enigma se iba a resolver... vana ilusión. Entre octubre y junio de 2013 estuvo olfateando la atmósfera en seis ocasiones y en ninguna lo encontró. Pero poco tiempo después la nariz de la *Curiosity* lo detectó en cuatro mediciones a lo largo de dos meses. ¿De dónde había salido? ¿Realmente se ha encontrado metano? Un gas no es algo que vaya y venga a su antojo... Un científico de la NASA en el Ames Research Center, Kevin Zahnle, dice que sí, pero que viene de la propia *rover*.

Si miramos al cielo marciano veremos sus dos lunas, Fobos y Deimos, que fueron descubiertas por Asaph Hall en 1877. Pequeñas e irregulares, siempre se ha pensado que se trata de dos asteroides que quedaron atrapados en el pozo gravitatorio de Marte. Deimos da una vuelta alrededor de Marte en poco más de 30 horas y Fobos en menos de ocho; por la noche debe ser un espectáculo verlo cruzar el cielo a toda pastilla. Sin embargo, parece que eso no va a suceder eternamente. El destino de Fobos está maldito pues los cálculos predicen que acabará cayendo sobre la superficie marciana dentro de 20-40 millones de años. De hecho, según el astrónomo planetario Terry Hurford, la distribución de las numerosas grietas que cruzan la superficie de

**PANTHEON FOSSAE ESTÁ COMPUESTO POR
UNOS 50 CANALES QUE SE RAMIFICAN EN TODAS
DIRECCIONES DESDE LA CUENCA DE IMPACTO**

Cinco preguntas en espera de respuesta

1 ¿Por qué el polo sur del Sol está más frío que el norte? Cuando la sonda *Ulysses* pasó por los polos de nuestra estrella entre 1994 y 1995 descubrió esta peculiar anomalía que aún espera explicación: el polo sur es 80 000 grados más frío que el norte.

2 ¿Por qué son tan diferentes los dos hemisferios marcianos? El norte está compuesto por tierras bajas y llanas mientras que el sur posee una geografía totalmente escarpada.

3 ¿Por qué el eje de rotación de Urano es paralelo al plano de la eclíptica? Urano es el único planeta cuyo eje de rotación se encuentra en el mismo plano que define su movimiento de traslación alrededor del Sol: es un planeta que viaja tumbado.

4 ¿Por qué Titán tiene atmósfera? Es la única luna del sistema solar que posee una atmósfera significativa a pesar de que no es un objeto especialmente grande. Marte, mayor que Titán, tiene una atmósfera mucho más tenue. Además, esta compuesta en un 95 % de nitrógeno. ¿De dónde vino?

5 ¿Existe la nube de Oort? Se supone que a 50 000 UA del Sol existe una especie de cáscara de cometas que envuelve el sistema solar y es de donde vienen los cometas de periodo largo con órbitas muy elípticas. Esta es la única razón por la cual los astrónomos creen que existe, pero ¿es verdad?



Vista infrarroja de la luna Titán de Saturno desde la nave espacial *Cassini* de la NASA durante el sobrevuelo T-114 de la misión, el 13 de noviembre de 2015.

Fobos, que han sido provocadas por las fuerzas de marea gravitatorias del planeta, son un indicio de que ha comenzado el principio del fin de esta pequeña luna marciana. ¿Qué sucederá después? Todo dependerá de la estructura interna del satélite. Según Benjamin A. Black y Tushar Mittal, de la Universidad de California en Berkeley, lo más probable es que la corteza externa de Fobos salga volando y, en alrededor de una semana, forme un anillo de restos alrededor de Marte. Y allí lo tendremos, alrededor del planeta rojo, durante como mucho 100 millones de años. Mientras, los restos de Fobos tendrán un final mucho más rápido: chocarán contra el planeta abriendo una serie de cráteres oblicuos sobre el ecuador.

En el planeta más parecido al infierno, Venus, tenemos un misterioso remolino. Es un vórtex que se encuentra en el polo sur y se comporta como una tormenta, pero sin lluvia ni relámpagos y 4 veces más grande que las similares de nuestro planeta. Tiene unos 1800 km de diámetro, 18 de altura y se encuentra a 41 km por encima de la superficie del planeta, a tan solo tres grados del polo sur, alrededor del cual da una vuelta cada cinco a diez días. Está constantemente rompiéndose y reconstruyéndose cada dos días y su forma cambiaba con el tiempo: a veces parece una S, otras un 8 pero lo más normal es que sea irregular. En 2013 se descubrió que no es un único vórtice, sino que en realidad son dos: se fusionan y se separan, pero rara vez se alinean. La cuestión es que nadie sabe qué hacen ahí, y eso que se lleva observando diariamente desde que la sonda de la Agencia Espacial Europea *Venus Express* llegase al caluroso planeta en 2006. Todos sospechan que tiene que ver con una de las características más peculiares y misteriosas de Venus: su atmósfera rota 60 veces más rápido que el planeta que se encuentra debajo. Mientras que el día venusino tiene una duración de 243 días terrestres, su atmósfera de una vuelta al planeta cada cuatro.

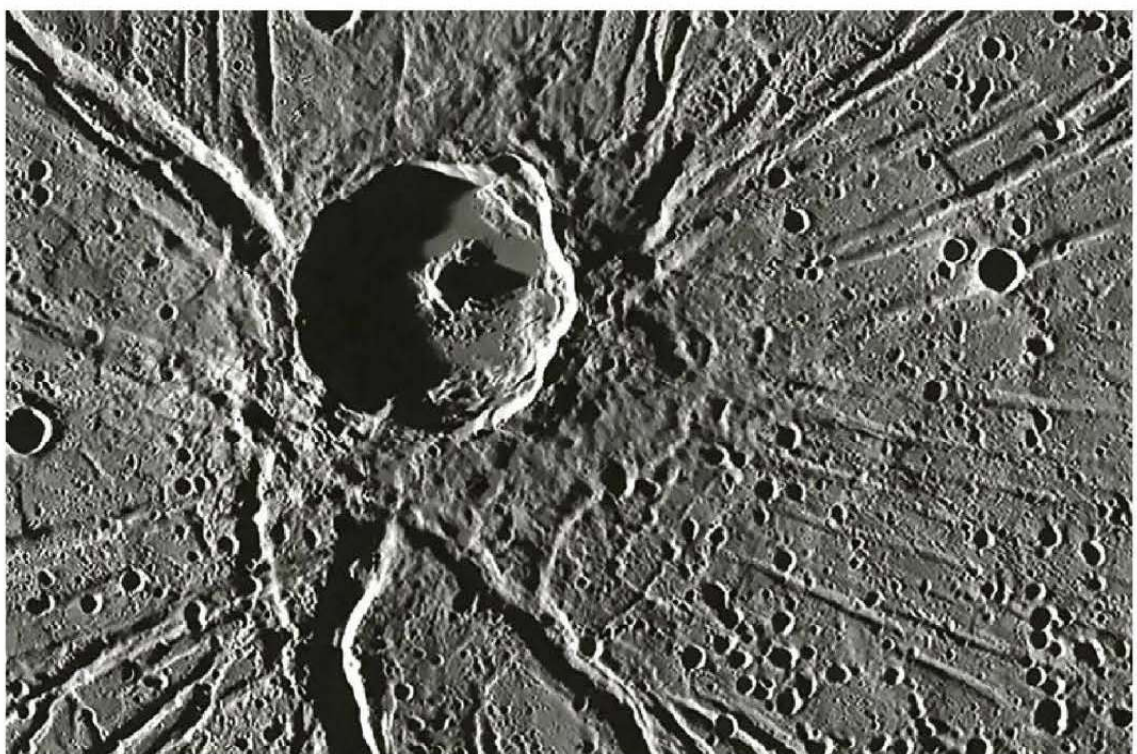


Imagen de la superficie de Mercurio tomada por la sonda *Messenger* que muestra el cráter Apollodorus (centro) rodeado por el sistema radial de fosas conocido como Pantheon Fossae.

Semejante tormenta no conlleva lluvia porque la atmósfera del planeta es tan elevada que evapora todas las partículas a 35 km del suelo. Del mismo modo, no hay vientos debajo de la tormenta: si estuviéramos sentados justo en el polo sur y mirásemos al cielo veríamos un remolino de nubes permanentemente sobre nuestras cabezas y no notaríamos nada.

Pero en realidad el mayor misterio de Venus, y uno de los misterios más antiguos del sistema solar, es el tenue brillo amarillento que se observa en el lado oscuro del planeta desde 1643 —recordemos que tanto Mercurio como Venus presentan fases, como la Luna—. Recibe el nombre de Luz Cenicienta porque se parece a esa luminosidad apagada que podemos ver en la parte oscura de nuestra Luna en creciente y que en realidad es el reflejo de la luz del Sol reflejada por la Tierra: es el reflejo de un reflejo. En este caso no es así. Observada por muchos astrónomos, cuando en el siglo XIX se creía que Venus debía estar habitado, el alemán Franz von Paula Gruithuisen sugirió que debían tratarse de los fuegos de artificio en honor a la coronación de un nuevo emperador. Obviamente los venusinos no eran republicanos. Sea como fuere, el debate sobre qué es y de dónde viene aún no se ha cerrado.

LAS RAREZAS DE MERCURIO

Y llegamos a Mercurio, donde se encuentra el cráter de impacto más extraño de todo el sistema solar. Cuando la sonda *Messenger* de la NASA lo sobrevoló en enero de 2011 fotografió un cráter que rápidamente fue bautizado como «la araña» —su nombre oficial es Pantheon Fossae—: está compuesto por unos 50 canales que se ramifican en todas direcciones desde la cuenca de impacto. Se sospecha que lo que está detrás de esta extraña formación es actividad volcánica, pero nada es seguro. Y este no es el único misterio que ocultan los numerosos cráteres que salpican la geografía de Mercurio. Bajo su superficie debe estar pasando algo porque encontramos cráteres en los que el fondo se ha levantado por encima de su borde, y que zonas antes niveladas, planas, se han inclinado formando cuevas. Tampoco nadie sabe por qué. Y es que Mercurio es bastante raro: el núcleo sólido ocupa más de la mitad del volumen del planeta (en proporción es cinco veces mayor que el de la Tierra) y tiene un manto minúsculo. Se piensa que el culpable es el Sol, que pudo vaporizar las capas más externas o —¡qué sorpresa!— que una gran colisión pudo hacer ese trabajo. El problema de estas explicaciones es que los elementos volátiles, que tendrían que haber sido los primeros en desaparecer, están en la misma proporción que en la Tierra. No hay duda de que el sistema solar encierra sus misterios hasta el punto de que nuestras sondas, las que mandamos de exploración, nos reglan los suyos. El más llamativo es que no se mueven como mandan nuestras precisas leyes de la dinámica celeste.

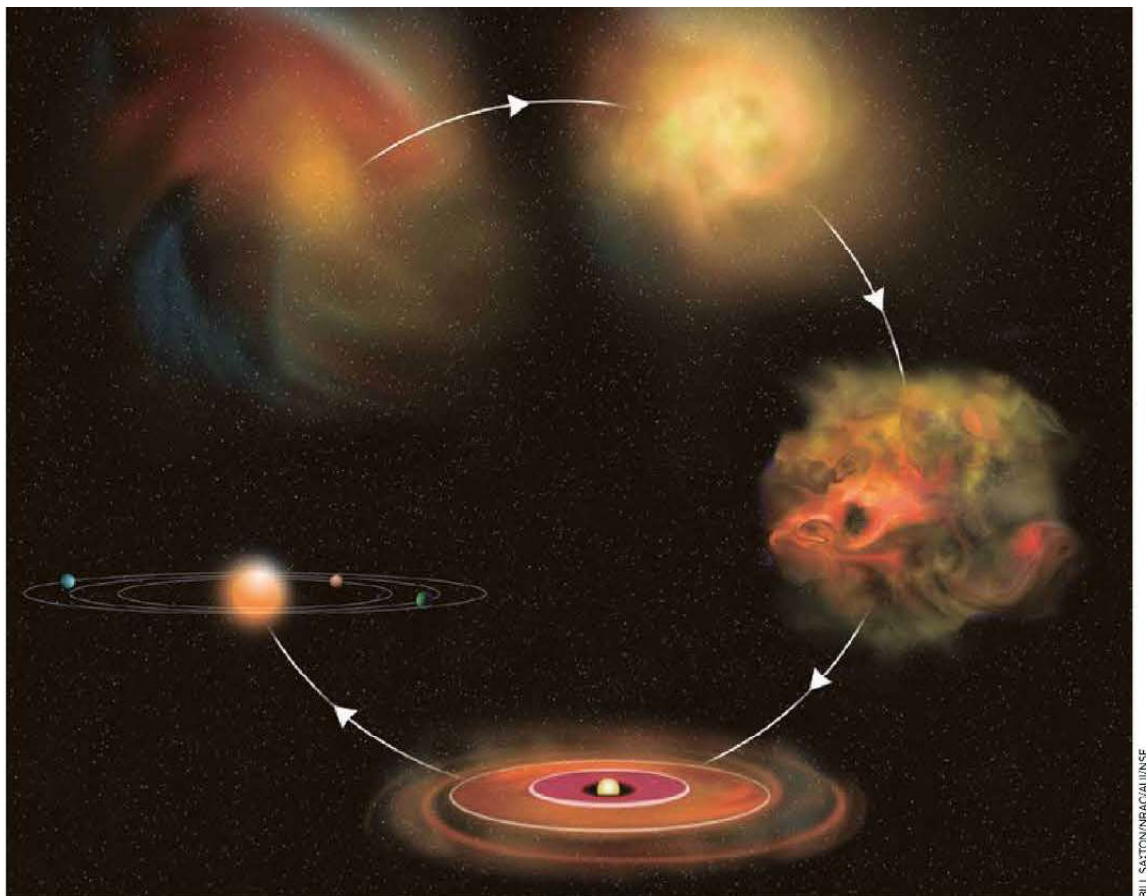
Desde que comenzó la exploración espacial hay una maniobra que permite a las sondas coger velocidad sin gastar una gota de combustible: sobrevolar cerca de un planeta para usar su energía gravitatoria y salir disparadas. En el argot técnico se llama *flyby*. Pues bien, a veces se mide una pequeñísima e inexplicable variación en la velocidad: puede ir de 2 m/s (como se midió en la *Cassini*) a 13 mm/s (con la sonda NEAR). Es algo tan minúsculo que no afecta a la trayectoria pero según nuestras leyes de la dinámica no debería darse. Y sin embargo, ahí está. ■



El naci miento del sistema solar

Recreación de un disco de formación planetaria, semejante al que rodeó a la estrella TYC 8241 2652. El polvo, producto de colisiones entre cuerpos en formación, absorbe la luz estelar y la expulsa en forma de radiación infrarroja.

NASA/JPL-CALTECH



Proceso de formación estelar y planetaria: las nubes interestelares de gas y polvo colapsan, giran y se aplanan, dando origen a una estrella y a un disco del que pueden surgir los planetas.

Nuestra historia empieza con una fría envoltura de polvo y gas que sufre un colapso gravitatorio y genera lo que los astrónomos llaman el núcleo de una protoestrella. Mientras tiene lugar esta caída de materia desde la envoltura, el núcleo rota a gran velocidad. Al final el colapso acaba deteniéndose por dos motivos: o bien porque la envoltura desaparece engullida por la estrella recién nacida o bien por efecto del viento solar generado por ella, que la barre hacia afuera. Es más, la primera vez que surge este peculiar viento lo hace en forma de dos chorros de gas que salen por los polos de la estrella: es una fase que dura 100 000 años y se cree que por ella pasan todas las estrellas de poca masa, como la nuestra.

MODELO DE ACRECIÓN DE SISTEMAS PLANETARIOS

Cuando el polvo desaparece la temperatura superficial de la estrella alcanza los 4000 grados y posee una luminosidad varias veces la del Sol en la actualidad. En este momento la estrella ha perdido casi toda su velocidad de rotación y se queda en unos relajados 20-50 km/h: es la fase que se llama de T Tauri, en honor a la primera estrella que se encontró en esta fase de la evolución estelar.

EN EL CAMPO DE LA RECREACIÓN DE SISTEMAS PLANETARIOS LOS PRIMEROS TRABAJOS SE INICIARON A MEDIADOS DE LA DÉCADA DE 1960

Un millón de años después de terminar el colapso el disco ha perdido la mitad de su masa debido al viento o a las turbulencias. El polvo, que está situado en el plano medio de la estrella, empieza a «coagular», a agregarse, formando pequeños cuerpos rocosos que reciben el nombre de planetesimales: esto sucede por colisiones entre ellos, porque aún no tienen masa suficiente para atraerse unos a otros gravitatoriamente; solo cuando alcancen un tamaño aproximado de un kilómetro podrán hacerlo. Finalmente, cuando la estrella alcance los diez millones de años de edad todo el gas circundante habrá sido expulsado de los alrededores quedando un sistema solar limpio e impoluto.

Esto es conocido como el modelo de acreción de sistemas planetarios. Por supuesto se trata de un modelo numérico y, por tanto, de una simulación. Estas investigaciones son habituales en astronomía: la única forma de conocer cómo funcionan las estrellas y galaxias es mediante simulaciones por ordenador cuyos resultados se comparan con las observaciones: si los resultados computacionales coinciden con los observados por los telescopios podemos estar razonablemente seguros de que vamos por buen camino.

En el campo de la recreación de sistemas planetarios los primeros trabajos se iniciaron a mediados de la década de 1960. El primero en abordarlo no fue un astrónomo, sino un ingeniero de la RAND Corporation (una empresa que habitualmente contrata proyectos para las fuerzas armadas estadounidenses) llamado Stephen H. Dole. Su interés estaba dirigido por la búsqueda de posible vida extraterrestre: en 1964 acababa de publicar junto con Isaac Asimov el libro *Habitable Planets for Man*. Ese mismo año comenzó a desarrollar un programa de ordenador para generar sistemas planetarios, que culminó en 1965. El desarrollo —y quien hizo la mayor parte del trabajo— fue de un compañero de empresa y analista de sistemas



La nebulosa de reflexión GN 04.32.8, parte de la nube molecular de Tauro. En el centro brilla el sistema estelar triple compuesto por HP Tau, HP Tau G2 y HP Tau G3.

llamado Jerry Rice. La versión final del programa se llamó ACRETE y estaba escrito en un lenguaje de programación que hoy muy pocos recuerdan, FORTRAN. Los primeros resultados los obtuvieron entre marzo de 1966 y abril del año siguiente y aparecieron publicados en marzo de 1969 bajo el título *Computer Synthesis of the origin of the Solar System*.

LA ACRECIÓN DE «PEPITAS»

El modelo de Dole era muy sencillo y suponía que los planetas aparecían por agregación de partículas contenidas en la nube de polvo y gas. El mecanismo de simulación también era muy simple: inyectaba en la nube un núcleo protoplanetario que seguía una órbita elíptica de parámetros escogidos aleatoriamente. El planetóide absorbía materia de la nube a medida que recorría su órbita hasta alcanzar cierta masa crítica; entonces empezaba a acretar gas. Una vez que el primer protoplaneta recorría su órbita el programa colocaba uno nuevo, y así sucesivamente hasta que el polvo desaparecía por completo.

Este fue el estándar de investigación en formación de planetas durante varias décadas. El programa se fue mejorando y se introdujeron otras variables, como las interacciones gravitatorias o las colisiones entre planetoides. El paso de los años, con el desarrollo de nuevas y más detalladas bases teóricas al aumento de la potencia de cálculo de los computadores, ha ido perfilando la imagen que tenemos hoy en día: dentro del disco protoplanetario lo primero que se forma son núcleos de hielo y roca que acabarán convirtiéndose en los centros de los planetas. Después, el gas y polvo interestelar de la zona se va fijando a esos núcleos, haciéndolos crecer.



Harold «Hal» Levison en una sesión informativa sobre las misiones de cuerpos pequeños en 2018 en el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins, Maryland (EE. UU.).

LA TIERRA Y LOS DEMÁS PLANETAS ROCOSOS PUEDEN TARDAR EN FORMARSE 30 MILLONES DE AÑOS

Hasta aquí todo va bien, pero es a partir de este momento cuando el cuidadoso edificio de la formación de planetas se derrumba. Porque este modelo tiene un talón de Aquiles y justamente en el primer paso del proceso: si queremos que se acumule una atmósfera importante, como la que tiene cualquier gigante gaseoso, se necesita un núcleo sólido de al menos diez veces la masa de la Tierra. Y lo que es peor, tiene que haberse formado en unos pocos millones de años. El principal escollo del modelo estándar de formación de sistemas planetarios es, como tantas cosas en esta vida, la falta de tiempo. En este caso el proceso de formación es demasiado lento pues, como hemos visto antes, la estrella barre de gas su sistema diez millones de años después de haber nacido. Por entonces, aquellos cuerpos que están destinados a convertirse en gigantes gaseosos no les ha dado tiempo de crecer y sin gas

por los alrededores, no hay planeta gaseoso. ¿Entendemos el problema? La Tierra y los demás planetas rocosos pueden tardar en formarse los 30 millones de años que predice la teoría, pero los gigantes gaseosos tuvieron que ver la luz 20 millones de años antes, cuando el disco de gas todavía no había desaparecido.

¿Cómo resolver el enigma? Nadie tenía mucha idea hasta que en 2015 un grupo de investigadores liderado por Harold Levison, un astrónomo de barba bien poblada y especializado en mecánica planetaria, publicaba el artículo titulado «Growing the Gas Giant Planets by Gradual Accumulation of Pebbles». Hasta entonces todos los modelos computacionales usaban la vieja regla de similar se «come» lo similar: las rocas incorporan rocas y se hacen montañas, que se unen a montañas pa-



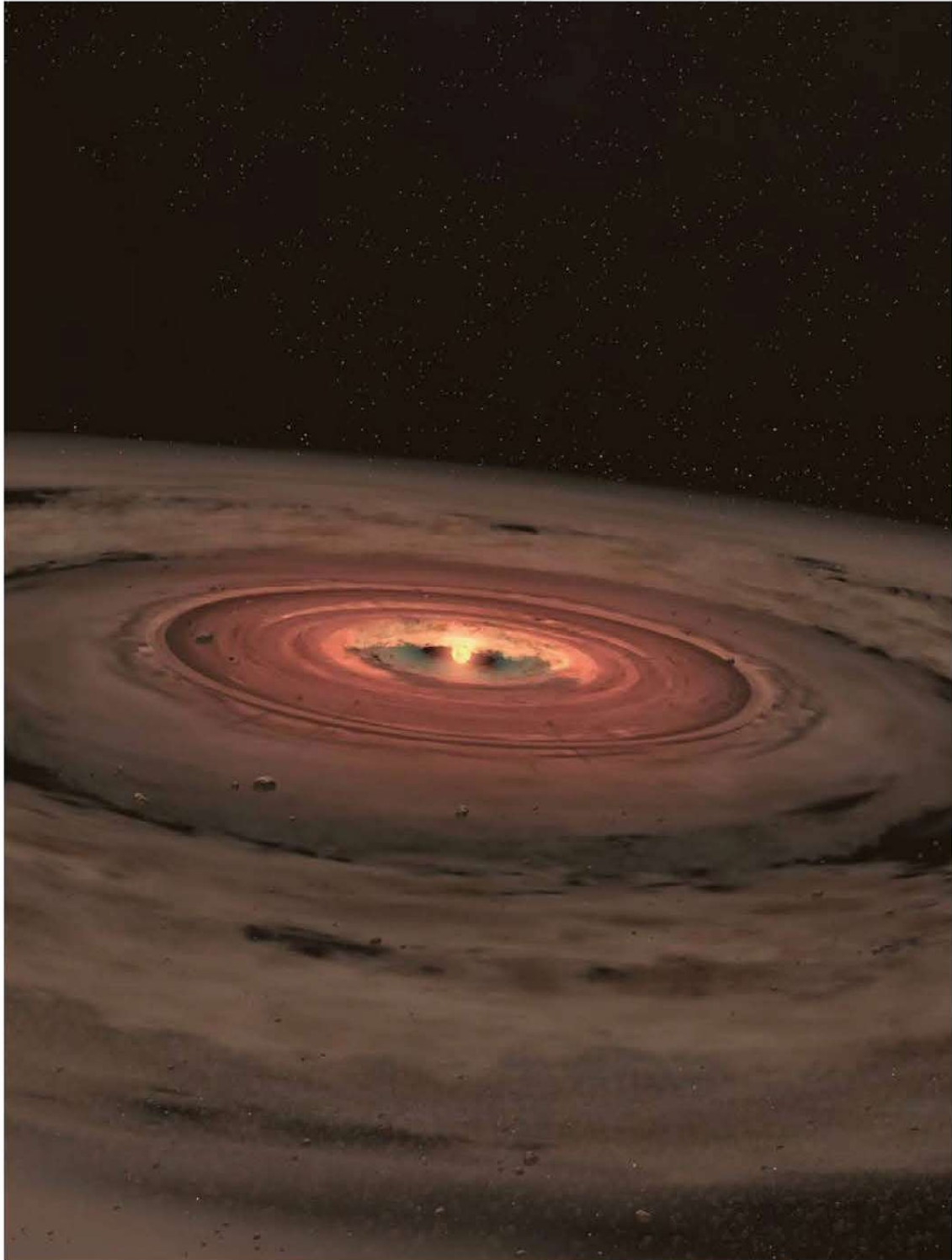
NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER/ESO/L. CALÇADA

Los investigadores buscan comprender la formación de los planetas y los procesos que definen su naturaleza.

ra hacerse más grandes y así sucesivamente. Levison y sus colegas se dieron cuenta de que la respuesta al problema estaba en lo que llamaron la acreción de pepitas.

Los modelos actuales proponen que las «pepitas», objetos de tamaño entre un centímetro y un metro, se agregaron para formar objetos de 100 a 1000 km de diámetro. Estos planetesimales se acretaron después para formar los núcleos de los planetas gigantes, pero si seguimos por este camino lo que se produce al final no es un Júpiter, sino toda una población de cuerpos con masas parecidas a la Tierra.

DESCUBRIR UN NUEVO PLANETA YA NO
ES MOTIVO DE MUCHA EMOCIÓN, PERO
ENCONTRAR ALGO QUE NO SE HA VISTO, SÍ



Concepción artística de una estrella joven rodeada por un disco de gas y polvo, los materiales fundamentales a partir de los cuales se forman planetas rocosos como la Tierra.

Levison y sus colegas pensaron que podían superar esta dificultad si las pepitas se formaban a un ritmo lo suficientemente lento como para permitir que los planetesimales tuvieran tiempo para dispersar a sus «hermanos» del disco de pepitas y así quedarse con todo el pastel. «El crecimiento de los núcleos requiere de cierto tiempo para poder expulsar a sus competidores lejos de las pepitas y hacerles morir de hambre», dice la astrónoma Katherine Kretke. Es más, el gas de los alrededores pudo haber desempeñado un importante papel al aumentar la eficacia de este proceso de acreción: las pepitas seguirían una órbita en espiral hacia el núcleo ayudadas por un intenso viento de cara de gas interestelar.

Lo interesante de este modelo es que reproduce perfectamente la estructura del sistema solar: «Hasta donde sabemos, este modelo es el primero en reproducir la estructura del sistema solar exterior, con dos gigantes gaseosos, otros dos intermedios (Urano y Neptuno) y un prístino cinturón de Kuiper», dice lleno de orgullo Levison.

NADIE SE HABÍA DADO CUENTA DE QUE ESE PLANETA ESTABA AHÍ

Este nuevo modelo proporciona un mecanismo de formación 1000 veces más rápido que el tradicional, ya que en lugar de que objetos similares se agreguen juntos, un objeto dominante puede engullir el material de los alrededores con rapidez y echar a otros similares lejos de donde está. Tras este éxito computacional solo hace falta ver si este modelo tiene algún tipo de corroboración observacional. Esta quizá venga de un par de descubrimientos que se han hecho en los últimos años: el de un joven Júpiter y el de un disco con esas habichuelas planetarias.

En la actualidad descubrir un nuevo planeta ya no es motivo de mucha emoción. Pero encontrar algo que todavía no se ha visto, sí lo es. En este caso lo que se descubrió en diciembre de 2014 desde el Observatorio Gemini instalado en Cerro Pachón (Chile) con el instrumento dedicado a la caza de planetas *Gemini Planet Imager*, es un joven planeta que posee una gran abundancia de metano y cuyas características coinciden con nuestro particular gigante, Júpiter.

Este exoplaneta orbita Eridani 51, una estrella situada a una distancia de tan solo 100 años-luz. Esta es una estrella que ha sido muy observada pero hasta entonces nadie se había dado cuenta de que ese planeta estaba ahí. Los astrónomos han concluido de que se trata de un planeta en sus años de juventud: no lo han visto gracias a la luz que debería reflejar de su estrella, sino por la radiación infrarroja que el propio planeta emite. Se piensa que tiene unos 20 millones de años de edad y su masa alrededor de dos veces la de Júpiter (más de 600 veces la de la Tierra). A medida que se vayan obteniendo nuevos datos podrá servir de prueba de fuego para el nuevo modelo de formación de planetas. También se espera que sea de utilidad lo que un equipo de astrónomos de las universidades inglesas St. Andrews y Mánchester anunciaron en 2015: habían descubierto un anillo de pepitas alrededor de la estrella DG Tauri, a 450 años-luz de nosotros y con solo 2,5 millones de años de vida. Se calcula que esas habichuelas tienen un tamaño de un centímetro y se encuentran desparramadas por un área de cientos de millones de kilómetros en dos bandas separadas a cada lado de la estrella.

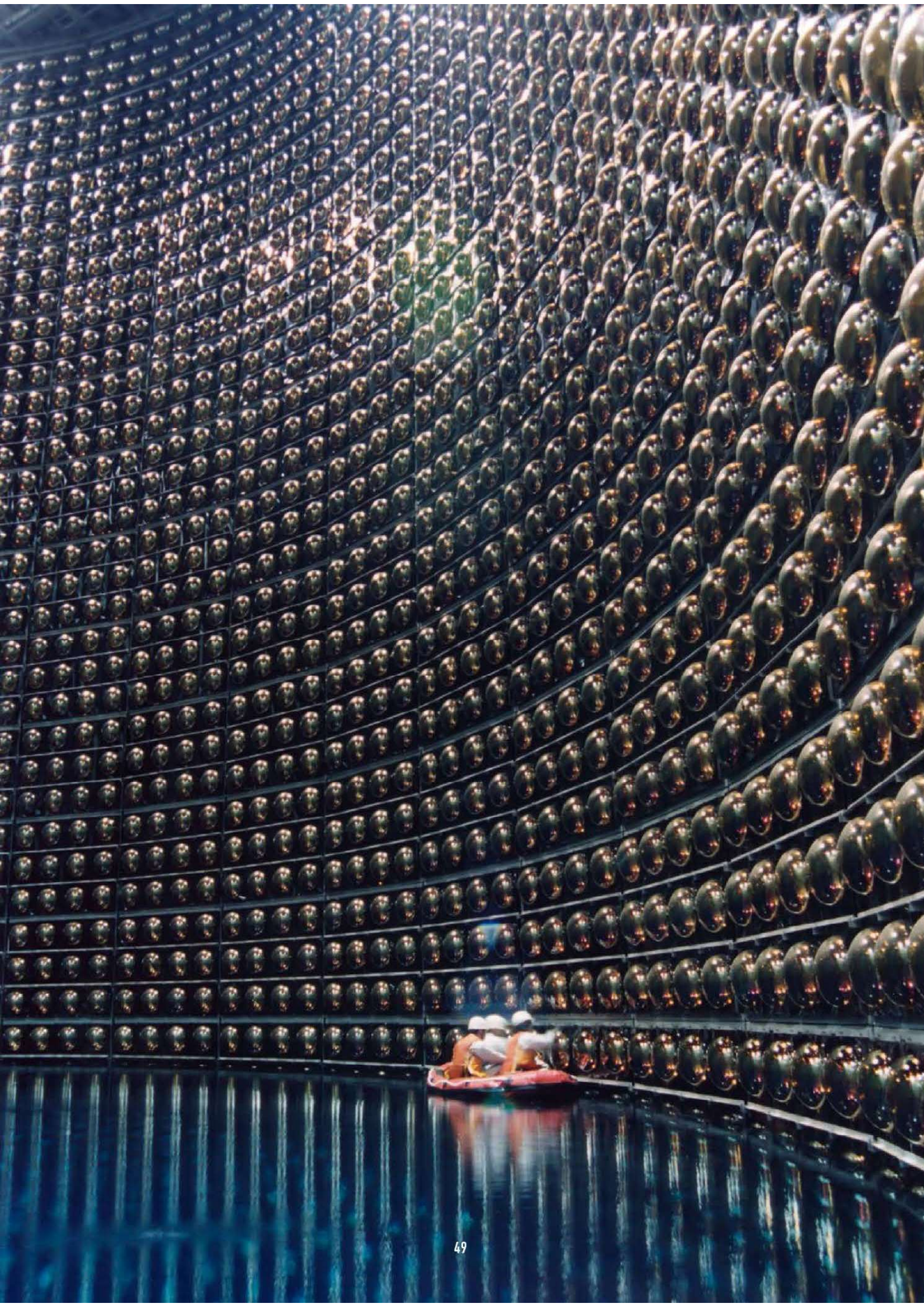
Con estas y otras observaciones podremos resolver de una vez por todas el enigma de cómo apareció Júpiter a 700 millones de kilómetros de nosotros. O 900 millones, cuando está más lejos. ■

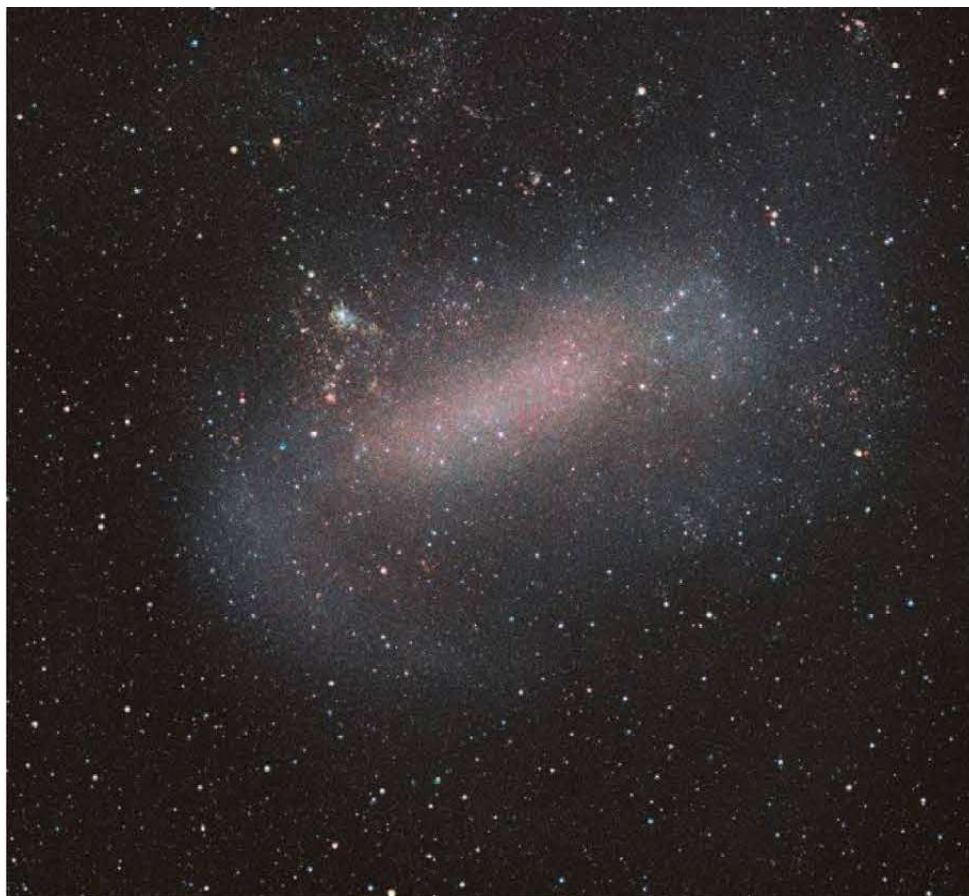
Astronomía sub terránea

El Super-Kamiokande es el detector de neutrinos más grande del mundo.

Con sede en Japón, opera desde 1996 y su funcionamiento se basa en una colaboración internacional que involucra a unas 150 personas y unos 40 institutos de Japón, Estados Unidos, Corea del Sur, China, Polonia, España, Canadá, Reino Unido, Italia y Francia.

KAMIOKA OBSERVATORY, ICRP, THE UNIVERSITY OF TOKYO





La Gran Nube de Magallanes, uno de nuestros vecinos galácticos más cercanos, observada desde el telescopio VISTA de la Agencia Espacial Europea.

Febrero de 1987. En una antigua mina del Japón llamada Kamioka Mozu- ni los físicos tienen instalado un enorme depósito lleno con 3000 toneladas de agua purísima rodeado de detectores. Su objetivo es intentar comprobar una de las predicciones más alucinantes de la teoría de gran unificación, uno de los intentos de los físicos por unificar las fuerzas nucleares fuerte y débil con la electromagnética bajo una única formulación. Según esta teoría, el protón no es estable, sino que se desintegra. El problema es que para verlo tenemos que esperar del orden de 10^{34} años, esto es un billón de billones de años la edad actual del universo. Claro que hay otra forma de hacerlo: en lugar de aguardar todo ese tiempo para ver cómo se desintegra un protón, podemos juntar un montón de protones y ver si alguno se desintegra pasados unos pocos años. Por eso en la mina japonesa había tanta agua almacenada. ¿Y por qué en lo profundo de una mina? Porque hay muchos otros procesos que disparan los detectores, sobre todo aquellos provenientes de los rayos cósmicos, esa lluvia de fotones y partículas que producen los procesos más energéticos del universo. Para impedir que el ruido de fondo no nos deje oír la música, los físicos tienen que enterrar sus equipos bajo miles de toneladas de roca. Es la física de los sucesos poco probables.

LA PRIMERA EXPLOSIÓN DE SUPERNOVA VISIBLE DESDE 1604

Eran las 4:35 de la tarde del lunes 23 de febrero de 1987 cuando en menos de quince segundos los detectores de la mina de Kamioka registraron el paso de once neutrinos. A la misma hora, minutos y segundos, otro detector similar enterrado en una mina de sal cerca de Faipport, Ohio, contó ocho neutrinos, y un tercero, situado

bajo el monte Andyrchi, en el Cáucaso, registró la llegada de cinco. Algo extraordinario, pues ya era raro detectar uno al día. En ninguno de los tres laboratorios subterráneos los científicos fueron conscientes de lo que había pasado hasta que dos semanas más tarde se les pidió que revisaran los registros de ese día.

Sobre las dos de la madrugada, hora chilena, del martes 24 de febrero, Oscar Duhalde, operador del telescopio Swope (en las Campanas, desierto de Atacama, al norte de Chile) se estaba haciendo un café cuando salió un momento al exterior y miró al cielo. En la Gran Nube de Magallanes, una de nuestras galaxias-satélite, cerca de la Nebulosa Tarántula —la nebulosa de emisión más grande conocida y una región de formación de estrellas— vio una estrella brillante donde no debía haber ninguna. Pensó que debería comentárselo a los observadores que estaban allí esa noche, pero estaban contando un chiste subido de tono y Oscar se olvidó de la estrella. Fue el primer ser humano en observar la primera explosión de supernova visible a simple vista desde 1604 y no fue consciente de ello. Dos horas más tarde, Ian Shelton, un joven astrónomo canadiense de 29 años, salía al exterior para comprobar con sus propios ojos algo inaudito: en la última placa que había tomado de la Tarántula (también conocida como 30 Dorado, por encontrarse en la constelación de ese nombre) aparecía un punto brillante de gran tamaño donde no tenía que haber nada. Extrañado, salió al exterior para confirmarlo con sus propios ojos. No había duda, era una supernova, la muerte más catastrófica que puede esperarle a una estrella de gran masa.

De ahí provenían los neutrinos detectados por los laboratorios subterráneos. Una supergigante azul, catalogada como Sanduleak -69 202, había estallado hacía 169 000 años y lo primero que llegó a la Tierra fue el enorme flujo de neutrinos proveniente de esa explosión estelar. Por añadidura, lo sucedido nos da una idea de la dificultad que entraña detectar un neutrino, la partícula conocida más elusiva del universo: de los diez billones de trillones que se calcula barrieron nuestro planeta, se detectaron únicamente 25.

Mucho tiempo ha pasado desde entonces y diversos experimentos en física de astropartículas están en funcionamiento. Algunos están situados en minas profundas, como Super-Kamiokande en Japón, otros en túneles bajo montañas, como Gran Sasso en Italia o en Canfranc en el Pirineo oscense, uno más en un kilómetro cúbico de hielo enterrado en el subsuelo de la Antártida y otro en el fondo del mar Mediterráneo: a 40 km de la ciudad francesa de Toulon y a 80 km de las costas de Sicilia. Agua, hielo, roca... todos estos observatorios de neutrinos tienen un denominador común: enterrados bajo montañas de materia intentan arrojar luz sobre los fenómenos del universo más violentos y complejos de entender.

Pero no todo acaba aquí. Existe otra técnica, muy reciente, que nos permite investigar sucesos cataclísmicos, como la fusión de dos agujeros negros o la colisión de dos estrellas de neutrones, y que proviene de una de las predicciones

**EL PROTÓN NO ES ESTABLE, SINO QUE SE
DESINTEGRA, PERO PARA VERLO TENEMOS
QUE ESPERAR UNOS 1034 AÑOS**

más alucinantes de la teoría general de la relatividad de Einstein: las ondas gravitatorias, que podemos asimilar a olas del mismísimo espacio-tiempo. Hasta el 14 de septiembre de 2015 estas olas eran tan solo una predicción teórica de la que se tenían ciertas pruebas indirectas. Pero ese día, en el Observatorio de Ondas Gravitatorias mediante Interferometría Láser (LIGO), se obtuvo la primera detección directa de esas casi imperceptibles distorsiones del espacio-tiempo, que fueron generadas por la fusión de dos agujeros negros de 30 veces la masa de Sol y situados a 1300 millones de años-luz de nosotros.

¿CÓMO FUNCIONA LIGO?

Ciertamente la mayor parte de la información que nos llega del universo la recibimos en forma de ondas electromagnéticas. Emitidas por átomos y electrones, nos proporcionan información sobre las características físicas de los objetos celestes: temperatura, luminosidad, masa, composición, edad... Por contra las ondas gravitatorias nos hablan de algo totalmente distinto: nos informan de los movimientos de objetos muy masivos. LIGO —y sus otros hermanos menores situados en Alemania e Italia— están contruidos para detectar los temblores del tejido del espacio-tiempo que son provocados por los sucesos más violentos que podemos encontrar en el universo: explosiones de supernova, pares de estrellas de neutrones orbitando en común o, como sucedió en este caso, dos agujeros negros que giran y se aproximan hasta fusionarse.

¿Cómo funciona LIGO? Un rayo láser se dispara contra un divisor de haz, un dispositivo óptico que como su nombre indica divide en dos un haz de luz. Cada uno de ellos viaja por cada uno de los brazos de 4 km en los que se ha hecho el vacío más



En la imagen, equipos láser y de vacío en el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO) para detectar ondas gravitacionales cósmicas.

LA HISTORIA DEL DESCUBRIMIENTO DE LAS ONDAS GRAVITACIONALES ES REALMENTE DIGNA DE UNA PELÍCULA

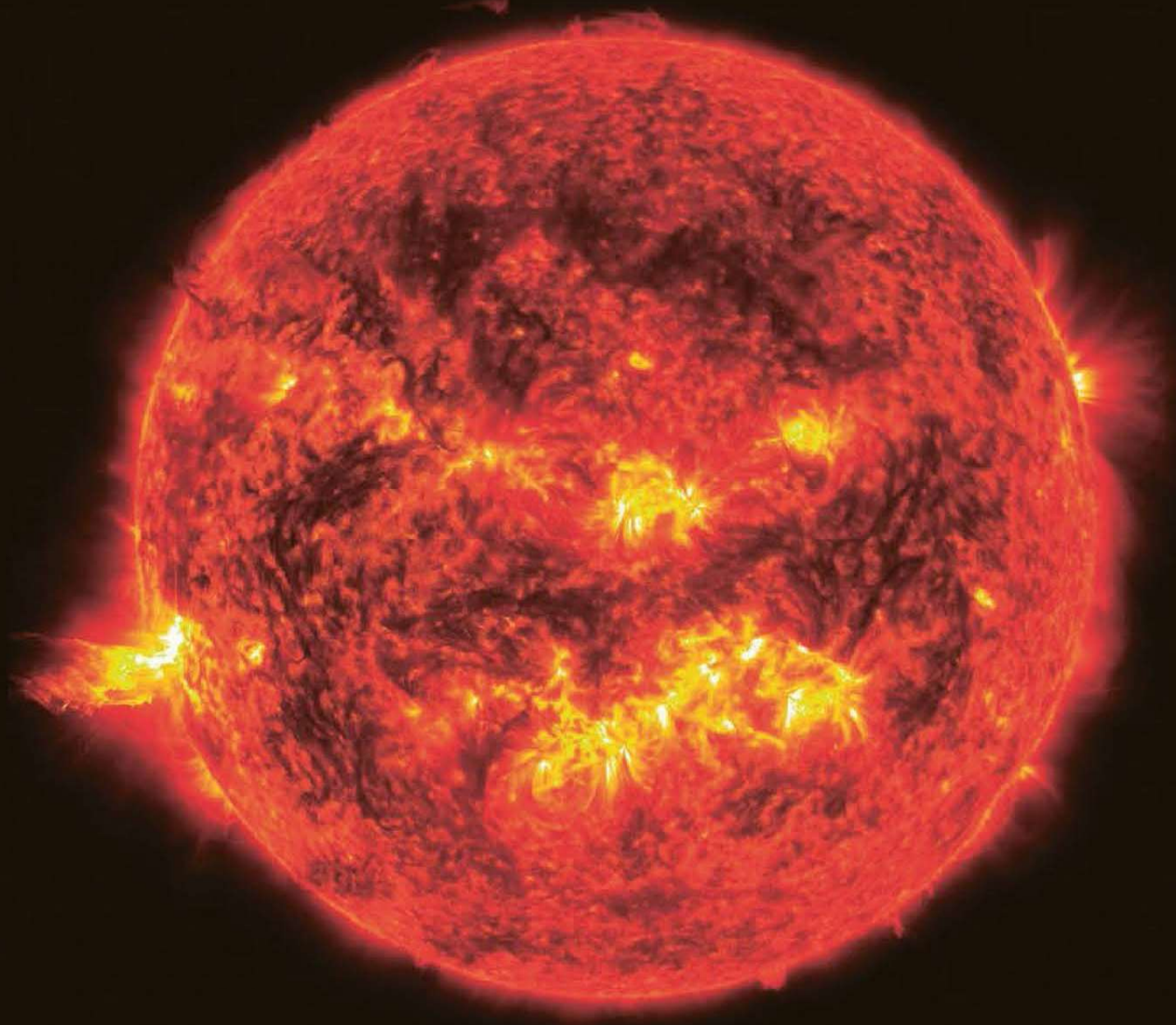
perfecto posible, se reflejan en un espejo situado al final y regresan hasta interferir en un detector extremadamente sensible. Como ambos haces recorren idéntica trayectoria la interferencia es destructiva, esto es, no se registra señal alguna en el detector. Ahora bien, si una onda gravitatoria pasa por la Tierra, esto provoca que aparezca una minúscula e imperceptible diferencia en el camino recorrido por los dos haces que hace surgir, casi mágicamente, una señal en el detector.

Sobre el papel todo parece muy sencillo, pero las dificultades técnicas son impresionantes pues la más mínima perturbación puede provocar la aparición de una falsa señal. La sensibilidad de LIGO es impresionante: si los brazos de LIGO llegasen hasta Próxima Centauri, la estrella más cercana a nosotros y situada a 4,24 años-luz, la onda gravitacional los habría encogido la anchura de un cabello humano. Conseguir detectar eso es, en sí mismo, un logro galáctico.

HACE 1300 MILLONES DE AÑOS-LUZ

La historia del descubrimiento de las ondas gravitacionales es digno de una película. Tras cinco años de trabajo, un mejorado LIGO podía ponerse a trabajar: era el 18 de septiembre de 2015. Según sus creadores, la mayor instalación del mundo de detección de ondas gravitacionales estaba preparada para cumplir su objetivo y estimaban que hacia 2021 alcanzaría la sensibilidad esperada. Pero nadie estaba preparado para lo que sucedió: cuatro días antes de la «puesta de largo oficial» LIGO había registrado el paso de una onda gravitatoria.

Solo fueron 0,2 segundos a las seis menos diez de la mañana del 14 de septiembre. La potencia de lo sucedido no refleja la que realmente se midió en aquella madrugada: los 4 km de túnel recorridos por el rayo láser solo se vieron alterados en una milésima de la anchura de un protón. Semejante nimiedad, casi despreciable, bautizada como GW150914, fue ocasionada por la fusión de dos agujeros negros que en los últimos 20 milisegundos liberó una potencia inimaginable en forma de ondas gravitatorias: 50 veces la radiada por todas las estrellas que existen en nuestro universo observable. Por suerte, semejante catástrofe cósmica sucedió a 1300 millones de años-luz de distancia en la dirección de las Nubes de Magallanes, las galaxias satélites a la nuestra que son visibles desde el hemisferio austral. Poco más podemos saber de su localización exacta. Y poco más sabremos de lo sucedido hace 1300 millones de años, cuando la vida en la Tierra aún seguía dentro del mar y los estromatolitos, esas algas verdeazuladas que todavía hoy podemos ver vivas en Hamelin Pool, Australia, dominaban el planeta. Ningún neutrino, ningún pico de radiación gamma o rayos X, ni siquiera un tímido destello en el visible o en ondas de radio nos ha llegado de semejante evento catastrófico: solo esa minúscula señal es la única prueba de que algo inconmensurablemente violento sucedió en nuestro universo. ■



El dia grama más importante (o casi) de la astrofísica

NASA/GODDARD SDO Imagen del Sol tomada el 20 de junio de 2013 que muestra una intensa fulguración solar (lado izquierdo) y una erupción de prominencia atravesando la atmósfera.

Sabemos que hay estrellas de todos los tamaños y colores. Las hay de gran masa y color azul claro y otras pequeñas y rojizas. Las tenemos grandes y rojas, pequeñas y blancas... ¿Hay alguna manera de poner orden en semejante variedad?

Para hacerlo debemos buscar ciertas propiedades que definan las estrellas. La más obvia es la temperatura superficial (cuando los astrofísicos hablan de la temperatura de las estrellas se refieren a esta, no a la que pueda haber en su interior), que puede determinarse con relativa facilidad. Para verlo imaginemos una estufa eléctrica. Si acercamos la mano al poco de encenderla, notaremos que, a pesar de no ver luz alguna, empezamos a notar un calorcito agradable. Pero que no lo veamos no quiere decir que la estufa no esté emitiendo luz: lo está haciendo en el rango del infrarrojo. Luego, comienza a brillar emitiendo una tenue luz de color rojo intenso. A medida que se calienta, su luz se vuelve más brillante y su color pasa al rojo brillante y, finalmente, al amarillo. Si la estufa se pudiera calentar aún más, la veríamos azul.

¿CÓMO PODEMOS CALCULAR LA TEMPERATURA DE UNA ESTRELLA?

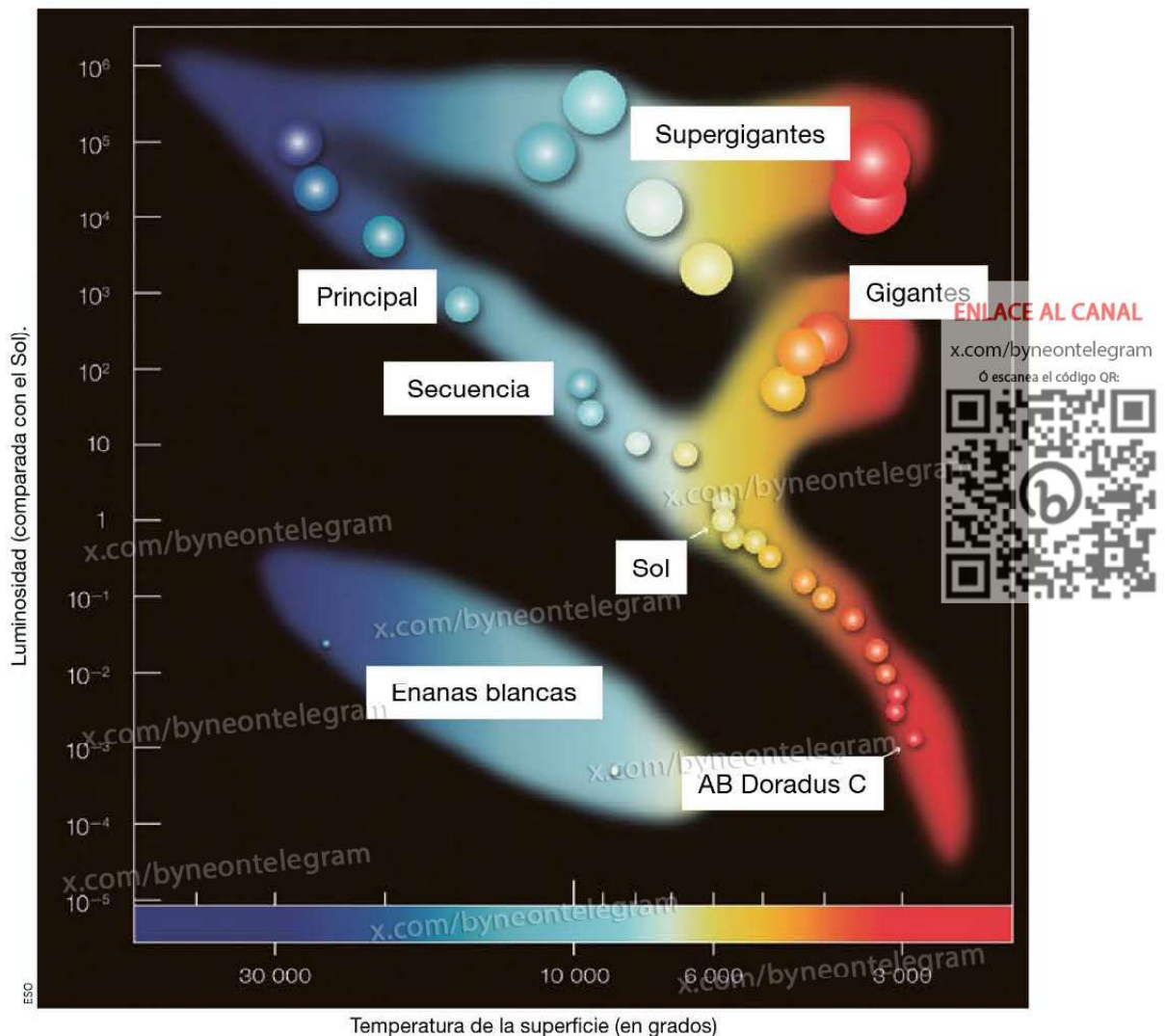
Este simple experimento nos muestra, sabiendo que la luz azul tiene una longitud de onda más corta que la luz roja, una importante relación entre la temperatura de un objeto y el color de la luz que emite: cuanto más caliente está, emite luz de longitud de onda más corta. Esta relación también se aplica a las estrellas, algo que puede resultar sorprendente, porque cualquiera que haya observado el cielo estrellado no es consciente de que las estrellas tengan colores. Esto es así porque el ojo humano interpreta la luz de los cuerpos extremadamente calientes como blanquecina con matices de color. Por lo tanto, las estrellas frías se ven blancas con un matiz rojo, mientras que las estrellas muy calientes se ven blancas con un matiz azul.

Sabido esto, ¿cómo podemos calcular la temperatura de una estrella? Sabiendo en qué la longitud de onda emite más luz. Para ello usaremos una relación numérica que fue formulada por primera vez hacia 1900 por el físico alemán Wilhelm Wien y que se conoce, obviamente, como la ley de Wien. Establece que la longitud de onda (color) a la que un objeto irradia con mayor intensidad es inversamente proporcional a su temperatura. De este modo, la estrella más brillante del cielo, Sirio, en la constelación del Can Mayor, es de color blancoazulado, lo que significa que su temperatura es de 9500 grados; y Betelgeuse, la estrella más brillante de Orión, que tiene un color rojizo, tiene una temperatura de 3000 grados.

Otra magnitud muy importante de una estrella es su luminosidad, la energía que emite cada segundo al espacio. El problema es que, a diferencia de la temperatura, su valor no puede determinarse directamente por la observación. Pode-

**CUALQUIERA QUE HAYA OBSERVADO EL CIELO
ESTRELLADO NO ES CONSCIENTE DE QUE LAS
ESTRELLAS TENGAN COLORES**

DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG-RUSSELL



Como vemos arriba, en el diagrama de Hertzsprung-Russell, las temperaturas de las estrellas se representan gráficamente en función de su luminosidad. La posición de una estrella en el diagrama proporciona información sobre su estado actual y su masa.

mos medir el brillo con el que vemos la estrella en el cielo, pero de él no podemos deducir la energía que emite al espacio. Así, estrellas con la misma luminosidad podemos verlas con diferente brillo desde la Tierra. ¿Por qué? Por la distancia a la que se encuentran. El brillo de cualquier objeto luminoso cae proporcionalmente al cuadrado de la distancia que nos separa de él: una bombilla situada a dos metros brillará cuatro veces menos que si está a un metro. Por tanto, es necesario conocer la distancia a la que se encuentran las estrellas para poder determinar su luminosidad intrínseca y eso, a menudo, no resulta nada sencillo.

Demos por hecho que conocemos la temperatura y la luminosidad de las estrellas. ¿Qué pasará si dibujamos una gráfica donde colocamos en el eje horizontal la temperatura y en el vertical la luminosidad? Inicialmente esperaríamos una nube de puntos repartida de manera más o menos homogénea por toda la tabla. Pues no. La sorpresa que se debieron llevar el astrónomo sueco Ejnar Hertzsprung y el norteamericano Henry N. Russell tuvo que ser mayúscula. Contra todo pronóstico, las estrellas se agrupaban en zonas específicas de la gráfica, que desde entonces se conoce como diagrama Hertzsprung-Russell o diagrama HR.

En esta gráfica la luminosidad de la estrella crece hacia arriba y la temperatura, de derecha a izquierda. Entonces, como las estrellas frías emiten luz rojiza y las calientes luz blanca o azul, a la derecha tendremos las estrellas rojas y a la izquierda las azules. Arriba tenemos las de gran luminosidad y debajo las de brillo más débil.

Ahora bien, una estrella fría emite muy poca energía por centímetro cuadrado de su superficie, pero puede suceder que sea muy grande, tan grande que en conjunto, sumando la emisión de todos los centímetros cuadrados de su superficie, acabe teniendo una luminosidad muy alta. Estas estrellas se situarán en la parte superior derecha: son las gigantes (y supergigantes) rojas.

En el otro extremo tenemos las estrellas muy calientes (emiten mucha energía por segundo) pero de baja luminosidad (son pequeñas), que se sitúan en la esquina inferior izquierda del diagrama: son las enanas blancas.

Estos dos ejemplos nos ilustran sobre cómo el tamaño de una estrella puede inferirse a partir de su luminosidad y de su temperatura superficial: esta nos permite saber cuánta energía emiten por centímetro cuadrado y la energía total emitida nos permite calcular el tamaño de la estrella.

Pero para sacar el mejor partido al diagrama HR veamos qué sucede si colocamos en él las estrellas más cercanas al Sol, aquellas cuya luz no tarda más de 70 años en llegar a nosotros. Estas son importantes porque podemos determinar su distancia con precisión y, por tanto, calcular su luminosidad con muy poco error. Al hacerlo descubrimos que no se reparten uniformemente por el diagrama, sino que se acumulan en una banda que va de la parte superior izquierda, es decir, de las estrellas azules y luminosas, a la parte inferior derecha, la de las estrellas débiles y rojas. Solo unas pocas las encontramos en el dominio de las gigantes rojas y en el de las enanas blancas. La conclusión más evidente es que, en las ve-



A la izquierda, Ejnar Hertzsprung; a la derecha, Henry Norris Russell. Ambos desarrollaron independientemente en los primeros años 1900 el diagrama que lleva sus nombres.

EN ALGUNAS OCASIONES LAS ESTRELLAS MANIFIESTAN UNA ESPECIE DE INSTINTO GREGARIO Y FORMAN GRUPOS

ciudades del Sol, las estrellas más comunes son las que se encuentran dentro de esa banda, que recibe el nombre de secuencia principal, mientras que las gigantes rojas y las enanas blancas son excepciones.

PODEMOS CONOCER LA MASA DE UNA ESTRELLA

Si ampliamos el diagrama a todas las estrellas de las que podemos conocer su temperatura y luminosidad, el patrón que hemos descubierto con las estrellas vecinas del Sol se mantiene. El 90 % de todas las estrellas están situadas en la secuencia principal. ¿Podemos saber algo de su masa? Ciertamente, pues las estrellas de lado superior de la secuencia principal tienen masas elevadas, de cuatro, diez o más masas solares, y las de poca masa se encuentran en la parte baja. Como la luminosidad también aumenta de abajo arriba en el diagrama HR podemos concluir que cuanto más luminosa sea una estrella de la secuencia principal, mayor es su masa. Esto quiere decir que podemos conocer la masa de una estrella a partir de su luminosidad siempre y cuando se encuentre en la secuencia principal: a esta regularidad se la llama relación masa-luminosidad.

Una pista más de la utilidad del diagrama HR es si representamos en él estrellas de la misma edad. ¿Dónde podemos encontrarlas? En los cúmulos de estrellas.

En ocasiones las estrellas manifiestan una especie de instinto gregario y forman grupos. Algunos se conocen desde hace mucho, como el de las Pléyades. A simple vista podemos ver las seis más brillantes pero este cúmulo contiene entre 500 y 1000 estrellas arracimadas en poco más de 30 años-luz de diámetro y situadas a unos 440 años-luz de la Tierra. Es un cúmulo joven, algo que viene atestiguado por la presencia de estrellas azules y calientes que dominan la luz del cúmulo, aunque el 25 % de la población total del cúmulo son enanas marrones, objetos con menos del 8 % de la masa del Sol. Con tan poca masa no es posible que en su interior se encienda el horno nuclear. Son soles fallidos, a medio camino entre las estrellas y los planetas gaseosos como Júpiter.

Pero también tenemos otros grupos de estrellas más viejos, que son los cúmulos globulares. Son como pequeñas pelotas repletas de estrellas: entre 50 000 y 50 millones. En las regiones centrales de estos cúmulos a menudo presentan una densidad de estrellas 10 000 veces superior a la que existe a nuestro alrededor.

Si representamos el diagrama HR de estos cúmulos encontramos cosas curiosas. En el de las Pléyades —un cúmulo joven— prácticamente todas las estrellas se encuentran en la secuencia principal, sin embargo en un cúmulo globular —un cúmulo viejo—, solo aparecen las estrellas del sector inferior de la secuencia principal. Las más masivas se «desvían» hacia la derecha, es decir, que las estrellas más luminosas no se encuentran en la secuencia principal, sino que la han abandonado y se dirigen a la zona de las gigantes rojas situado arriba a la derecha.



Spica (en el centro de la imagen) es la estrella más brillante de la constelación de Virgo.
La gigante naranja Arturo (en la parte de arriba) es la más brillante de Bootes.

Esta es la potencia del diagrama HR: nos permite ver la historia evolutiva de las estrellas. Imaginemos que una nave extraterrestre llega a la Tierra y solo tiene un día para hacerse una idea de cómo es la vida humana. Al observar el planeta ve humanos de distintas edades, sexo, etnias... Como no tiene tiempo para seguir la vida de un ser humano en concreto, puede hacerse una idea de cómo es viendo a diferentes humanos en diferentes estadios de su vida: bebés, niños, adolescentes, adultos, ancianos... El extraterrestre tiene una fotografía instantánea de la demografía humana.

Eso es el diagrama HR: un censo resumido de lo que vemos en el cielo. En los distintos momentos de su vida las estrellas se encuentran en diferentes lugares del diagrama HR, porque cambian su luminosidad y su temperatura. Así, si una estrella es una gigante roja y después de varios millones de años acaba convertida en una enana blanca, su lugar en el diagrama HR se habrá desplazado de arriba a la derecha abajo a la izquierda. Si nuestras vidas fueran muy largas veríamos los puntos moverse por el diagrama, atravesando con rapidez algunas zonas y demorándose en otras.

¿Por qué se acumulan tantas estrellas en la secuencia principal? Volvamos a nuestro extraterrestre. Le bastaría un vistazo rápido para darse cuenta de que hay más personas adultas que niños. ¿Por qué? Porque solo somos niños durante unos 15 años pero en promedio vivimos más de 50 como adultos. ¿Entonces es la secuencia principal un estadio en el que las estrellas permanecen mucho tiempo? Exactamente. Tras nacer, las estrellas alcanzan algún punto de la secuencia prin-

CUANDO LAS ESTRELLAS HAN CONVERTIDO EL HIDRÓGENO DEL NÚCLEO EN HELIO ENTRAN EN EL ÚLTIMO 10% DE SUS VIDAS

cial y comienza su larga permanencia allí. El lugar de entrada, como hemos visto, depende de la masa: una estrella como el Sol lo hace por la parte central, las pequeñas, como la estrella más cercana a nosotros, Próxima Centauri, lo hace por abajo a la derecha, y las grandes, como Spica (la más brillante de la constelación de Virgo), por arriba a la izquierda.



ESA/HUBBLE & NASA

Próxima Centauri se encuentra en la constelación de Centauro, a poco más de cuatro años-luz de la Tierra.

FLASH DEL HELIO

Una vez que ha ocupado su sitio, allí se mantiene con pocas variaciones: la estrella está quemando hidrógeno y disfrutando de una vida tranquila. Suponiendo que el 70 % de la masa estelar es hidrógeno y que el agotamiento del combustible nuclear se hace perceptible cuando se ha quemado el 10 %, el Sol se mantendrá durante 7000 millones de años en la secuencia principal, pero una como Spica, con una masa diez veces la del Sol, solo brillará durante unos cuantos millones de años. La regla es sencilla: cuanto más masiva es la estrella, más rápido quema hidrógeno y menos vive.

Cuando las estrellas han convertido el hidrógeno del núcleo en helio abandonan la secuencia principal y entran en el último 10 % de sus vidas. La combustión del hidrógeno pasa a una capa alrededor del núcleo de helio, que se ha vuelto más pequeño y más denso, mientras que las capas exteriores se hinchan y la estrella se expande de manera espectacular. Esta expansión hace que la temperatura superficial de la estrella disminuya y, por tanto, cambie su color: la estrella se ha convertido en una gigante (o supergigante) roja. Es más fría, más grande y más brillante que antes, colocándose en la parte superior derecha del diagrama HR.

En ese estado la estrella va a estar brillando unos cuantos millones de años, acumulando helio en el centro proveniente de la quema de hidrógeno en la capa que lo rodea; todavía no ha alcanzado la temperatura suficiente para empezar a quemarlo. En estas condiciones la estructura de una estrella es inestable: al tener apagado el horno nuclear, la estrella queda a merced de la gravedad, que tiende a concentrar toda su masa en su centro. Eso hace que el núcleo se contraiga, aumentando su temperatura. Cuando llega a unos cien millones de grados, empieza a convertir helio en carbono. Pero esto sucederá de forma diferente en función de la masa de la estrella. Si tiene una masa entre media y dos veces y media la masa del Sol, la fusión del helio se producirá de forma explosiva y descontrolada: es el llamado *flash* del helio, que dura de unos pocos segundos a, como mucho, unos minutos. Así acaba la fase de gigante roja. Pero si tiene una masa superior a 2,5 masas solares, la fusión del helio se producirá de manera paulatina.

A partir de aquí, el destino de las estrellas está sentenciado. ■

Un universo de anoma lías

NGC 6543, más conocida como la
nebulosa Ojo de Gato, vista desde el
Observatorio de rayos X *Chandra* de la
NASA y del telescopio espacial *Hubble*.

X-RAY: NASA/CXC/SJO; OPTICAL: NASA/STSCI



El universo ha resultado ser perverso. No nos va a dar respuestas sencillas». De esta manera tan irónica se expresaba el desaparecido astrofísico John Huchra, del Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Y hablaba con conocimiento de causa: él fue el codescubridor de la tercera megaestructura más grande del universo conocido, la Gran Muralla CfA2. El universo ha demostrado tener una casi infinita capacidad para asombrar a los astrónomos.

LA SEÑAL DE PERSEO

Nuestra percepción del cosmos ha cambiado radicalmente durante el siglo xx. Hemos descubierto que todo surgió de una gran explosión, que el universo tiene



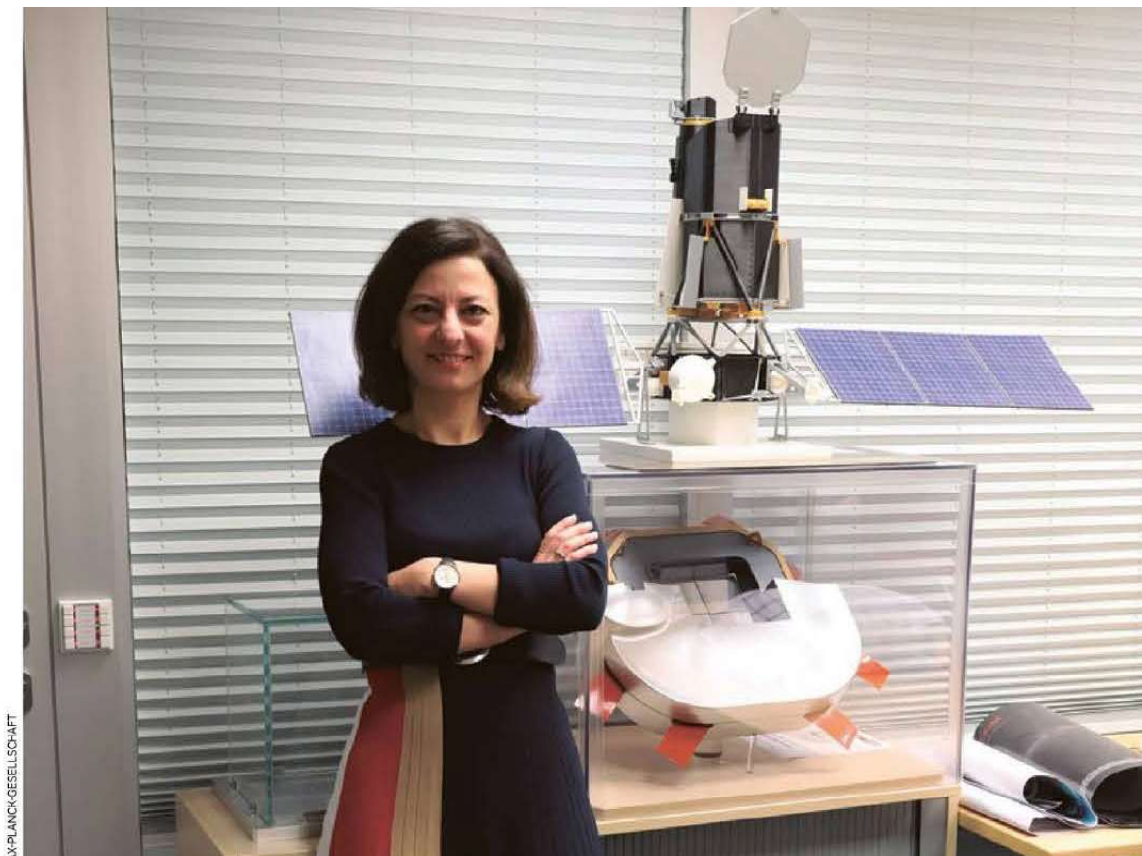
John Huchra, astrónomo y profesor estadounidense del Harvard-Smithsonian, Center for Astrophysics.

forma de esponja, con grandes acumulaciones de galaxias y grandes vacíos. Un universo donde existen galaxias en las que cabrían, holgadamente, cien vías lácteas, donde colosales dinamos cósmicas generan tanta energía como un billón de soles. Un universo del que, en definitiva, sabemos muy poco: desconocemos de qué está hecha el 90 % de la materia que lo compone. Incluso no comprendemos cómo es posible que haya ciertas estructuras como la descubierta por Huchra y llamada la Gran Muralla CfA2: un conglomerado de galaxias de 500 millones de años-luz de larga que, según lo que sabemos, no debería estar ahí.

¿Y qué decir de la llamada «señal de Perseo»? La astrónoma que la descubrió en 2014, Esra Bulbul, también del Harvard-Smithsonian Center for As-

trophysics, lo dejó bien claro: «No podía creer lo que veía», dijo. «A primera vista lo que encontramos no es explicable por la física conocida». Junto con un equipo de más de media docena de colegas, Bulbul usó el telescopio espacial de rayos X *Chandra* para explorar el cúmulo de Perseo, un enjambre de galaxias repartidas a lo largo de 11,6 millones de años-luz y a unos 250 millones de años-luz de Tierra. Pero lo que lo convierte en una rareza es que está inmerso en una enorme «atmósfera» de plasma

**HEMOS DESCUBIERTO QUE TODO SURGIÓ
DE UNA ENORME EXPLOSIÓN Y QUE EL
UNIVERSO TIENE FORMA DE ESPONJA**

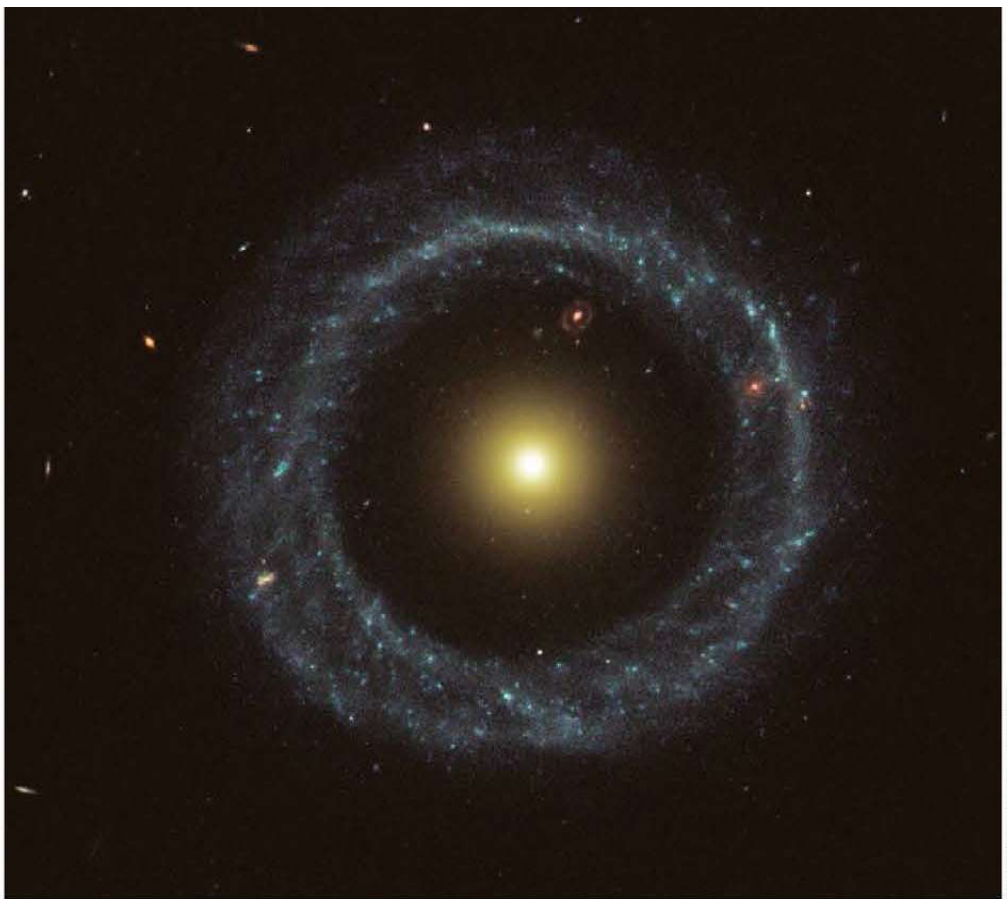


Arriba, la Dra. Esra Bulbul posa frente a una maqueta del telescopio espacial *eROSITA*. Ella fue la señal de Perseo. En enero de 2025 recibió el prestigioso Mid-Career Award.

sobrecalentado que está lleno de iones de hierro, azufre, silicio... que sabemos que están ahí por las líneas características que cada elemento deja en el espectro. Lo que motivó la sorpresa de la astrofísica es que encontró una línea espectral donde no debería haber ninguna: «Apareció una línea a 3,56 keV que no se corresponde con ninguna transición atómica conocida». Al principio, Bulbul no se creyó lo que estaba viendo: «Me llevó mucho tiempo convencerme de que esta línea no era un error del detector ni una línea perteneciente a un átomo conocido».

La existencia de esa línea se confirmó más tarde cuando Bulbul usó el satélite XMM-Newton y encontró esa misma firma espectral en las emisiones de rayos X en otros 73 cúmulos de galaxias. Poco más de una semana después, un equipo de astrónomos de la Universidad de Leiden (Holanda) la descubrió en nuestra vecina galaxia de Andrómeda. ¿Una línea espectral que no proviene de ningún tipo de materia conocida?

El equipo de Bulbul volvió a quedarse con la boca abierta cuando, al realizar nuevas observaciones, en lugar de encontrar un exceso de emisión de rayos X a 3,56 keV, descubrió que «algo» en Perseo estaba absorbiendo rayos X en esta línea. ¿Qué estaba pasando? La conclusión a la que llegó Bulbul es que hay una absorción de rayos X cuando se observa el superagujero negro y una emisión con la misma energía cuando se mira el gas caliente que rodea la galaxia. Curiosamente este comportamiento es bien conocido por los astrónomos, pues aparece cuando se observa una estrella rodeada por una nube de gas: si apuntamos a la estrella veremos una línea de absorción a una energía determinada, y si se observa solo el gas, aparece esa misma línea pero de emisión. Pero ¿quién es el responsable de esa línea? Ningún tipo de materia conocida lo hace. ¿Podría ser creada por la esquiva materia oscura? ¿O estamos ante un proceso todavía desconocido del gas del cúmulo? Solo el tiempo —y nuevas observaciones— lo dirá.



El telescopio espacial *Hubble* de la NASA captura una vista frontal del anillo de estrellas de la inusual galaxia anular conocida como el Objeto de Hoag.

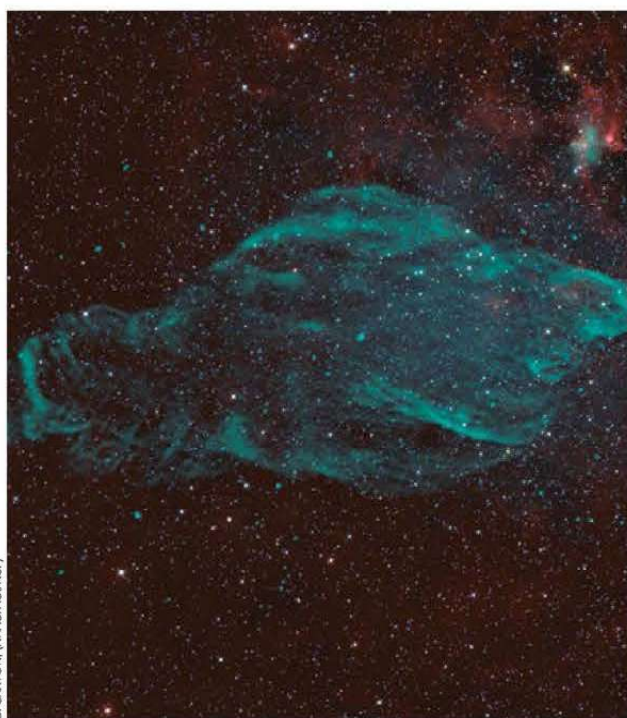
4000 MILLONES DE AÑOS DESPUÉS DEL BIG BANG

Si nos vamos más lejos, a 9600 millones de años-luz, nos encontramos con CLG J02182-05102: es el poco sugerente nombre que los astrónomos han dado a un cúmulo que contiene unas 60 galaxias en la constelación de Cetus, la Ballena. Por comparación, el nuestro, el Grupo Local, es mucho más joven y contiene algo más de 40 galaxias. Lo que convierte a este cúmulo en una anomalía es que parece ser más joven de lo que realmente es: está dominado por galaxias masivas y «adultas», típicas de los cúmulos modernos. Y eso es lo raro, porque estamos viendo CLG J02182-05102 tal como era hace unos 4000 millones de años después del Big Bang, esto es, cuando el universo tenía el 30 % de su edad actual. Esto es lo que desconcierta a los astrónomos: en aquella época sabemos que las galaxias eran muy raras, y ahora aparece este cúmulo que no solo se han formado completamente, sino que las galaxias que lo componen han evolucionado hacia lo que vemos en los cúmulos modernos. Como dijo el investigador principal del equipo que descubrió esta sorprendente anomalía, Casey Papovich, «es como si excavando en la antigua Roma encontráramos piezas pertenecientes a la época actual».

Bajando al reino de las galaxias tenemos una colorista anomalía llamada el Objeto de Hoag, nombrado así en honor a Arthur Allen Hoag, que la descubrió en 1950. Es un anillo casi perfecto de estrellas jóvenes azules rodeando una «bola» central núcleo de estrellas amarillas más viejas, y el hueco existente ambas estructuras es totalmente transparente: no hay nada. Desde entonces sabemos que no es una anomalía única, pues se han descubierto otras similares que reciben el nombre de galaxias anulares. Nadie sabe cómo se formaron, pero se piensa que aparecen por una colisión entre dos galaxias.

ANOMALÍAS EXTRAORDINARIAS

Si ahora descendemos a la escala de las estrellas no creamos que no vamos a encontrar anomalías extraordinarias. A 18 000 años-luz de nosotros se halla un astro cuyo nombre no trasluce lo que realmente es, un verdadero monstruo: SS 433. Está situado en la constelación del Águila y se puede ver a duras penas a través de un telescopio de aficionado. Esta estrella hubiera sido una más de los cientos de miles de millones de estrellas anónimas que pueblan nuestra galaxia si no fuera porque los astrónomos Charles Bruce Stephenson y Nicholas Sanduleak la incluyeron en su catálogo de 1978 con el número 433, registrándola como una es-



B. SAXTON, (INRAO/AUINSF)

La Nube W50, sobre estas líneas, visible solo en ondas de radio, se formó cuando una estrella gigante, explotó hace unos veinte mil años.

trella que varía sutilmente su brillo. Pero no nos equivoquemos: SS 433 es una verdadera anomalía que ha motivado cientos de trabajos especializados y ha convocado decenas de simposios internacionales.

SS433 es el motor que alimenta una zona repleta de gas llamada W50 o Nebulosa Manatí, los restos de una supernova que explotó hace unos 30 000 años. Pero su verdadero secreto se encuentra en su centro, del que se ha dicho que es «el objeto más misterioso del siglo XX». A pesar de que SS433 es uno de los objetos más estudiados, ha conseguido mantener su misterio durante décadas. Los astrofísicos lo catalogan como el primer microcuásar descubierto en nuestra galaxia. Está for-

mado por un objeto compacto (un agujero negro o una estrella de neutrones) y una estrella gigante blancoazulada. La materia que extrae de la estrella compañera forma un disco de acreción alrededor del objeto compacto, similar al remolino que se origina cuando destapamos una bañera llena de agua. Debido a las altas velocidades que alcanza, gran parte de esa materia sale despedida en forma de chorros por los polos a 80 000 km/s, como si de un potente aspersor cósmico se

**SS 433 ES UNA ANOMALÍA QUE HA MOTIVADO
CIENTOS DE TRABAJOS Y HA CONVOCADO
DECENAS DE SIMPOSIOS INTERNACIONALES**

EN AGOSTO DE 1600, EL BRILLO DE P CYGNI SE MULTIPLICÓ POR CINCO Y SE MANTUVO EN ESE PAROXISMO LUMÍNICO DURANTE SEIS AÑOS

tratase. Podríamos pensar que ya teníamos claro lo que sucedía, pero en 2018 se descubrió una fuente pulsante de rayos gamma de alta energía separada de las estrellas centrales: en algún punto de los chorros que salen de su centro las partículas se aceleran hasta alcanzar energías extremas por razones desconocidas. SS433 no deja de sorprendernos.

Pero si queremos encontrar una estrella verdaderamente peculiar solo hay que mirar en dirección a la constelación del Cisne, a una zona donde abundan los bancos de estrellas y los nubarrones oscuros: su nombre es P Cygni, una estrella débil pero visible a simple vista (es una de las más lejanas que podemos ver sin ayuda de un telescopio). Su brillo oscila un 20 %, pero eso sucede cuando está tranquila; a veces su brillo se desboca. En agosto de 1600 su brillo se multiplicó por cinco y se mantuvo en ese paroxismo lumínico durante seis años. Después se fue apagando hasta desaparecer de la vista, para volver a ser visible en 1655. Durante los años siguientes su brillo fluctuó en muchas ocasiones y no fue hasta 1725 cuando volvió a estabilizarse. Hasta hoy.

P Cygni está situada a más de 5000 años-luz de nosotros, la temperatura en su superficie es de unos 100 000 °C, su tamaño es casi 20 veces mayor que el Sol y



Imagen de la luminosa estrella variable azul Eta Carinae. Se trata de un «laboratorio» para estudiar las etapas finales de la evolución estelar de estrellas supermasivas.

emite energía unas 700 000 veces más rápido. No se sabe muy bien qué sucede, pero los astrónomos piensan que estamos observando algo extremadamente difícil de presenciar: un corto estadio en la vida de una estrella muy masiva, que dura solo unos 100 000 años.

Las nebulosas también ocultan sus secretos. Si no, ahí tenemos la nebulosa planetaria del Ojo del Gato, en la constelación del Dragón, que lleva intrigando a los científicos durante casi un siglo. En el centro existe un tipo de estrella muy raro, una Wolf-Rayet, masiva y muy caliente que está agonizando y sufriendo grandes pérdidas de masa debido a intensos vientos estelares. Su intrincada estructura fue fotografiada con bastante precisión por el telescopio espacial *Hubble* y comparando estas fotos con otras más antiguas se ha podido calcular su ritmo de expansión. Esto ha obligado a los teóricos a rehacer sus modelos porque, sorprendentemente, las capas interiores avanzan a mayor velocidad que las más lejanas. Extrapolando hacia atrás, los astrónomos creen que la nebulosa se formó hace 1200 años cuando una estrella de unas cinco veces la masa del Sol perdió sus capas exteriores. Pero lo que le pasó... es otra historia.

JÚPITER COBALTO Y JÚPITER CALIENTE

Otra gran aberración es la que pudo observarse en 1843. Ese año una de las estrellas más masivas que se conocen, Eta Carinae, explotaba. Se encuentra a 7500 años-luz de nosotros, tenía la masa de 100 soles y era cuatro millones de veces más brillante que nuestra querida y diminuta estrella amarilla. En el momento de la explosión arrojó al exterior materia suficiente para formar varios soles a una velocidad de más de tres millones de kilómetros por hora. Pero lo más sorprendente y misterioso es que Eta Carinae quedó como si nada hubiera pasado. Hoy, 160 años más tarde, el telescopio espacial *Hubble* fotografió la nebulosa que quedó tras la explosión, llamada Homunculus, y observó dos inmensas verrugas en la piel de esta supergigante azul. En 1997 se descubrió que los cambios en su espectro seguían un patrón regular, con un periodo de cinco años y medio. ¿Es prueba de que hay «algo» orbitando allí? La única explicación que se les ocurre a los astrónomos es que era un sistema triple en el que se produjo una explosión que dejó detrás de sí gas y polvo y las dos estrellas supervivientes orbitando una frente a la otra.

No creamos que solo hay estrellas raras; también hay planetas raros. El más fascinante es el llamado «planeta Cobalto» por el tono de su luz, que orbita alrededor de un sistema binario compuesto por una enana naranja y una enana roja situado muy cerca de nosotros, a casi 65 años-luz. El tono azulado de HD 189733b podría hacernos pensar en un apacible planeta con océanos. Todo lo contrario: es un «Júpiter caliente», un enorme gigante de gas que orbita muy cerca de la enana naranja (tarda 53 horas en dar una vuelta completa). Jamás existieron océanos en él aunque se ha detectado la presencia de vapor de agua en su atmósfera, al igual que metano y monóxido de carbono. Lo que se desconoce es qué hace el metano allí, pues a esa temperatura debería reaccionar con el agua formando monóxido de carbono. Su atmósfera es de color azul cobalto por la presencia de silicatos de magnesio. Sufre vientos supersónicos de más de 8000 km/h y temperaturas que alcanzan los 1000 grados, lo que provoca lluvias de vidrio fundido. Un mundo infernal para vivir. ■



Ex plosiones cósmicas

Una supernova puede liberar en segundos más energía que la que producirá el Sol durante toda su vida y muchas veces dejan como remanente una estrella de neutrones o un agujero negro.

SHUTTERSTOCK

El 13 de mayo de 2017 un astrónomo aficionado de Utah descubría una supernova en una galaxia espiral situada en la constelación del Cisne, NGC 6946. Lo que tiene de extraordinario no es solo la supernova, uno de los fenómenos más violentos que le puede suceder a una estrella, sino la propia galaxia: es la décima explosión que se registraba allí en menos de un siglo. No es raro que los astrónomos la llamen la galaxia de los Fuegos Artificiales (Fireworks Galaxy). Se trata de una galaxia espiral que se encuentra a 20 millones de años-luz de nosotros, tiene 40 000 años-luz de diámetro (un tercio el de la Vía Láctea) y con una tasa de formación de estrellas muy superior a lo normal, lo que hace que muchos astrónomos lo relacionen con el elevado número de supernovas que se observan, diez veces más que en la nuestra, donde se producen unas tres por siglo. Pero las cosas no están claras.

Todo ello hace de las supernovas uno de los eventos más energéticos del universo. Así, la más brillante conocida se observó en 2015 y lució como 570 000 millones de soles, o lo que es lo mismo, la explosión fue 200 veces más intensa que una supernova media. Conocida como ASASSN-15h, desde la Tierra solo pudo verse con potentes telescopios pues se encontraba a 3800 millones de años-luz. Por el contrario, la más luminosa que haya sido vista desde la superficie de nuestro planeta fue la que apareció en el cielo entre el 30 de abril y el 1 de mayo de 1006. Fue 16 veces más brillante que Venus, tenía un tamaño (aparente) de más o menos media Luna y su brillo era tal que se podían ver objetos colocados en el suelo de noche.

SUPERNOVAS TIPO I, TIPO II...

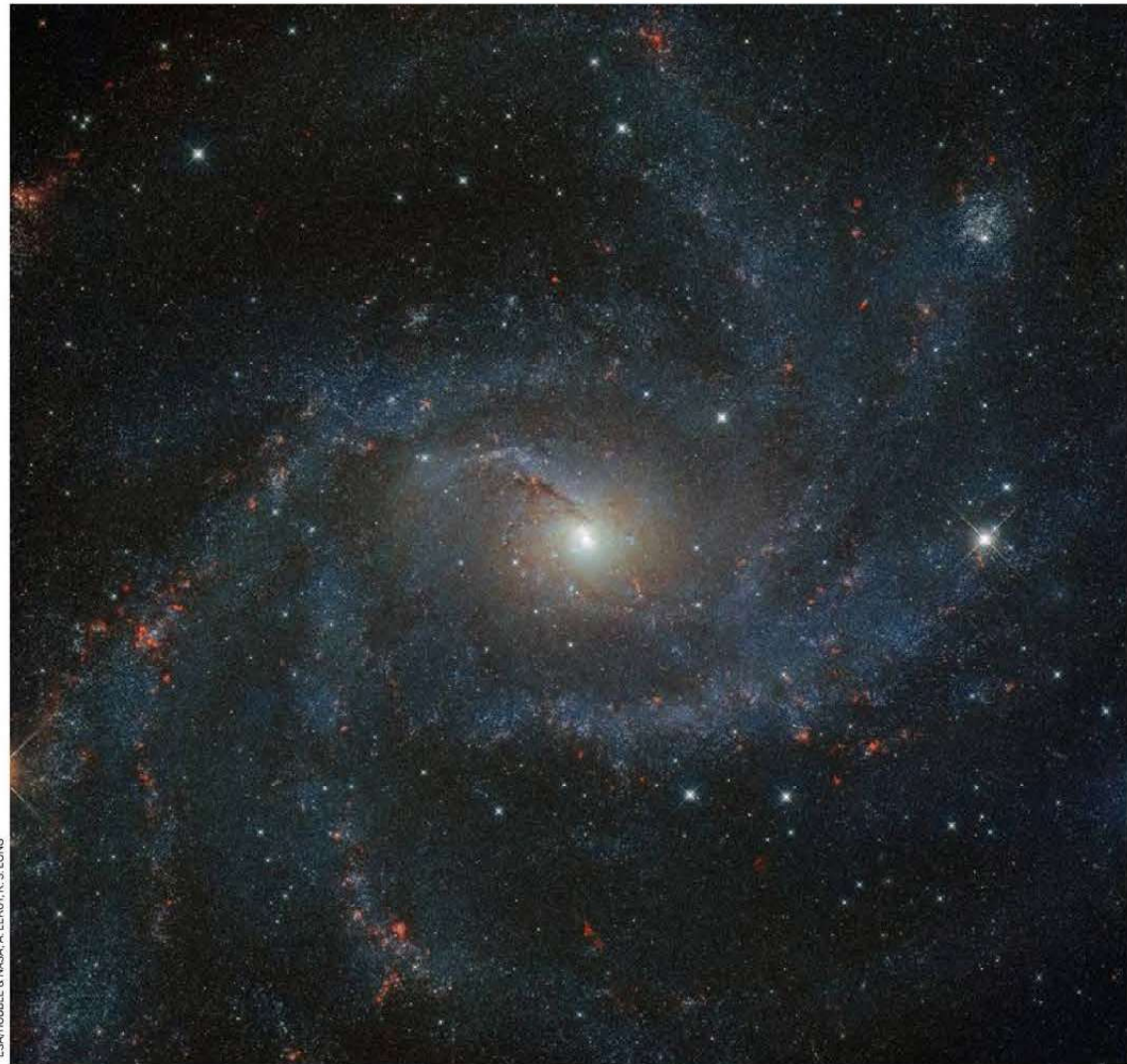
Ahora bien, no todas las explosiones de supernova tienen como origen el desplome gravitatorio de una estrella. De hecho, el estudio de las supernovas ha revelado que existen dos tipos bien diferenciados, que con la característica imaginación de los astrónomos llaman de Tipo I y Tipo II. Las primeras parecen clones: todas se comportan igual, mientras que las segundas pueden ser cada una de su padre y de su madre. Por eso, los astrónomos aplican la regla «si no es de Tipo I, es de Tipo II». Ahora bien, ¿esa diferencia significa que explotan de manera diferente?

Para intentar resolver este tipo de enigmas los astrofísicos utilizan dos metodologías: la curva de luz —cómo la estrella cambia su brillo con el tiempo— y su espectro. Las observaciones revelan que en las de Tipo I no aparece ni rastro de hidrógeno, algo que sí se observa en las de Tipo II. Eso quiere decir que en las Tipo I la envoltura de hidrógeno que todas las estrellas poseen o la han perdido o la han consumido para producir helio y otros elementos pesados. Ahora bien, a medida que hemos ido acumulando observaciones las diferencias se han ido difuminando. Así, se empezaron a encontrar diferencias entre las de Tipo I, que acabaron dividiéndose en Tipo Ia, Ib y Ic. Las de Tipo Ia se observan en toda

**LA SUPERNOVA MÁS BRILLANTE CONOCIDA,
ASASSN-15H, SE OBSERVÓ EN 2015 Y LUCIÓ
COMO 570 000 MILLONES DE SOLES**

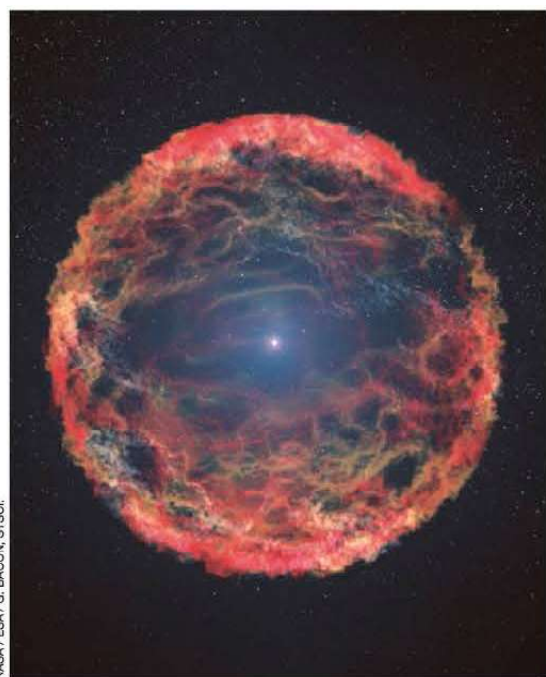
clase de galaxias, ya sean espirales, elípticas o irregulares. Eso sí, parecen evitar aparecer en los brazos de las galaxias espirales. Teniendo en cuenta que son lugares de formación de estrellas, esto es, donde encontramos estrellas jóvenes, no es arriesgado aventurar que el progenitor de las SNIa sea una estrella vieja y de larga vida. Esto nos dice que no es muy masiva, pues si tuviera una masa de, digamos, 20 masas solares, no habría vivido tanto. ¿Cómo de baja es la masa de una SNIa? Eso todavía es motivo de debate.

Por su parte, las SNII presentan en su espectro abundancias de elementos químicos similares a las capas exteriores de nuestro Sol. Además, nunca aparecen en galaxias elípticas y muy rara vez en galaxias irregulares. Más interesante aún es que en las galaxias espirales las observamos solo en los brazos, no en el bulbo central, lo que indica que su progenitor es una estrella muy masiva que, por tener una corta esperanza de vida, no le ha dado tiempo a desplazarse muy lejos de su lugar de nacimiento (recordemos que todas las estrellas, además de moverse alrededor del centro de la galaxia, también tienen un movimiento propio independiente de este).



Solo en el último siglo, se han observado 10 supernovas en NGC 6946, lo que le ha valido el apodo de la galaxia de los Fuegos Artificiales. Esta imagen del Telescopio Espacial Hubble muestra las estrellas, brazos espirales y entornos estelares de NGC 6946 con detalle.

En la década de 1980 se encontró que a las supernovas Tipo Ia había que añadirle un par de primas, que en un alarde de imaginación se las llamó SNIb y SNIc. Al igual que su familiar lejano SNII, parece que solo explotan en los brazos de las galaxias espirales, por lo que podemos suponer que se trata de estrellas masivas. La diferencia fundamental con las SNIa está en su espectro: mientras que en estas encontramos silicio, no hay ni rastro de él en las SNIb y SNIc. Se piensa que ambas tienen su origen en estrellas gigantes con una vida corta y bastante inestable, a lo largo de la cual pierden material por diferentes mecanismos. Al final las hay que pierden casi toda su capa de hidrógeno exterior y explotan como SNIb. Otras llegan incluso a perder también el helio, y se convierten en SNIc. Por contra, el espectro de las SNIa muestra la existencia de hierro en sus etapas más avanzadas; un factor más que evidencia su diferencia con las Ib y Ic.



NASA / ESA / G. BACON, STSCI.

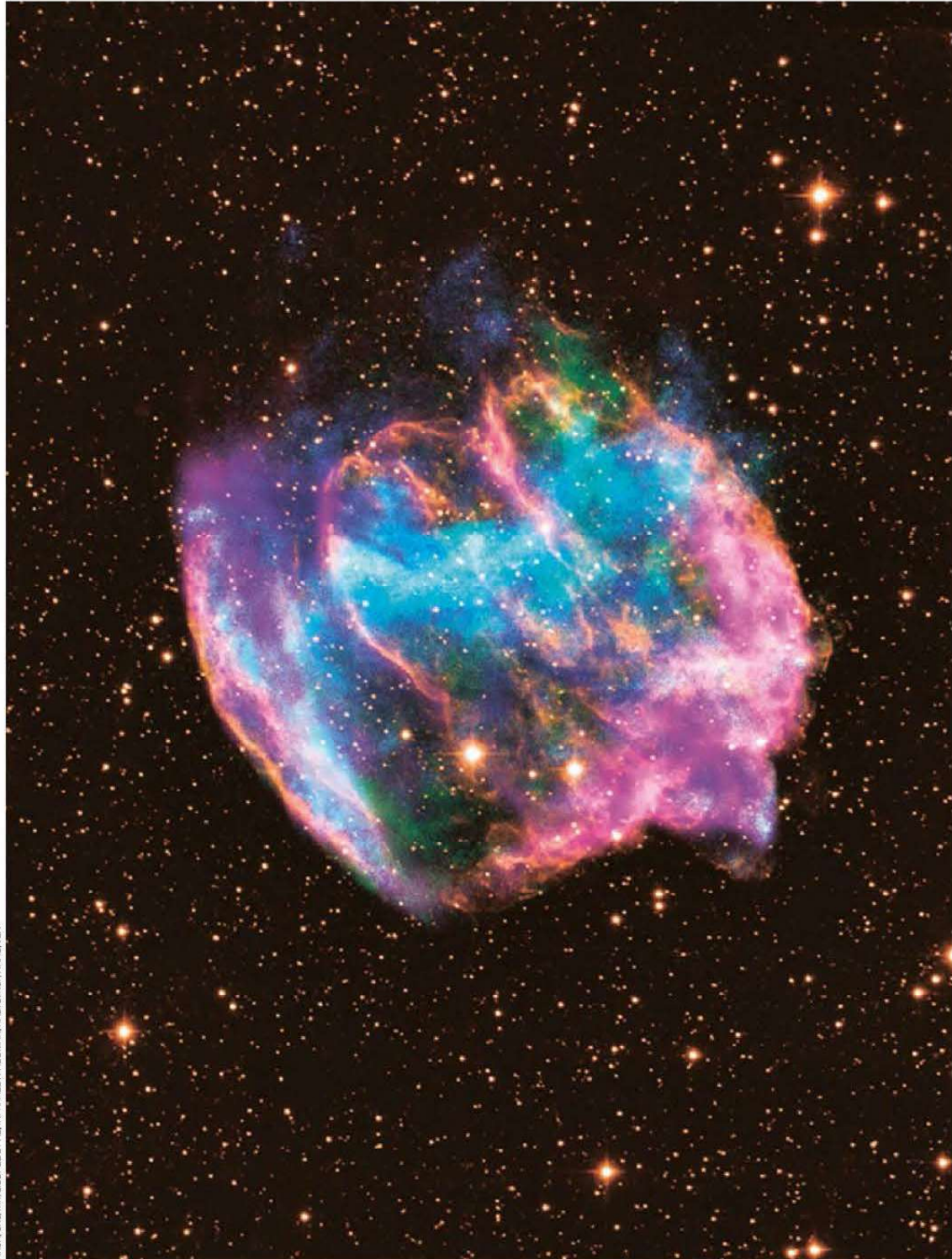
Imagen de iPTF14hls, descubierta el 22 de septiembre de 2014 por la Intermediate Palomar Transient Factory.

ESTALLIDOS DE RAYOS GAMMA

Resumiendo, las supernovas Ib, Ic y II tienen como progenitores estrellas muy masivas que se encuentran cerca de su lugar de nacimiento. Ahora bien, las de tipo II, cuya composición es similar a la que encontramos en el resto de las estrellas, son supernovas que marcan el final en la vida de la estrella. Por contra, las Ib y Ic, donde el hidrógeno brilla por su ausencia, quiere decir que han tenido que perder su envoltura, ya fuera por la existencia de un fuerte viento estelar ya por la acción de una estrella cercana (de modo que la estrella supernova progenitora forma parte de un sistema estelar binario), y esa masa se ha transferido a la otra estrella.

Pero las Tipo Ia son una bestia completamente diferente. Por lo general (pero no siempre) se encuentran en galaxias donde la formación estelar es mínima o se ha detenido por completo. Esto implica que no marca la muerte de una estrella masiva, sino que se trata de un fenómeno nuevo. Al parecer, involucra a una enana blanca que, literalmente, revientan por una explosión termonuclear. Ahora bien, si las enanas blancas son estrellas moribundas, ¿cómo pueden estallar? Porque, en este caso, la enana blanca tiene una compañera: puede ser una gigante roja a la que «roba» materia u otra enana blanca con la que acaba fusionándose. Sea de una forma u otra, la masa de la enana blanca aumenta, haciendo posible una reacción nuclear explosiva de quema de carbono que la enana blanca salta en pedazos. Una explicación perfectamente válida salvo por un detalle que vuelve locos a los astrofísicos: nuestras observaciones nos dicen que no hay suficientes sistemas binarios viables que den cuenta del número de supernovas SNIa.

LA MASA DE LA ENANA BLANCA AUMENTA HACIENDO POSIBLE UNA REACCIÓN NUCLEAR EXPLOSIVA DE QUEMA DE CARBONO



NASA/CXC/INTL LOPEZ ET AL; INFRARED: PALOMAR; RADIO: NSF/NRAO/VLA

W49B, también conocida como SNR G043.3–00.2 o 3C 398, es el remanente de una supernova. Ubicada en la región de Westerhout 49, en la constelación del Aguila.

Claro que estos no son las únicas explosiones que encontramos en el cosmos. De hecho, las hay mucho más terribles: son los Gamma Ray Burst o estallidos de rayos gamma (GRB). En promedio, una vez al día, en algún punto del cielo y durante un espacio de tiempo que va desde la fracción de un segundo a los pocos minutos, el universo nos regala con una terrible explosión en alguna galaxia lejana: «algo» brilla tanto como 200 000 vías lácteas juntas.

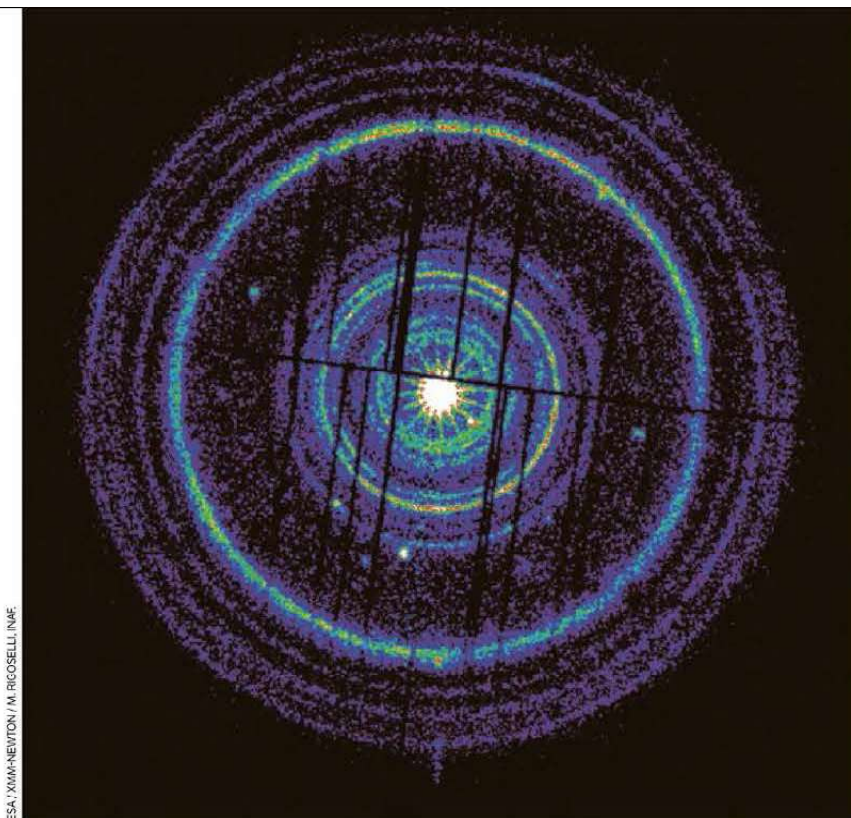
Así, el 8 de octubre de 2022 se detectó el GRB más intenso y brillante jamás registrado. Bautizado con uno de esos nombres tan poco atractivos que usan los astrónomos para catalogar los eventos celestes, GRB 221009A, duró diez minutos y se produjo a 2400 millones de años-luz de la Tierra. Hasta entonces, en los GRB más intensos habíamos detectado medio millón de fotones gamma por segundo. Este pulverizó todas las marcas: seis millones. No es de extrañar que semejante explosión cegara los telescopios de rayos gamma que tenemos colocados en el espacio.

¿Qué provoca estas explosiones? Por un lado se piensa que los GRB, sobre todo los de larga duración (más de dos segundos), se producen mediante un proceso parecido —pero cientos de veces más intenso— a las explosiones de supernova: una hipernova. Nadie sabe cómo y por qué sucede, pero se supone que se produce cuando las estrellas de mayor masa de la galaxia (entre 100 y 150 veces la masa del Sol) colapsan para formar un agujero negro que rota a gran velocidad, en un proceso que dura de 10 a 20 segundos. Durante el colapso se forma un disco de acreción alrededor del agujero negro mientras unos campos magnéticos altísimos desvían parte de este material formando dos chorros que eyectan material a casi la velocidad de la luz. Son esos chorros los que producen la emisión de rayos gamma, que vemos si uno de ellos apunta hacia la Tierra; si no, solo veremos la supernova. Pero también pueden deberse a la colisión y posterior fusión de dos estrellas de neutrones o dos agujeros negros. Esta fusión puede crear un campo magnético billones de veces más intenso que el de la Tierra en cuestión de uno o dos milisegundos, provocando un estallido de rayos gamma con un disco de acreción, y dos chorros de material emitido a velocidades ultrarrelativistas. Y como traca final, se produce un tipo de supernova más débil, una kilonova, que es una fábrica cósmica de elementos pesados como el oro, la plata, el uranio... que no se producen en ningún otro proceso en el universo en grandes cantidades. Así que si en el futuro regala una joya de oro a su pareja, piense que está entregando los restos de uno de los procesos más extraordinarios del universo: la fusión de dos estrellas de neutrones.

RÁFAGAS RÁPIDAS DE RADIO

Pero esto no es todo; el universo siempre tiene guardado un as en la manga. Como en 2007, cuando fuimos conscientes de que había un nuevo fenómeno en el cielo. Estudiando los datos recibidos hacía seis años en el radiotelescopio de *Parkes* (Australia),

SABEMOS DE LA EXISTENCIA DE UNOS 30 MAGNETARES Y SE CREE QUE UNA DE CADA DIEZ SUPERNOVAS DA ORIGEN A UN MAGNETAR



El *XMM-Newton* captó 20 anillos de polvo tras el GRB 221009A; van de 1300 a 61 000 años-luz y el mayor visible tiene el tamaño de una luna llena.

el estudiante de doctorado David Narkevic encontró un peculiar pico de energía, una explosión tremenda que había durado tan solo 5 milisegundos a una distancia de 1500 millones de años-luz. Bautizadas con el nombre de Fast Radio Burst (ráfagas rápidas de radio, FRB), se trata de unas explosiones de energía de origen desconocido localizadas en la zona del espectro de radio, impredecibles, intensas y muy breves, que duran unos escasos milisegundos. Hasta la fecha se han catalogado más de un millar, sobre todo gracias a CHIME, un radiotelescopio de diseño peculiar —cuatro antenas cilíndricas de 100 metros de largo y 20 de ancho— situado al sur de la Columbia Británica (Canadá), casi en la frontera con EEUU. Algunos de estos FRB se han podido localizar en el cielo, como FRB 121102, que es persistente en sus explosiones: lo ha hecho más de 150 veces desde que fue descubierto por el radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico, en 2012. Gracias a ello se sabe que su origen se encuentra dentro de una pequeña galaxia situada a 3000 millones de años-luz de nosotros. Son unas explosiones realmente potentes: en los escasos milisegundos que dura un estallido se libera tanta energía como la que emite el Sol en un año. Ahora bien, la que llega a la Tierra después de recorrer esas distancias cósmicas es realmente ínfima, menos de la que necesita una hormiga para doblar una de sus patas.

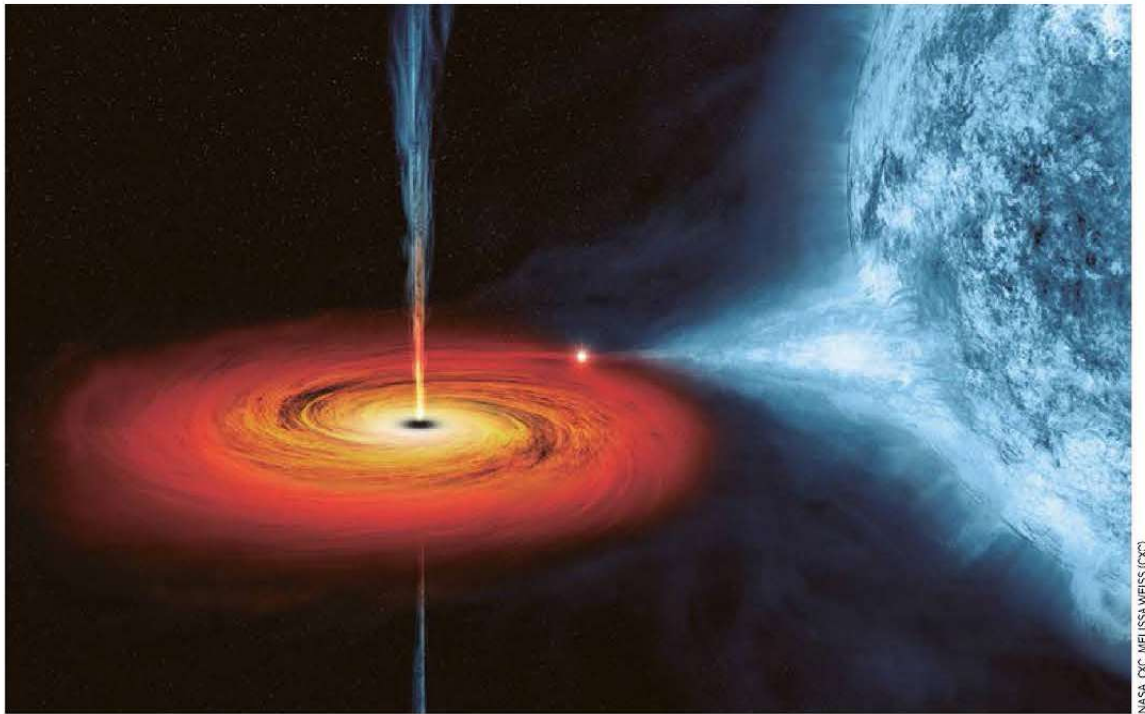
¿Qué produce semejantes estallidos? Nadie lo sabe, pero los astrónomos juegan con la idea de que estamos ante algún tipo de proceso en el que participan los sospechosos habituales, estrellas de neutrones o agujeros negros. Entre ellos destacan los magnetares, estrellas de neutrones que poseen campos magnéticos muy intensos y que rotan sobre sí mismos una o dos veces por segundo. Esto produce desajustes en el campo magnético que acaban liberando gran cantidad de energía, produciendo fogonazos de rayos gamma, rayos X y a veces en otras longitudes de onda, como por ejemplo en radio. Sabemos de la existencia de unos 30 magnetares y se cree que una de cada diez supernovas da origen a un magnetar en lugar de una estrella de neutrones normal. Pero todavía hay mucho que comprender. ■

Agujeros negros, en el límite del espacio-tiempo

Agujero negro supermasivo.
La región negra del centro representa
el horizonte de sucesos, donde la
luz no puede escapar de la atracción
gravitatoria del objeto masivo.

SHUTTERSTOCK





Recreación del al agujero negro Cygnus X-1 que se formó cuando una gran estrella se derrumbó. Este agujero negro atrae materia de la estrella azul que está a su lado.

En 1975 los físicos teóricos Kip Thorne y Steven Hawking hicieron una apuesta sobre un peculiar objeto celeste descubierto en 1964: Cygnus X-1. Se trataba de una potente fuente de rayos X, de las más brillantes del cielo. Todo apuntaba a que se trataba de un sistema binario donde una estrella supergigante está orbitando alrededor de una estrella invisible y tan compacta que no podía tratarse de una estrella convencional. ¿Sería un agujero negro?

Podría ser. Y es aquí donde entra la apuesta entre los dos grandes expertos en la teoría que predice su existencia, la relatividad general de Einstein. Hawking apostó que Cygnus X-1 no era un agujero negro. Si tenía razón, Thorne debía pagarle una suscripción a la revista *Private Eye* (que a pesar del sugerente nombre es una revista satírica inglesa). Por el contrario, si Thorne tenía razón se ganaría un año de suscripción a *Penthouse* (que bien sabemos no es una revista satírica). En 1996 Hawking confesó que, a pesar de los años pasados, la situación no había mejorado mucho para Cygnus X-1, pero sí que se había acumulado «suficiente evidencia a favor de los agujeros negros como para pagar la apuesta». Y lo hizo, «para escándalo de la liberal mujer de Kip».

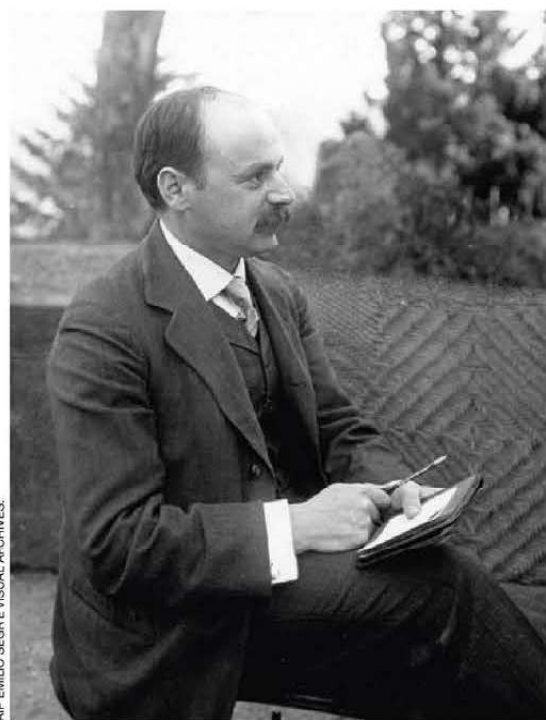
PUNTO DE NO-RETORNO

Demostrar que existe un agujero negro por ahí arriba no es sencillo y exige una serie de medidas cuidadosas realizadas a lo largo de los años. Y mucho no hay que medir, porque como ningún tipo de información puede salir de un agujero negro, solo podemos saber su masa, su velocidad de rotación y su carga eléctrica: con esos tres parámetros tenemos perfectamente definido un agujero negro. En

el caso de Cygnus X la carga es cero, así que todo lo que han tenido que hacer los astrónomos es calcular su masa y rotación con la mayor precisión posible.

Tras décadas de observaciones hoy podemos afirmar que Cygnus X-1 es un sistema binario situado a unos 7300 años-luz de distancia y con una edad de unos cinco millones de años. Lo forman una estrella supergigante azul y un agujero negro, que orbitan uno alrededor del otro en poco más de cinco días y se encuentran separados una distancia un 20 % la que separa la Tierra y el Sol. Los rayos X provienen de un disco de materia que orbita alrededor del agujero negro y que proviene de la que está robando a su compañera. La masa del agujero negro es

21 veces la masa del Sol —es uno de los agujeros negros estelares de mayor masa de la galaxia— y nació de una estrella progenitora que se calcula que tuvo más de 40 masas solares. Lo más llamativo es que, a partir de su movimiento por la Vía Láctea, se ha podido determinar que es demasiado lento para que su nacimiento estuviera causado por una explosión de supernova, el origen habitual de este tipo de objetos: el estallido le habría dado un «empujón» que lo hubiera lanzado a una velocidad mucho mayor. ¿Entonces cómo perdió las 25 masas solares faltantes? La idea más extendida es que la estrella lo hizo debido a un intenso viento estelar y luego colapsó directamente en un agujero negro. Pero esto no está del todo claro. Y es que, pasados más de 60 años desde su descubrimiento, Cygnus X-1 sigue albergando muchos misterios.



Retrato de Karl Schwarzschild. Su trabajo que revolucionó el estudio de los agujeros negros y la relatividad.

Los agujeros negros llevan dando quebraderos de cabeza a los astrofísicos desde que en diciembre de 1915 el astrónomo alemán Karl Schwarzschild dedujo su existencia a partir de las ecuaciones de la relatividad general de Albert Einstein. Y lo hizo cuando a su alrededor volaban balas y explotaban granadas, mientras se encontraba en las trincheras del frente ruso durante la I Guerra Mundial. En un ambiente tan poco propicio para resolver problemas matemáticos, Schwarzschild encontró una solución analítica al problema de una masa puntual situada

**DEMOSTRAR QUE EXISTE UN AGUJERO NEGRO
NO ES SENCILLO Y EXIGE UNAS MEDIDAS
REALIZADAS A LO LARGO DE LOS AÑOS**

en el espacio vacío. Por desgracia no lograría disfrutar de su éxito: en el frente contrajo una enfermedad de la piel, el pénfigo, que acabó llevándole a la tumba el 11 de mayo de 1916.

La solución encontrada por este astrónomo no solo explica correctamente el campo gravitatorio del sistema solar, sino que también muestra lo que sucede si una masa está lo suficientemente concentrada: la curvatura del espacio en regiones próximas alcanza tal magnitud que la deja separada, aislada, del resto del universo, y todo lo que se precipite en su interior estará irremisiblemente perdido. Estamos ante un embudo cósmico, un agujero negro. Esto es así porque, según

la relatividad general, la gravedad no es otra cosa que la curvatura del espacio provocada por la presencia de cuerpos con masa. Cuanto más compacta y masiva sea una estrella, mayor será la distorsión del espacio y, por tanto, la gravedad será más intensa. El físico John Archibald Wheeler ha sintetizado el significado de la teoría einsteniana en una sola frase: «El espacio dice a la materia cómo debe moverse; la materia dice al espacio cómo debe curvarse».

¿Por qué no podemos escapar de allí? Todo tiene que ver con la velocidad que necesita un cuerpo para salir de un campo gravitatorio. Cuanto más nos acercamos al agujero negro, mayor es esa velocidad, hasta que llega el momento en que la velocidad de escape es exactamente la de la luz, y nada puede ir más rápido. El lugar don-



AP/EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES

John Archibald Wheeler en unas conferencias sobre «Más allá del fin del tiempo» en la Universidad de Missouri.

de esto sucede, ese punto de no-retorno, se conoce con el nombre de radio de Schwarzschild u horizonte de sucesos. Una vez superado, no hay vuelta atrás: nuestro futuro es un viaje directo a la singularidad central, el lugar donde se encuentra concentrada toda la masa de lo que antaño fuera una estrella. La luz y todo lo que se halle en esa región del espacio queda atrapado, sin conexión posible con el resto del universo. Nada de lo que pudiera acontecer en su interior será visto, oído o conocido por ningún observador externo.

LO QUE LOS ASTROFÍSICOS SIGUEN SIN SABER ES DE DÓNDE HAN VENIDO, CUÁL ES SU ORIGEN DE LOS AGUJEROS NEGROS

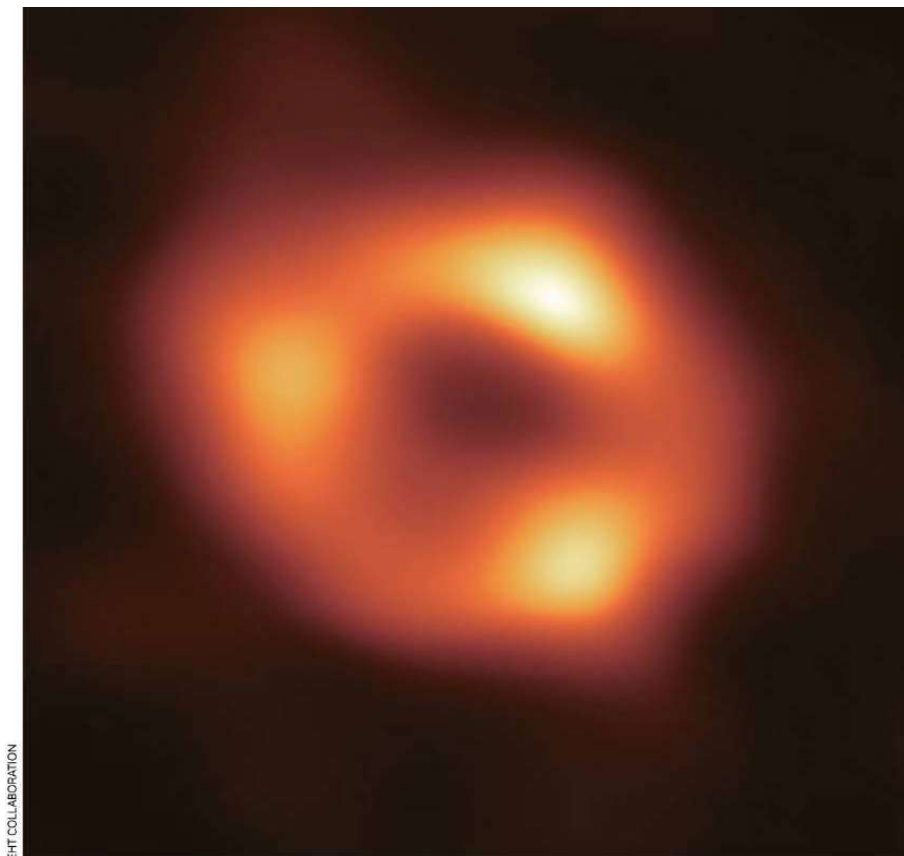


Imagen de Sagitario A* captada por el Event Horizon Telescope (la unión de ocho observatorios de ondas de radio de todo el planeta para formar un solo telescopio).

UNA SITUACIÓN BASTANTE IMPROBABLE ACTUALMENTE

El agujero negro de Cygnus X-1 es del tipo estelar, pues se forma a partir del colapso gravitatorio de estrellas muy masivas. Pero no es el único tipo de agujero negro que existe en el universo. También tenemos los agujeros negros supermasivos, con una masa de millones e incluso miles de millones de veces la del Sol. No son nada pequeños, como los anteriores, sino que pueden llegar a alcanzar un tamaño del orden del sistema solar. Tampoco se encuentran desperdigados por las galaxias, sino que se sitúan justo en su centro: en la nuestra se le llama Sagitario A* y tiene una masa de 4,5 millones de veces la de nuestro Sol.

Lo que los astrofísicos siguen sin saber de dónde han venido, cuál es su origen. Hay diferentes hipótesis, desde que son el resultado de cientos o miles de pequeños agujeros negros que se fusionaron en tiempos remotos, a grandes nubes de gas que colapsan y acretan rápidamente la masa circundante, pasando por un colapso de un cúmulo de estrellas. No obstante, ninguna de ellas resuelve el principal y más serio hándicap de su formación: se necesita que haya una ingente cantidad de materia en un volumen inusitadamente pequeño. En el universo actual esta situación es bastante improbable, pero sí hubo una época en que pudo haber sucedido: cuando el universo era joven. Si así fuera, estos tuvieron que formarse muy pronto, cuando tenía menos de mil millones de años de vida.

Desde ese momento, estos objetos no han hecho más que engordar. Como si de un basurero galáctico se tratara, recogen las masas de gas y polvo que le rodean —un material muy abundante en el centro de las galaxias—, que les permite crecer alcanzar tamaños como Sagitario A*. Este también se alimenta de sus primos menores, pues orbitando a su alrededor hay toda una pléyade de agujeros negros estelares que contribuyen poco a poco a aumentar su masa. Según estimaciones de los astrofísicos, debe ser del orden de 20 000.

¿LOS PRIMEROS ESLABONES EN LA FORMACIÓN DE GALAXIAS?

Dentro del grupo de los superagujeros negros podemos distinguir un subgrupo peculiar: los agujeros negros ultramasivos (UMBH), como el que se encuentra en el centro de nuestra vecina M87, una galaxia elíptica gigante situada a poco más de 53 millones de años-luz. Ese agujero negro se calcula que tiene una masa que alcanza los 6000 millones de masas solares. Pero eso no es nada comparado con el que se encuentra en el centro de TON 618 (abreviatura de Tonantzintla 618), situado a 10 800 millones de años-luz de nosotros. Algunos lo han definido como la gran ballena cósmica, y no les falta razón: es un agujero negro con una masa superior a 50 mil millones de soles y un diámetro tal que puesto en el centro del sistema solar, lo engulliría por entero y aún le sobraría espacio. Comparado con Sagitario A*, el nuestro es como una mota de polvo, pues no llegaría ni a la órbita de Mercurio.

Estos «megaagujeros», que habitan el centro de galaxias muy masivas, devoran gas, polvo y estrellas más rápidamente que sus homólogos en galaxias más pequeñas, como la Vía Láctea. ¿Puede un UMBH crecer sin límites? Aparentemente no. Antes del descubrimiento de TON 618 los teóricos pensaban que la «gordura» de los UMBH tenía un techo de alrededor de 50 000 millones de masas solares. TON 618 la ha pulverizado.

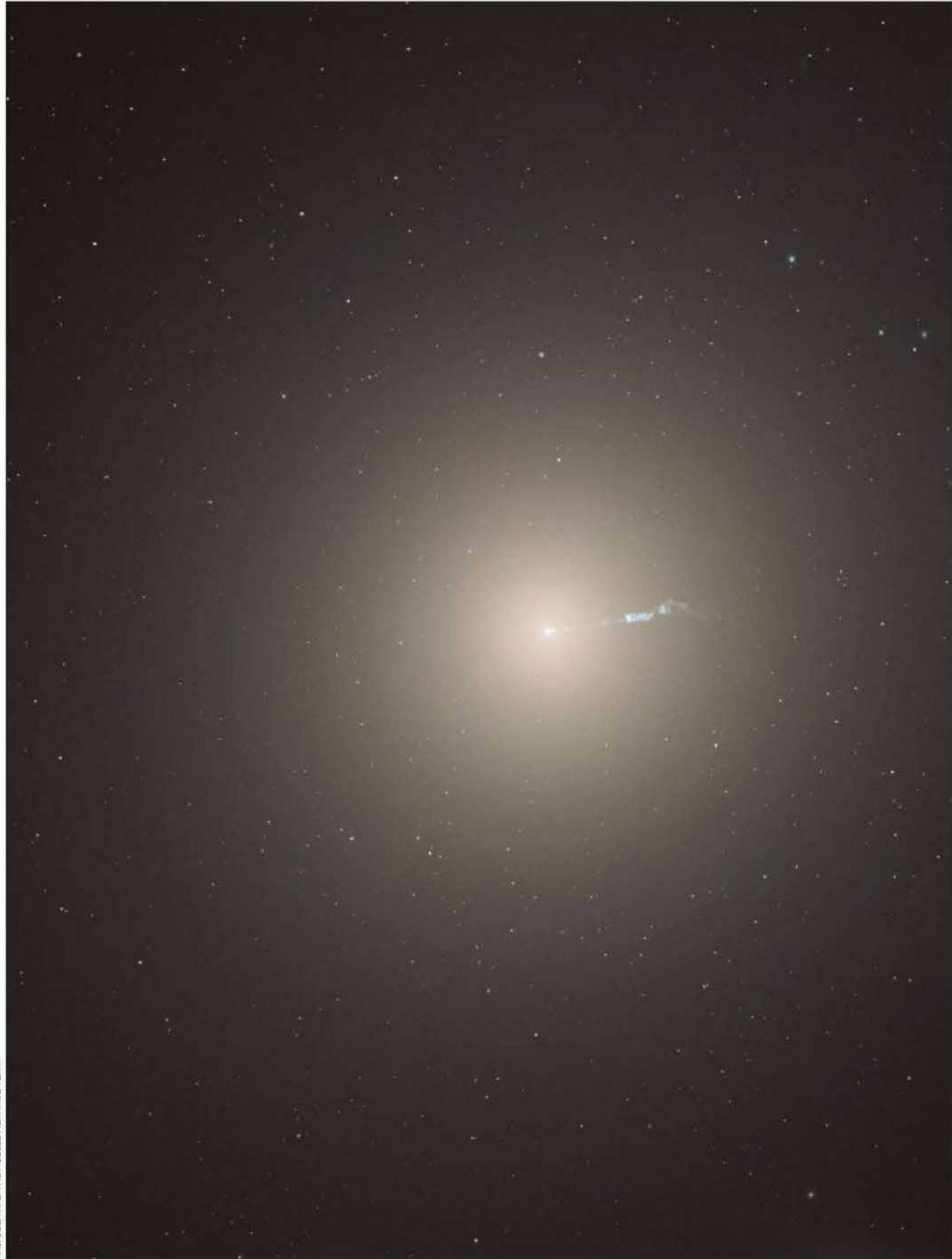
Pero hay algo que no les cuadra a los astrofísicos que estudian la población de agujeros negros del universo. Tenemos los que aparecen como consecuencia de la muerte de una estrella, con masas entre 5 y 80 veces la del Sol. Luego tenemos los superagujeros, de entre 100 000 a miles de millones de masas solares. Y entre ambos grupos... ¿nada?, ¿no hay agujeros negros de masa intermedia (ANMI), de 1000 o 10 000 veces la masa del Sol? Hasta julio de 2024 esta era una ausencia clamorosa, pero entonces el telescopio espacial *Hubble* aportó una prueba casi irrefutable: en el corazón del cúmulo globular Omega Centauri las estrellas parecen bailar al ritmo de una masa invisible: un agujero negro de al menos 8200 masas solares. Desde entonces se han encontrado diversos candidatos a ANMI, como la lista publicada en febrero de 2025 por el grupo de astrónomos del instrumento DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument), con sede en Arizona, que reveló una muestra de más de 300 posibles ANMI en el interior de galaxias enanas activas.

Estos descubrimientos no solo enriquecen el catálogo de objetos cósmicos exóticos, sino que plantean interrogantes acerca del papel de los ANMI en la evolución del universo. ¿Podrían ser los primeros eslabones en la formación jerárquica de galaxias, o incluso estar relacionados con la naturaleza de la misteriosa materia oscura?

AGUJEROS NEGROS PRIMORDIALES

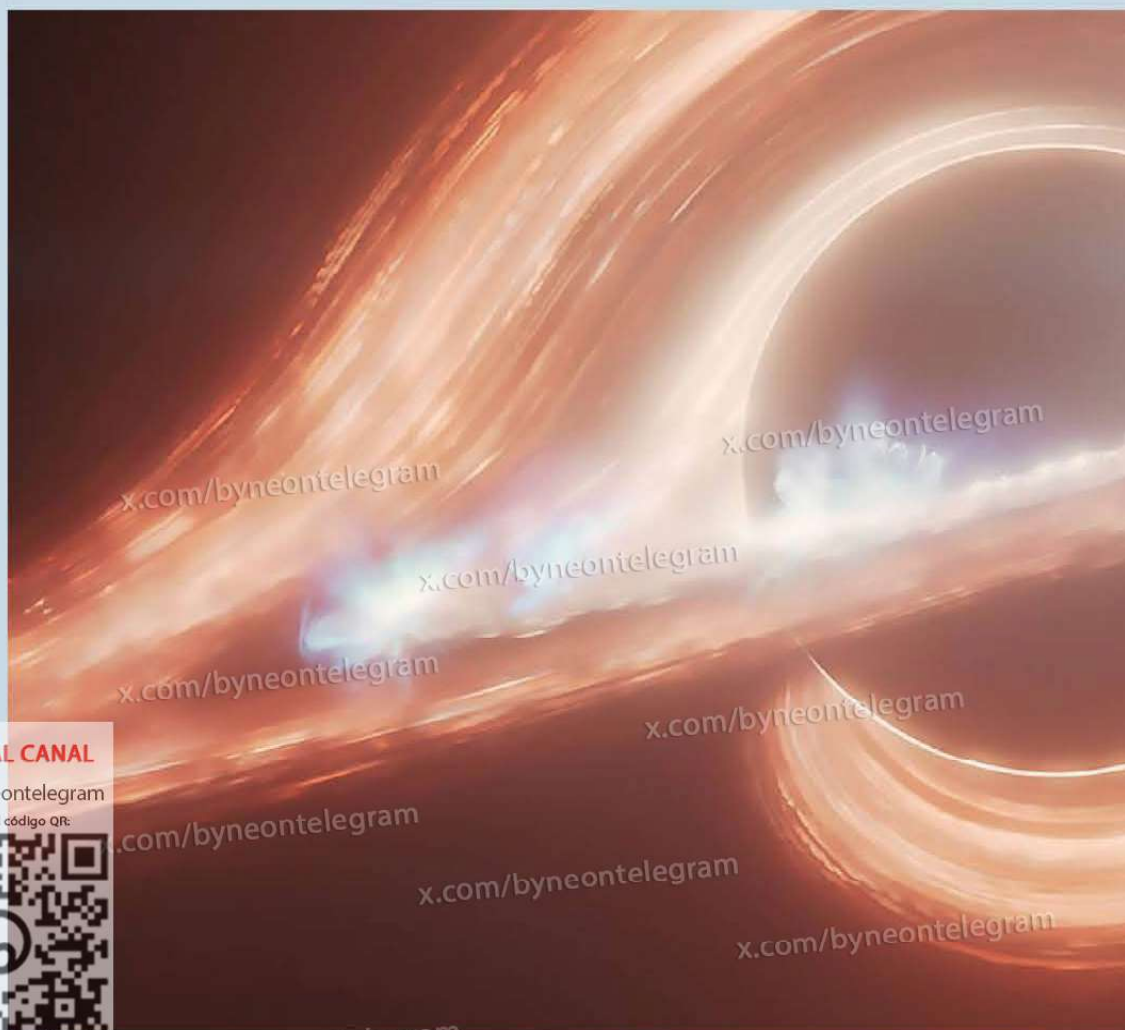
Si una tupida bruma de misterio cubre a esos misteriosos agujeros negros, otra más impenetrable es la de los microagujeros negros. En 1974 Stephen Hawking postuló que podrían existir agujeros negros del tamaño de una cabeza de alfiler y con la masa de una montaña. Evidentemente su existencia no se debe al colapso estelar, y en los años siguientes los teóricos se esforzaron por encontrar algún mecanismo que los generara. El Big Bang les dio ese mecanismo: podrían haberse formado menos de un segundo después del chupinazo cósmico, de ahí

ESTOS «MEGAAGUJEROS» DEVORAN GAS, POLVO Y ESTRELLAS MÁS RÁPIDO QUE SUS HOMÓLOGOS EN GALAXIAS MÁS PEQUEÑAS



NASA, ESA AND THE HUBBLE HERITAGE TEAM

Sobre estas líneas, la galaxia elíptica M87 alberga varios billones de estrellas, un agujero negro supermasivo y una familia de aproximadamente 15 000 cúmulos globulares.



ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

O escanea el código QR



En la imagen, Sagitario A* (estrella A), un agujero negro supermasivo que se encuentra en el centro de la Vía Láctea. Tiene una masa de 4,5 millones de veces la de nuestro Sol.

Sabías que...

- Si caes en un agujero negro estelar, las fuerzas de marea del agujero te estirarán y comprimirán convirtiéndote en un fideo, y al llegar al horizonte de sucesos los efectos cuánticos que allí ocurren harán que te quemes instantáneamente.
- En el interior de los agujeros negros existen unas vías de escape que el físico John Wheeler bautizó con el nombre de «agujeros de gusano». Los agujeros negros son, en realidad, las bocas de entrada a todo un trazado de túneles que unen distintos puntos del universo entre sí. Para un agujero de Schwarzschild estas galerías se llaman puentes Einstein-Rosen.
- Hay una zona alrededor de los agujeros negros en rotación, lejos del horizonte de sucesos, donde es imposible mantenerse quieto respecto al fondo fijo de estrellas porque el agujero negro arrastra consigo el espacio al igual que la Tierra arrastra la atmósfera en su giro. Este gigantesco remolino cósmico recibe el nombre de ergosfera.

CUANTO MENOS MASA LE QUEDA A UN AGUJERO NEGRO, MÁS RÁPIDAMENTE SE EVAPORA, LO QUE CONDUCE A SU FINAL

que también se les llame agujeros negros primordiales. El ingrediente esencial es una fluctuación en la densidad del universo que induzca un colapso gravitacional. El reto es, evidentemente, descubrir cómo detectarlos... si existen, claro.

Aquí es donde entra uno de los resultados más sorprendentes de la física de los agujeros negros: la evaporación Hawking. Planteada por el famoso físico inglés en la década de 1970, dice que, al fin y al cabo, los agujeros negros no son negros, sino grises. Dicho de otro modo, los agujeros negros no solo capturan todo aquello que pasa cerca de ellos, sino que también emiten energía. Para comprender el proceso hay que tener en cuenta un hecho esencial: los agujeros negros tienen



El profesor Stephen Hawking en el exterior del Dpto. de Matemáticas Aplicadas y Física Teórica de la Universidad de Cambridge.

una temperatura extremadamente pequeña y, por tanto, las leyes de la física aseguran que deben emitir energía a costa de la contenida en su interior. Ahora bien, para que esto ocurra, el agujero negro debe estar más caliente que el universo que le rodea (que está a -270 grados centígrados) pues, como todos sabemos, la energía (el calor) fluye del cuerpo caliente al frío. En el caso de los agujeros negros estelares su temperatura es del orden de diez millonésimas de grado por encima del cero absoluto: al estar más fríos que el universo, reciben más energía de la que emiten. Pero con los microagujeros la cosa cambia: deberían estar desapareciendo ahora mismo porque están más calientes que el universo que los rodea.

Y aún más. Según Hawking estamos ante una cuesta abajo: el microagujero va radiando energía al

exterior y esto le hace perder masa; al perder energía, descende su temperatura, lo que hace que pierda energía más rápidamente. Es una huida hacia adelante: cuanto menos masa le queda a un agujero negro, más rápidamente se evapora, lo que conduce a un final apoteósico: una explosión en forma de rayos gamma. Claro que todo esto es teoría: aún no hemos descubierto esas explosiones gamma que demostrarían que esos microagujeros negros no son solamente el producto de una mente genial. ■

El SO nido del cosmos

Las ondas de radio representan uno de los «sonidos» del cosmos que los radioastrónomos captan desde fuentes como púlsares, cuásares y fenómenos de alta energía. Aunque el espacio no transmite sonido audible, las señales electromagnéticas pueden convertirse en audio.

SHUTTERSTOCK





La misión *Huygens-Cassini* operó en el sistema saturniano desde 2004 hasta 2017, ampliando nuestro conocimiento sobre el planeta, sus anillos y lunas.

En el espacio nadie puede oír tus gritos». De este modo tan inquietante se publicitó el clásico del cine de ciencia-ficción y de terror *Alien*. Sus creadores, a sabiendas o inconscientemente, dieron en el clavo: el sonido necesita de un medio material para propagarse y en el frío espacio no hay nada a lo que pueda agarrarse. Por este motivo todas las películas del género —excepto la llamada «proverbial buena película de ciencia-ficción» *2001, una odisea del espacio*— cometen el error de obsequiarnos con tremendas explosiones y potentes rugidos de los motores de hiperpropulsión. Todo sea por el espectáculo.

¿DÓNDE SE ESCUCHARÍAN NUESTROS GRITOS?

Sin embargo, no todo en el universo es un silencio sonoro. La misión *Huygens-Cassini*, que voló a los confines del sistema solar para estudiar Saturno y su satélite Titán, portaba un peculiar instrumento. La sonda *Huygens*, lanzada el 14 de enero de 2005 hacia la superficie de Titán, llevaba a cuestas un par de diminutos aparatos que apenas llamarían la atención a un observador casual: micrófonos. Debido a que tiene una atmósfera densa —compuesta mayormente por nitrógeno y metano— esta luna de Saturno tan grande como el planeta Marte que posee un mar de metano y continentes es un lugar bastante ruidoso. Los micrófonos a bordo de la *Huygens* grabaron el ruido del viento a lo largo de las dos horas y media de descenso. La sonda fue diseñada para flotar en caso de que acabara

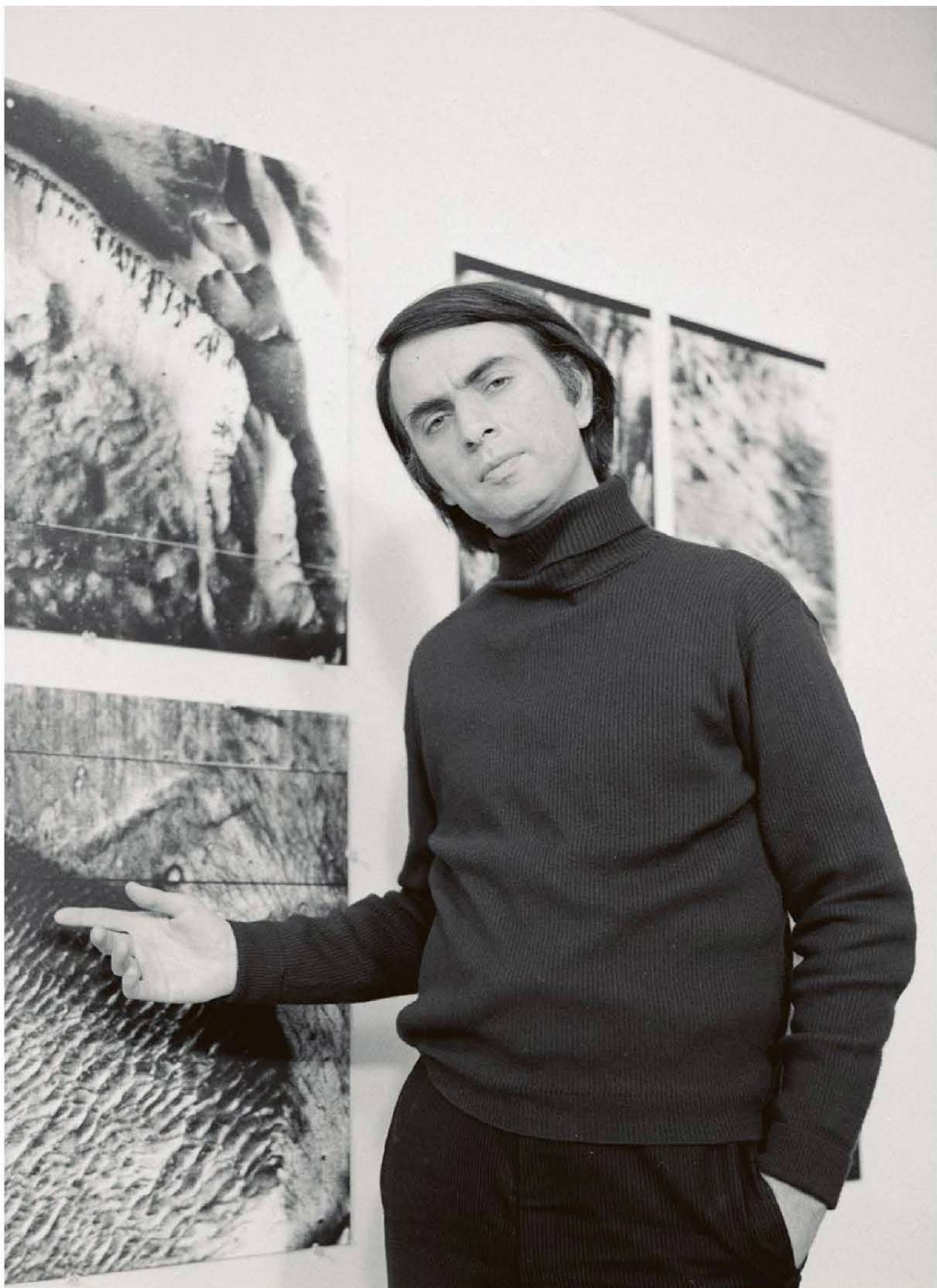
LA SONDA HUYGENS LLEVABA UN PAR DE DIMINUTOS APARATOS QUE NO LLAMARÍAN LA ATENCIÓN DE UN OBSERVADOR: MICRÓFONOS

aterrizando sobre un río o un lago, pero no fue el caso. A pesar de la fortísima deceleración a la que se vio sometida, quince veces la aceleración de la gravedad terrestre, la *Huygens* sobrevivió al impacto con el suelo y transmitió datos e imágenes de la superficie durante más de una hora. El paisaje anaranjado que pudo verse estaba sembrado de rocas con una forma similar a la de los guijarros de los ríos, hechas posiblemente de agua sólida. Y, cubriéndolo todo, una neblina de etano o metano. ¿Por qué se envió un micrófono a la superficie de Titán? Para escuchar el sonido del trueno. No hubo suerte.

En realidad esta no era la primera vez que enviábamos un micrófono a otro planeta. La primera fue en 1982, cuando llegaron a Venus las sondas rusas *Venera 13* y *14*. El objetivo era grabar el ruido del viento y medir su velocidad. Era complicado que sobrevivieran porque en Venus la atmósfera es muy densa y la temperatura superficial es tal que funde el plomo, pero a pesar de tales dificultades se pudieron grabar, por primera vez en la historia, sonidos en otro planeta. ¿Y Marte? Tuvimos que esperar hasta 1999 para que se instalara uno en una sonda dirigida al planeta rojo, la *Mars Polar Lander*. Este fue el último sueño del conocido divulgador y astrofísico Carl Sagan. Pero la sonda se perdió en el



Representación de la sonda *Mars Polar Lander* en la superficie marciana. La misión, lanzada en 1999, se perdió durante el aterrizaje debido a un fallo técnico.



NASA/JPL-CATTECH

Carl Sagan ayudó a diseñar y gestionar la misión *Mariner 2* a Venus, los viajes de la *Mariner 9* y las *Viking 1* y *2* a Marte, las misiones *Voyager 1* y *2* al sistema solar exterior...

LA VELOCIDAD DEL SONIDO DEPENDE DE LA COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA Y DE LA TEMPERATURA A LA QUE SE ENCUENTRA

aterrizaje. Ya no se enviaron más micrófonos hasta la *Perseverance*, que lleva dos. Uno de ellos se encuentra en la parte superior de la *rover* y forma parte del instrumento SuperCam, que está diseñado para determinar la composición de las rocas disparándoles un láser: el micrófono graba el sonido creado al impactar en la roca y así se puede conocer la dureza, masa y tipo de la roca.

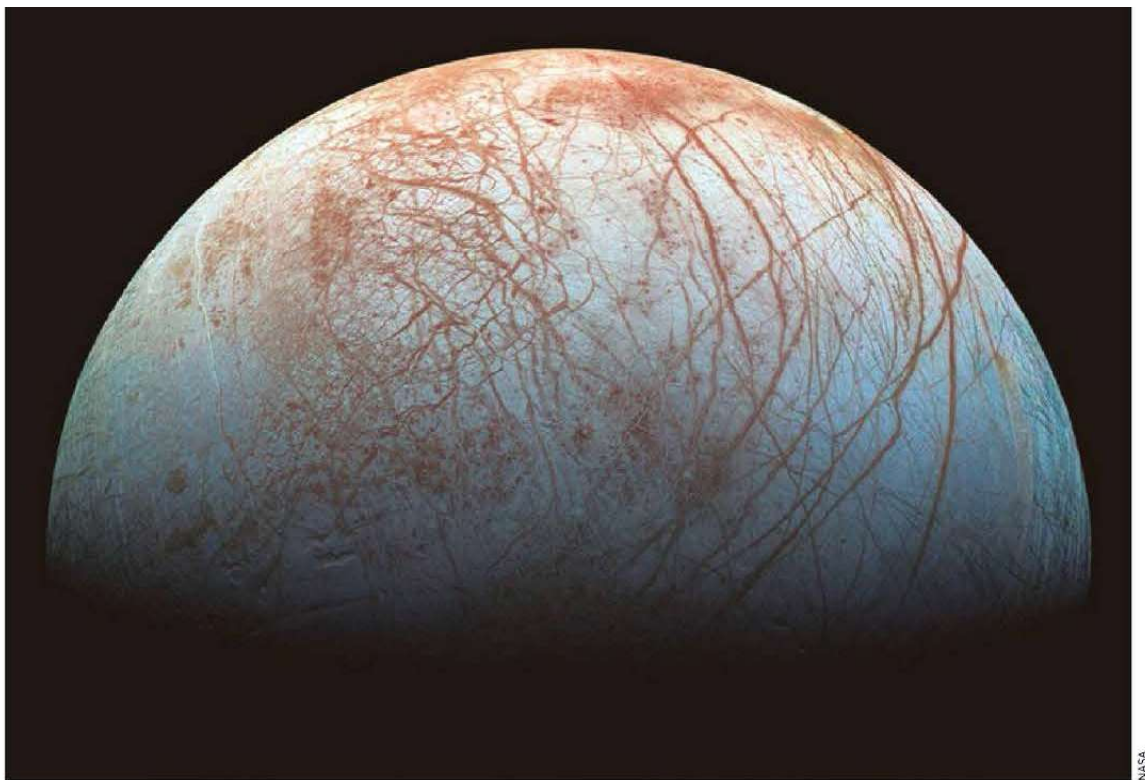
Evidentemente, únicamente en aquellos planetas con atmósfera es donde podríamos gritar teniendo la seguridad de que alguien escucharía nuestra llamada, aunque no sería igual que en la Tierra. Primero porque tenemos la diferente velocidad del sonido que existe en cada planeta; una velocidad que depende tanto de la composición de la atmósfera como de la temperatura a la que se encuentra.



Hemisferio norte de Venus. Imagen creada con datos de la sonda espacial *Magallanes* de la NASA.

Todos sabemos que en nuestro planeta, en condiciones normales, el sonido se propaga a unos 340 metros por segundo. Esto quiere decir que un rayo que golpea el suelo a diez kilómetros de nosotros lo escuchamos 29 segundos después. En la superficie marciana tardaríamos 44 segundos en oírlo, pues allí el sonido se propaga un 30 % más despacio. En Venus, cuya atmósfera es mucho más densa, el sonido del trueno lo escucharíamos 24 segundos después de ver el rayo. Claro que rapidez, lo que se dice rapidez, la tenemos en Júpiter y Saturno. Allí el trueno lo escucharíamos doce y trece segundos después respectivamente. En Titán la sonda Huygens tendría que haber esperado 51 segundos para registrar el estampido del trueno.

Si quisiéramos hablar en Marte, siempre y cuando pudiésemos respirar en su liviana y letal atmósfera compuesta esencialmente por dióxido de carbono, lo tendríamos bastante complicado. Aun el grito más potente que pudiera salir de nuestros pulmones quedaría reducido a un susurro debido a la baja densidad de su atmósfera. De hecho, nuestra voz sonaría como si sufriéramos de laringitis. Eso sí, los sonidos no nos parecerían tan diferentes como en la Tierra y podríamos reconocer un gran número de ellos. La situación en Venus sería totalmente distinta. Con una presión atmosférica



La vida necesita una fuente de energía, la presencia de compuestos químicos y temperaturas que permitan la existencia de agua líquida. En la imagen, Europa, la luna helada de Júpiter.

90 veces superior a la de la Tierra —similar a la que encontramos un kilómetro por debajo de la superficie del mar—, el escaso sonido que hay en una biblioteca se escucharía como si dos personas conversaran en la calle, lo cual a su vez sonaría como el ruido de fondo que hay en una empresa normal.

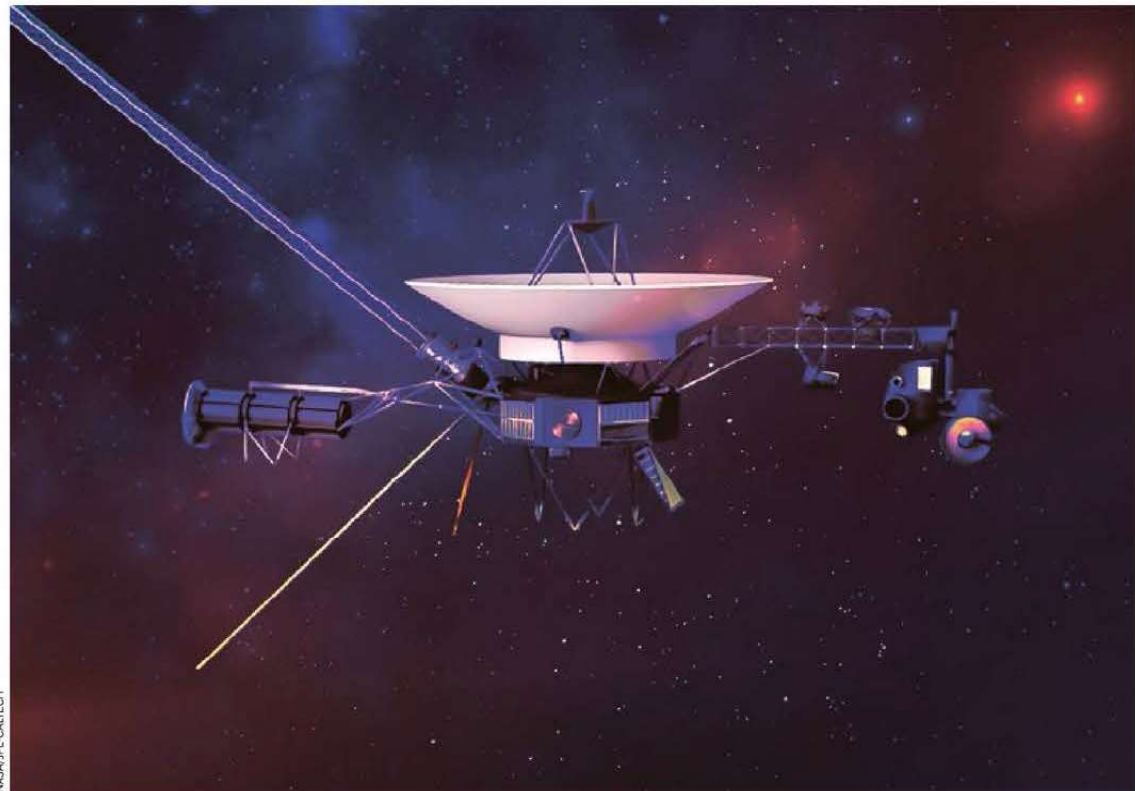
EL RUIDO ES COMO UN TERMÓMETRO

Por cierto, la próxima vez que enciendas tu equipo estéreo muerde la mesa donde lo has dejado. Si te tapas los oídos escucharás la música a través de los huesos. Algo parecido es lo que se ha propuesto para estudiar la superficie helada del satélite de Júpiter, Europa, que se supone tiene un espesor entre 10 a 100 kilómetros de hielo y bajo la cual se extiende un inmenso mar de agua salada. En realidad esta idea es una variante de las técnicas acústicas que se emplean para estudiar el hielo que cubre parte del océano Ártico. El asunto es simple: introducir micrófonos sensibles a las vibraciones en el hielo para «escuchar» cambios ambientales en los niveles de ruido —recordemos que todo, hasta pasar las hojas de este MUY EDC, genera ruido—. El ruido es como un termómetro que mide los esfuerzos, compresiones o fracturas que le suceden al hielo, y esto es justo lo que perseguiría una posible misión a Europa: escuchar los «tirones» a los que está sometido el hielo que, en teoría, se encontrarían entre los 0,1 y 100 hercios.

SE QUIERE INTRODUCIR MICRÓFONOS SENSIBLES A LAS VIBRACIONES EN EL HIELO DE EUROPA PARA «ESCUCHAR» CAMBIOS AMBIENTALES

Algo parecido sucede en la Tierra y, tal vez, en Venus y Marte. Tras analizar 10 años de datos sísmicos, el grupo liderado por Kiwamu Nishida, un geofísico de la Universidad de Tokio, ha encontrado que unos sonidos inaudibles que recorren la baja atmósfera provocan unas débiles ondas sísmicas dentro de la Tierra «que la hacen cantar como un canario». Si pudiéramos escucharlas, este murmullo constante sería capaz de acallar el ruido proveniente de cien de esos *talk-shows* televisivos tan de moda. Pero ¿de dónde vienen esas ondas sonoras? No se sabe con seguridad. Quizá tengan su origen en variaciones de la presión atmosférica.

¿Y si nos vamos más allá de nuestro barrio cósmico? La primera nave espacial que va camino del espacio interestelar, la *Voyager 1*, también ha captado unos sonidos peculiares. La sonda, que tiene aproximadamente el tamaño de un SUV, lleva instrumentos que estudian los campos magnéticos, los rayos cósmicos y el viento solar. En 2012, los científicos que monitoreaban la *Voyager 1* notaron que, de repente, se dejó de detectar el viento solar y al mismo tiempo apareció un pico en los rayos cósmicos que irrumpen desde fuera del sistema solar. Fue entonces cuando los científicos de la NASA detectaron una extraña vibración: «Hubo dos momentos en que se escucharon estas vibraciones: de octubre a noviembre de 2012 y de abril a mayo de 2013». Era el sonido producido por la vibración del plasma de la parte más externa de la heliosfera, la gran burbuja de partículas cargadas que rodean al sistema solar alrededor del Sol. «Se trata de un evento histórico. Es la primera vez que hacemos una grabación de sonidos en el espacio interestelar», dijo Don Gurnett, investigador principal de la investigación de ondas de plasma de la *Voyager*. Pero este no es el único sonido del universo.



Las *Voyager 1* y 2, lanzadas en 1977, son las únicas que han cruzado la heliosfera solar y operan actualmente en el espacio interestelar. En la imagen, *Voyager 1*.



Observatorio de Tartu, Estonia, donde trabaja el astrofísico Jaan Einasto. En 2002, realizó un descubrimiento al observar que las galaxias se organizan en una estructura celular.

Platón tenía razón, al menos en parte. Este hombre, cuyo nombre significa «de anchos hombros», afirmaba que las esferas sobre las que creía que se movían los planetas emitían una música continua. Pues bien, ahora los cosmólogos parecen haber descubierto que el universo es como un inmenso órgano. Todo surge al intentar explicar la estructura a gran escala del universo. Las galaxias se distribuyen como lo hace la materia de una esponja, dejando entre sí inmensos vacíos de materia. ¿Por qué lo hace de este modo tan peculiar? En 2002 el astrofísico Jaan Einasto, del Observatorio Tartu en Toravere (Estonia), realizaba un hallazgo sorprendente: aparentemente, galaxias y vacíos se repiten cada 390 millones de años-luz mostrando una estructura celular, como indican numerosas simulaciones por ordenador realizadas desde entonces. Una posible interpretación de estos datos es que, como sugiere el cosmólogo Paolo de Bernardis, «el universo primitivo está lleno de ondas sonoras que comprimen y rarifican la materia y la luz del mismo modo que lo hacen con el aire dentro de una flauta o una trompeta». Si esta suposición es cierta, estos microscópicos murmullos, provenientes de cuando el universo tenía 300 000 años de edad, pudieron hacer que la materia condensara formando las semillas de lo que millones de años después serían las galaxias.

Si podemos comparar al universo con un tubo de órgano, las estrellas se parecen más a campanas. Puede parecer mentira, pero por la superficie de las estrellas viajan ondas sonoras con las que los astrónomos son capaces de intuir lo que sucede en su interior. Esta peculiar rama de la astrofísica moderna se conoce con el nombre de astrosismología.

EL SONIDO PODRÍA SER EL MOTOR DE LAS EXPLOSIONES

Evidentemente, la primera estrella donde se descubrieron estas debilísimas oscilaciones fue en nuestro Sol. En la década de 1960 los telescopios solares revelaron que ondas acústicas parecidas a las de nuestros terremotos recorrían su superficie,

LOS TELESCOPIOS SOLARES REVELARON QUE ONDAS ACÚSTICAS PARECIDAS A LAS DE LOS TERREMOTOS RECORRÍAN SU SUPERFICIE

solo que con un origen totalmente diferente, que está relacionado con la manera en que la estrella transporta al exterior la energía producida en el núcleo. En estrellas como el Sol la energía producida en el horno nuclear central se transmite a la superficie por convección; el mismo mecanismo que aparece cuando ponemos a hervir agua en un puchero, que borbotea porque la materia caliente asciende y baja la fría. En el Sol, el gas se encuentra virtualmente hirviendo y las burbujas de gas caliente ascienden a la superficie a una velocidad cercana a la del sonido. De la misma manera que podemos escuchar el bullir del agua en un puchero, el Sol hace lo mismo. Por desgracia, no somos capaces de oír este borboteo porque el sonido no se propaga por el espacio. Y aunque pudiéramos no escucharíamos nada, pues se encuentra por debajo del umbral del oído humano. Lo que sí podemos hacer es ver cómo vibra esta campana cósmica, un batir que proporciona información vital sobre las condiciones físicas del interior solar. Eso sí, para imaginarnos el tañido de esta inmensa campana de gas olvidémonos del golpe del badajo. Una imagen mucho más acertada es la de miles de granos de arena golpeando contra ella.

El Sol es una estrella normal luego el resto también debe presentar estas oscilaciones. El problema para observarlas es que son muy débiles y, por tanto, se necesita alcanzar una enorme precisión en las medidas. Fue en 2001, gracias al esfuerzo de los astrónomos suizos François Bouchy y Fabien Carrier del Observatorio de Ginebra, cuando se observó por primera vez el tañer de otra estrella. Fue Alfa Centauri A, uno de los miembros del sistema triple de estrellas más cercano al Sol, a solo 4 años-luz de nosotros y visible a simple vista desde el hemisferio sur. Sus medidas han demostrado que esta estrella, muy parecida a la nuestra, pulsa siguiendo un ciclo de siete minutos. El paso del tiempo no solo lo marca el reloj de la iglesia del pueblo.

Por otro lado, algunos astrofísicos apuntan a que el sonido podría ser el motor de las explosiones de supernova. Desde hace unos años existe el intenso debate de cuál es el motor que hace que la estrella explote expulsando todas sus capas exteriores al espacio. A través de potentes simulaciones de ordenador de los últimos segundos de la vida de estrellas muy masivas se ha descubierto que el sonido podría ser ese mecanismo que rige este último estertor. Sus cálculos indican que estas estrellas moribundas pulsan a frecuencias sonoras audibles (alrededor de la nota de fa por encima del do central) durante una fracción de segundo antes de reventar. Las simulaciones muestran que el núcleo más interno empieza a vibrar vigorosamente, y tras unos 700 milisegundos esta oscilación se hace tan intensa que empieza a generar ondas sonoras de frecuencias entre 200 y 400 Hz (el do central corresponde a 261,63 Hz). Estas ondas refuerzan la onda de choque creada por el colapso de la estrella que acaba por hacerla explotar.

En definitiva, en el espacio no se podrán escuchar nuestros gritos, pero el sonido influye en muchos procesos que ocurren en nuestro universo. ■



La Vía láctea, nuestra ciudad cósmica

La Vía Láctea contiene más estrellas
que seres humanos hay sobre la Tierra
y obtiene su fuerza gravitacional de
cada estrella, cada nebulosa, cada
planeta, cada persona...

SHUTTERSTOCK

[illegible]

UN PLATILLO VOLANTE DE LAS PELÍCULAS DE SERIE B

Mucho ha cambiado con el tiempo nuestra percepción de esa banda lechosa que cruza el cielo de verano. Como escribiera el astrónomo persa del siglo XIII Nasir al-Din al-Tusi, «la Vía Láctea está hecha de un gran número de pequeños y abigarrados grupos de estrellas que, debido a su concentración y pequeñez, parecen como difusos trozos de tela. Es por eso que se ha comparado su color con la leche». Durante siglos la Vía Láctea ha sido un hermoso elemento fijo del firmamento, una cinta cremosa de luz con manchas de negro profundo que cruzaba la bóveda celeste. Para nuestros tatarabuelos esa «pluma de luz estelar» —como la definió el astrónomo de Harvard Charles Whitney—, era todo el universo: un sistema finito de estrellas rodeado, quizá, por un vacío sin límites. Hoy sabemos que esa banda lechosa es la parte del disco galáctico que pueden ver nuestros ojos. Y si la observamos con unos simples prismáticos nos daremos cuenta de que esa neblina está formada por estrellas que se extienden por la inmensidad del espacio. Estamos inmersos en la Vía Láctea, nuestro hogar cósmico.

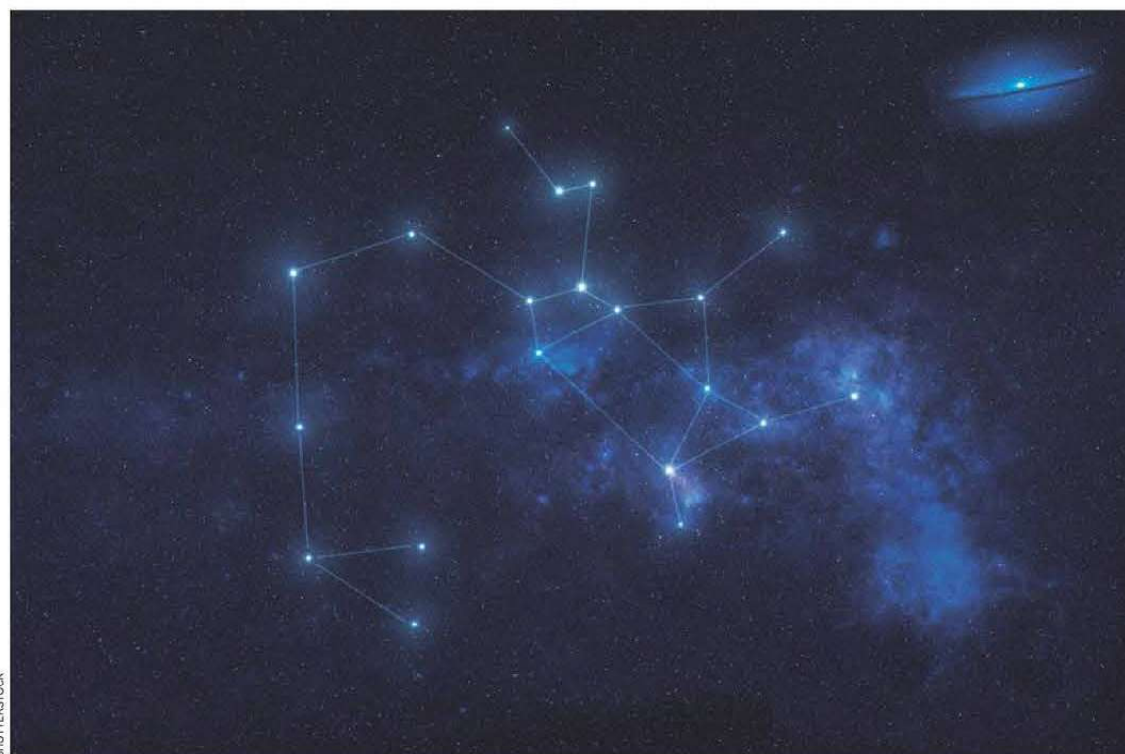
Mirando la constelación de Sagitario, en el horizonte sur, estaremos echando un vistazo al centro galáctico. Pero no nos hagamos muchas ilusiones, lo que podemos observar alcanza solo unos 5000 años-luz antes de que las nubes de polvo interpuestas nos impidan ver más allá. Esto nos lleva solo a una quinta parte del camino hacia el centro galáctico, que se encuentra a 27 000 años-luz de nosotros. El tamaño y la forma reales de la Vía Láctea son difíciles de adivinar a partir de su aspecto en el cielo nocturno. Dado que vivimos dentro de ella, intentar determi-

CADA UNA DE LAS ESTRELLAS QUE VEMOS
A SIMPLE VISTA GIRA CADENCIOSAMENTE
ALREDEDOR DEL INMENSO AGUJERO NEGRO

nar su estructura es como querer dibujar nuestra casa sin salir del dormitorio. Sin embargo, al observarla atentamente y compararla con otras que vemos desde el exterior, podemos comprendemos mejor los procesos que la configuran.

El tamaño de nuestra Galaxia se ha ido ajustando a lo largo del tiempo. Hoy pensamos que los más de 100 000 millones de estrellas que contiene ocupan una región del espacio de unos 100 000 años-luz de diámetro (950 000 billones de km) y 1000 de grosor. Si Elon Musk lanzara su nave *Starship* a cruzar la galaxia tardaría 4000 millones de años en hacerlo. O dicho de otra forma, si la Tierra tuviera el tamaño de un microbio, la Vía Láctea se extendería hasta los 9500 km, más o menos la distancia de Madrid a Lima. Y la estrella más cercana al Sol —que tendría el tamaño de la punta de un alfiler luminoso— estaría situada a 400 metros.

Imaginemos que salimos al espacio intergaláctico y observamos la Vía Láctea de lado. Descubriríamos, no sin cierta gracia, que tiene el aspecto de un platillo volante de las películas de serie B de la década de 1950: en el centro veríamos una especie de abultamiento redondo aunque algo achatado de color rojizoamarillento, pues contiene una densa concentración de viejas estrellas rojizas, formadas en los primeros tiempos de la galaxia. De hecho, teniendo en cuenta que las estrellas más viejas descubiertas en la Vía Láctea tienen una edad de unos 13 400 millones de años, podemos aceptar que nuestra ciudad cósmica lleva vividos poco más de 13 600 millones de años. Pero no todas las estrellas han estado ahí desde siempre, sino que se producen nuevos nacimientos todo el tiempo. Claro que la edad pasa factura: si en su juventud en la Vía Láctea había verdaderos estallidos de formación de estrellas, en la actualidad solo da a luz a poco más de siete estrellas por año.



Sagitario apunta hacia el centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea, donde se concentra la mayor densidad de estrellas y se encuentra el agujero negro supermasivo Sagittarius A*.

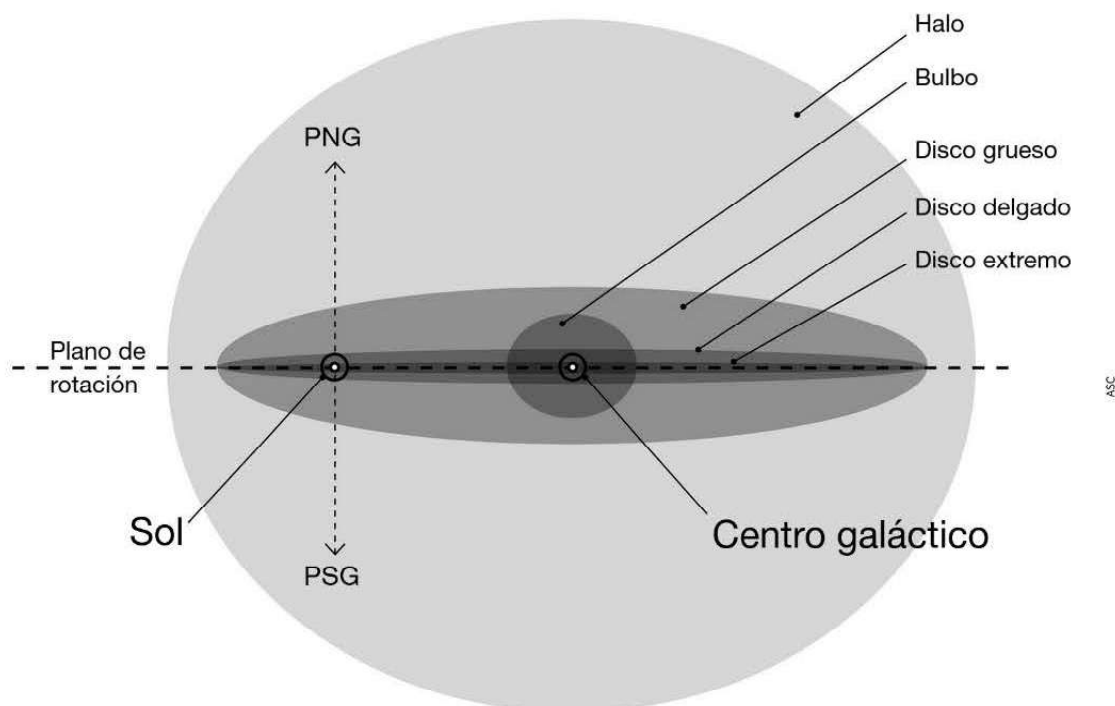


Diagrama de la estructura de la Vía Láctea. Muestra los principales componentes: el disco galáctico, el bulbo central, el halo que rodea toda la galaxia y las diferentes poblaciones estelares.

Rodeando ese núcleo bulboso encontramos un disco con un espesor de unos 1000 años-luz, que contiene gas y polvo enriquecido por los elementos pesados que se cocinaron en el interior de las estrellas masivas que explotaron hace tiempo. De tonalidad azulada, es así donde nacen las nuevas generaciones de estrellas, algunas de ellas muy calientes —de ahí el color azulado— y de gran masa, que vivirán poco tiempo y que a su muerte enriquecerán el entorno del disco con elementos como el oro, la plata, el platino y el resto de elementos pesados.

NUESTRO SOL VIVE AQUÍ

El disco y el bulbo se encuentran rodeados por el halo, una región poco poblada donde se encuentran unos abigarrados enjambres de estrellas viejas, los cúmulos globulares, cuyos miembros están separados unos cuantos minutos-luz: son los «matusalenes» de la galaxia. No contienen estrellas jóvenes y apenas hay gas y polvo para que puedan formarse nuevas estrellas. Los astrofísicos están convencidos de que los cúmulos globulares fueron los primeros en aparecer cuando la galaxia todavía no era más que una vasta nube de gas que estaba empezando a condensarse. Los cúmulos globulares nos hablan de una galaxia joven, de hace diez mil millones de años y, en cierta manera, conservan las características químicas de la nube de gas original a partir del cual se formó la Vía Láctea. Pero también hay estrellas solitarias en el halo. Pocas, pero las hay. Se mueven en órbitas casi aleatorias: dos estrellas vecinas pueden orbitar el centro galáctico en direcciones opuestas. Las estrellas del halo se precipitan en órbitas en picado desde muy por encima del disco hasta muy por debajo, sumergiéndose a través de él a velocidades tan altas que la gravedad apenas altera sus trayectorias. De hecho, varias de estas estrellas rápidas del halo están cruzando no muy lejos de nosotros.

CON NUESTRO SISTEMA SOLAR INCRUSTADO EN EL PLANO POLVORIENTO DE LA VÍA LÁCTEA RESULTA DIFÍCIL DISCERNIR CÓMO ES EL DISCO

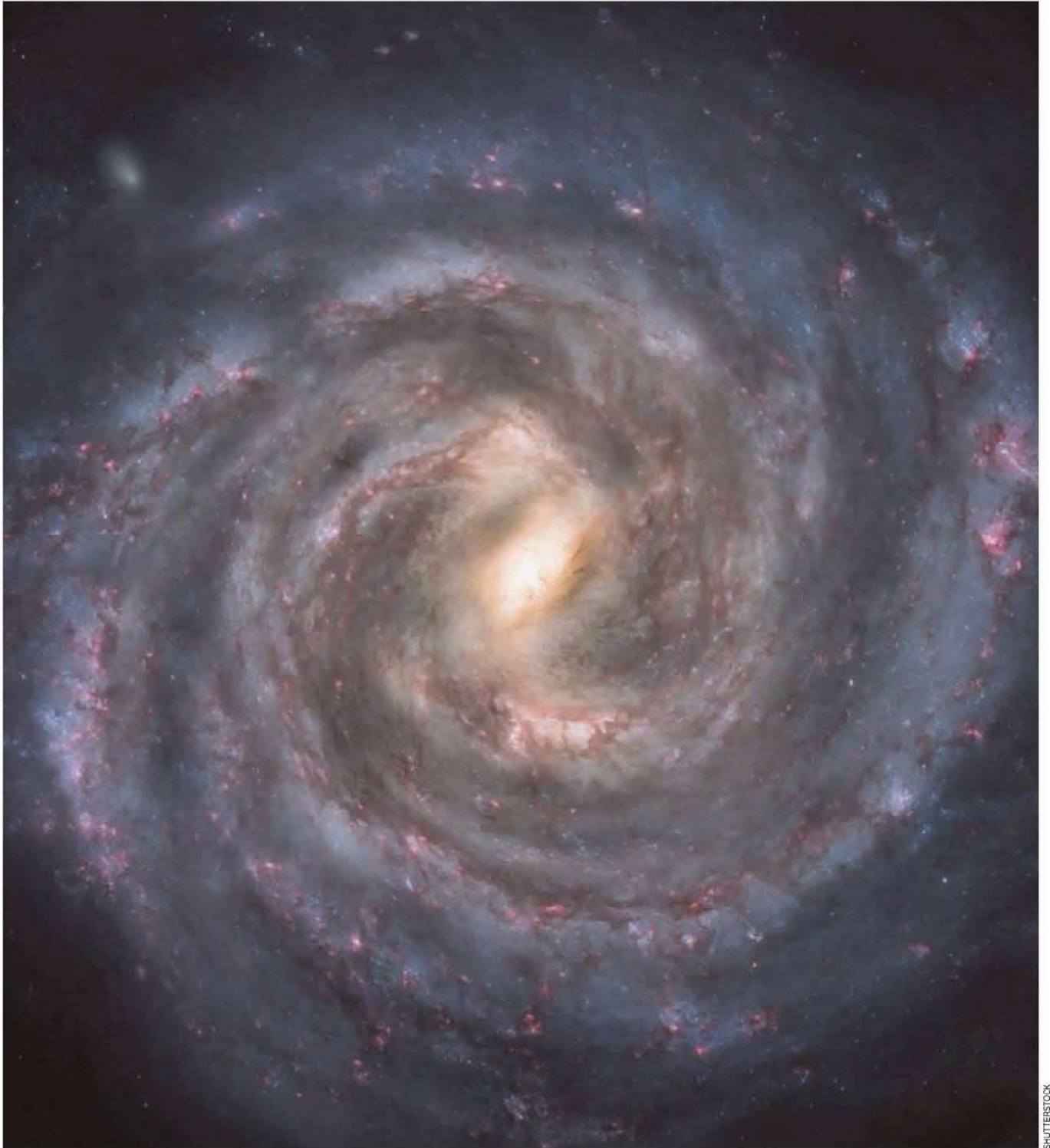
La Vía Láctea es nuestra galaxia natal, pero su importancia para nuestra existencia es mucho más profunda. El nacimiento de nuestro sistema solar no podría haber ocurrido sin el reciclaje galáctico que tiene lugar dentro del disco de la galaxia y su medio interestelar, que hace posible la formación de nuevas generaciones de estrellas y modifica gradualmente la composición química del medio interestelar. Recordemos que el universo primitivo contenía únicamente los dos elementos más ligeros: hidrógeno y helio. Prácticamente todos los demás elementos (a los que los astrónomos suelen denominar «elementos pesados» o «metales») han sido producidos y liberados al espacio por las estrellas. Estos elementos se mezclan con el gas interestelar existente, aumentando su proporción de elementos pesados, que la galaxia recicla para formar nuevas generaciones de estrellas. Hoy, gracias a más de 10 000 millones de años de reciclaje galáctico, los «elementos pesados» constituyen aproximadamente el 2 % del contenido en masa de la galaxia. El 98 % restante todavía se compone de hidrógeno (71 %) y helio (27 %).

Este reciclaje nos permite distinguir entre dos poblaciones de estrellas: la Población I, que se encuentra en el disco galáctico, y son estrellas, tanto jóvenes como viejas, que contienen un 2 % de elementos pesados. Y la Población II, que son las estrellas que componen el halo: viejas y de poca masa, contienen una cantidad de metales cien veces menor que las de la Población I. ¿Y las estrellas del bulbo? Son una mezcla de las dos, aunque son más abundantes de la Población II.

Con nuestro sistema solar incrustado en el plano polvoriento de la Vía Láctea nos resulta muy difícil discernir cómo es el disco exactamente. Es como querer determinar el dibujo de un plato de porcelana mirándolo de canto. Pero si pudiéramos verla desde arriba descubriríamos que el dibujo son unos brazos espirales, como le sucede al 77 % de las galaxias del universo. Esos brazos espirales están llenos de estrellas en formación, albergan nubes moleculares y numerosos cúmulos de estrellas jóvenes, brillantes y azules, rodeadas de delicadas nubes de gas ionizado. Observando con detalle estas estructuras en otras galaxias espirales encontramos que son las estrellas azules calientes y las nebulosas de ionización las que «trazan» los brazos, mientras que las estrellas entre los brazos son generalmente más rojas y antiguas. También observamos mayores cantidades de gas en los brazos espirales, el material necesario para formar nuevas estrellas.

Ahora bien, el número de brazos que tiene la Vía Láctea no está nada claro. En la década de 1950 se creía que tenía cuatro, pero observaciones realizadas a partir de la década de 1980 se rebajaron a dos, el de Escudo-Centauro y el de Perseo (sus nombres están referidos a las constelaciones por donde cruzan), un modelo que se confirmó en 2013 gracias a las observaciones realizadas por el telescopio espacial infrarrojo Spitzer. Pero un año más tarde, a finales de 2014, los datos obtenidos por el también telescopio espacial infrarrojo Wide-Field Infrared Survey Explorer (WISE) volvieron a poner en juego el modelo de los cuatro brazos.

EL CENTRO GALÁCTICO ES SIMILAR AL DE NUESTRAS CIUDADES: CASAS VIEJAS, MUCHA GENTE Y MUCHO MOVIMIENTO



Esta perspectiva exterior nos permite visualizar cómo se ve la Vía Láctea desde el espacio intergaláctico con su forma espiral. Concepción artística basada en imágenes de la NASA.

Al parecer, nuestra galaxia posee los dos brazos antes mencionados, hechos de estrellas viejas, y otros dos secundarios, el de Sagitario y el de Norma-Cisne, con estrellas jóvenes. Por qué es así es algo que todavía no tiene explicación. Nuestro Sol se encuentra en un pequeño apéndice conocido como el brazo de Orión, situado entre el de Sagitario y el de Perseo. Abarca 3500 años-luz de ancho y aproximadamente 20 000 años-luz de longitud de largo. Pero no nos engañemos; la geografía de la Vía Láctea no es algo que se tenga bien establecido. Lo único que parece estar claro es que, tenga el número de brazos que tenga, vivimos en una galaxia espiral barrada, pues una «barra» de materia cruza su centro con una longitud de 27 000 años-luz. Solo el 30 % de las galaxias espirales la tienen.



El telescopio *WISE*, arriba, se lanzó en el año 2009 y cartografió repetidamente todo el cielo en luz infrarroja.

Si ahora miramos hacia el centro galáctico veremos que no se queda atrás en misterios. Al acercarnos a él notaremos que el número de estrellas por año-luz cúbico se dobla cada 10 000 años-luz: las estrellas son más comunes en el disco interior que en el exterior. Rodeando el centro tenemos el bulbo galáctico, un enjambre de diez mil millones de estrellas que se extienden a lo largo de 3500 años-luz.

ENANAS BLANCAS, ESTRELLAS DE NEUTRONES...

El centro galáctico es similar al de nuestras ciudades: casas viejas, mucha gente y mucho movimiento. En nuestro caso, encontramos las estrellas más viejas de la Vía Láctea, que se formaron tan solo 300 millones de años después de la Gran Explosión, la

distancia media entre estrellas es de solo mil veces la distancia Tierra-Sol (en nuestro entorno la separación es 260 veces mayor), y nubes de gas que se mueven a velocidades de más de tres millones y medio de kilómetros por hora. Esto significa que están a diez millones de grados centígrados y emiten gran cantidad de rayos X. Claro que no son las únicas fuentes de esta radiación de alta energía: enanas blancas, estrellas de neutrones y agujeros negros estelares añaden su granito de arena.

Si viviéramos en algún planeta de la zona —y supiéramos protegernos de la mortal radiación que la inunda— el cielo nocturno sería un espectáculo fantástico, plagado de estrellas, muchas de ellas tan brillantes como Sirio (la más luminosa vista desde la Tierra), además de restos de supernova, filamentos de gas caliente, nubes de gas molecular donde nacen nuevas estrellas, como son Sagitario B1 y B2, y algo parecido a un cúmulo abigarrado de una docena de estrellas, brillantes y azuladas, llamado IRS 16. Este último es un verdadero misterio porque para ser estrellas son demasiado grandes y brillantes. ¿Qué son? No se sabe.

También encontramos cúmulos de estrellas mucho más masivas que el Sol entre los que destacan Arcos, que situado a 100 años-luz del centro y con una edad de dos millones y medio de años es el más denso conocido de la Vía Láctea (mil estrellas por año-luz cúbico), y Quíntuple (tiene cinco fuentes de emisión en infrarrojo) que es el doble de viejo que el anterior y menos denso, pero contiene dos estrellas muy peculiares: la estrella-pistola, una hipergigante azul que irradia en 20 segundos la energía que emite el Sol en un año, y V4650 Sagittarii, 1,7 millones de veces más luminosa que el Sol.

A medida que nos acercamos a la zona central el nivel de radiación gamma aumenta, llegando a ser 250 000 veces mayor a la de la luz visible. La mayor parte se origina en el interior del llamado Gran Aniquilador, pues en su interior cada segundo se destruyen diez mil millones de toneladas de antimateria. No sabemos de qué se trata, aunque se sospecha que es un agujero negro oculto tras una enorme nube de gas. Pero ahí no está el centro de la galaxia; nos encontramos cerca, a 350 años-luz.

Un poco más cerca, a 200 años-luz, nos encontramos con una peculiar nube molecular de historia no tan anodina como su nombre, CO-0.40-0.22. En su interior los radioastrónomos han encontrado ácido cianhídrico, cianoacetileno, metanol, formamida, tioformaldehído... toda una botica de compuestos complejos. Tiene una masa de 4000 soles, forma elíptica y se mueve a gran velocidad, pero no de manera uniforme: la diferencia de velocidades de distintas partes de la nube pueden llegar a los 360 000 km/h, de ahí su forma ovalada. Las observaciones de esta nube apuntan a que en su interior hay un agujero negro de 100 000 masas solares, lo que lo convertiría en el segundo más masivo de la Vía Láctea. Pero tampoco está claro.

CORRIENTE DE SAGITARIO

Y llegamos al centro, donde se encuentra una brillante mancha bulbosa conocida como Sagitario A (Sgr A), que ocupa un espacio de 30 años-luz de diámetro del centro. Tradicionalmente se divide en dos regiones. Una es Sagitario A



Sobre estas líneas podemos ver la imagen de Sagitario B1 —una región cercana al centro de la Vía Láctea— fotografiada con el Very Large Telescope (VLT) de ESO, en Chile.

LA VÍA LÁCTEA AÚN ESTÁ POR TERMINAR, SIGUE RECOGIENDO MATERIAL CÓSMICO AL ENGULLIR PEQUEÑAS GALAXIAS

Este, una burbuja de gas y radiación producida por la explosión de una supernova ocurrida hace unos 10 000 años. Aunque emite la radiación típica de este tipo de restos, sorprende por ser más pequeño de lo esperado: apenas unos 30×20 años luz. Se cree que su crecimiento se frenó porque la onda expansiva chocó contra las densas nubes de gas de la zona. Frente a Sagitario A Este se arremolina uno de los objetos cósmicos más fantásticos jamás descubiertos: Sagitario A Oeste. Abarca solo 14 años-luz de territorio galáctico, pero se encuentra justo en el verdadero centro de la Vía Láctea. Dos zonas llaman la atención inmediatamente. Una es un cúmulo que radia intensamente en el infrarrojo y que ha sido bautizado como IRS 16. Está compuesto por una veintena de objetos brillantes y azules, cuyo tamaño y luminosidad es demasiado grande para ser estrellas normales. Las «estrellas» de IRS 16 emiten fundamentalmente luz visible y ultravioleta pero la nube de polvo en la que están inmersas absorbe esta radiación, se calienta y reemite esta energía como infrarrojo. Orbitando en torno a IRS 16 se observan tres columnas gaseosas de hidrógeno ionizado y que guardan una forma similar a una espiral, de ahí que se las haya bautizado con el nombre tan poco imaginativo de «miniespiral». Allí el gas caliente, ionizado, parece girar y precipitarse hacia el centro. Observaciones en infrarrojo y radio han confirmado que se trata de un auténtico torbellino de materia que se mueve a mil kilómetros por segundo. Rodeando esta espiral se ha detectado un anillo irregular de gas molecular denso, que actúa como reserva de combustible. Parte de ese material probablemente acabará cayendo hacia el interior de IRS 16, el verdadero corazón de la galaxia: Sagitario A*, un agujero negro tan grande como la órbita de Mercurio y con una masa de cuatro millones de soles.

Si estos son los misterios del centro, los de las afueras tampoco se quedan cortos: allí encontramos dos filamentos de estrellas y gas. El más conocido recibe el nombre de la Corriente de Sagitario y rodea la galaxia en órbita polar. De él lo más fascinante es su origen: se supone que es producto del canibalismo. Porque, aunque parezca mentira, la Vía Láctea aún está por terminar. Sigue recogiendo material cósmico al engullir pequeñas galaxias atrapadas en su pozo gravitacional. Una de las teorías más en boga es que las galaxias como la Vía Láctea crecieron gracias a una lenta pero continua labor de recolección de otras más pequeñas. Hoy el proceso continúa, pero a un ritmo más lento. Un ejemplo es una pequeña galaxia esferoidal que está «cayendo» sobre el disco de nuestra galaxia al otro lado de donde nos encontramos y a poco más de 18 000 años-luz del centro. O el cúmulo globular más grande y brillante, Omega Centauri, no es otra cosa que lo que queda del corazón de una galaxia enana que devoramos hace mucho tiempo. Y se cree que la galaxia enana del Can Mayor, la más cercana a nosotros (a 25 000 años-luz del sistema solar) forma parte de este larguísimo buffet libre con el que la Vía Láctea va creciendo y engordando. ■

Ga laxias, universos-isla

Imagen realizada desde el
telescopio espacial *Hubble* de la
NASA de las galaxias Antennae,
dos galaxias pertenecientes a la
constelación de Corvus.

NASA & ESA





La galaxia espiral del Remolino, M51, una ubicada a 31 millones de años-luz en la constelación Canes Venatici fue descubierta por Charles Messier en 1781.

Una de las galaxias más espectaculares del cielo, visible con un telescopio de aficionado, es la Remolino o M51. Pocas visiones pueden rivalizar ante la grandeza de una galaxia espiral: desde sus brazos curvos, iluminados por el resplandor azulado de las estrellas recién nacidas, hasta su núcleo central amarillento, hogar de las estrellas más viejas. Estas impresionantes ciudades cósmicas son los ladrillos del universo, aunque no sabemos muy bien qué hacen aquí, porque el universo podría haber extendido la materia de manera uniforme en lugar de acumularla en forma galaxias.

Una búsqueda elemental de esos universos-isla, como se les conocía a comienzos del siglo pasado, nos muestra que hay diferentes tipos de galaxias. Quien empezó a poner orden en el desconcierto fue un joven astrónomo, fumador de pipa y pescador incansable, llamado Edwin Powell Hubble. En 1926 publicaba en la revista *The Astrophysical Journal* el artículo titulado «Extra-galactic nebulae» donde introducía una clasificación morfológica de las galaxias que a partir de entonces se la conoce como la secuencia de Hubble. Tras estudiar 400 de esas nebulosas extragalácticas desde el Observatorio del Monte Wilson, Hubble distinguió tres tipos principales: lenticulares —con forma de lenteja—, elípticas —con forma de huevo— y espirales —que presentan unos brazos alrededor del núcleo—. A ellas habría que añadir las irregulares, pero por carecer de estructura Hubble no las incluyó inicialmente en su esquema.

¿CÓMO APARECIERON ESOS BRAZOS?

En las elípticas la luz está concentrada en su centro. Algunas son gigantes, como M87 en el cúmulo de Virgo, mientras que otras son mucho más pequeñas, como M32, una galaxia satélite de Andrómeda, con un radio de tan solo 4000 años-luz. Las galaxias elípticas no contienen prácticamente gas, el material necesario para formar estrellas. De hecho, la luz global de las elípticas es amarillo-anaranjado, lo

que significa que las estrellas que contiene son viejas: las supergigantes azules y blancoazuladas, con una vida media muy corta, hace tiempo que desaparecieron y no han nacido más por la falta de gas interestelar. Solo quedan las anaranjadas y gigantes rojas, que han evolucionado a partir de estrellas de larga vida, como el Sol.

Ahora bien, cuando pensamos en galaxias la imagen que se nos viene a la mente son las majestuosas espirales. Mientras que las elípticas pueden ser pequeñas o grandes, las espirales son normalmente grandes, porque solo estas pueden presentar esa estructura. La rotación, de hecho, distingue a las espirales de las elípticas gigantes. Las espirales rotan más deprisa: en la próxima hora, el Sol y la Tierra recorrerán más de 800 000 km en su camino alrededor del centro galáctico. Una distancia tremenda, pero como la Vía Láctea es tan grande, tardarán 230 millones de años en dar una vuelta completa. Por el contrario, una galaxia elíptica gigante no rota, sino que sus estrellas se mueven en órbitas desordenadas y aleatorias alrededor del centro galáctico, sin el patrón de rotación global que tienen las espirales. Una diferencia más con las elípticas es la presencia de gas y el polvo situado en los brazos espirales, el material del que nacen nuevas estrellas. Es por eso que sus brazos brillan con luz blancoazulada.

Pero no hay un único tipo de espirales. En un principio podemos dividir las en dos grupos: aquellas que poseen una «barra» de estrellas, gas y polvo que cruza el bulbo central de lado a lado, y que reciben el evidente nombre de espirales barradas, y las que no lo tienen. Ahora bien, la estructura en espiral de galaxias como la Vía Láctea o la de Andrómeda es, podríamos decir, un espejismo. Su estructura real es la de un disco que rodea a un bulbo central esférico. El astrofísico del Instituto Tecnológico de California Cameron Hummels dice que tienen el aspecto de huevo frito: la yema es el centro esférico que está rodeado por un disco plano de gas y estrellas, la clara. Y la verdad es que ese disco es muy plano; por ejemplo, el de la Vía Láctea tiene 100.000 años-luz de diámetro por solo 1000 de grosor. Eso quiere decir que, proporcionalmente, nuestra galaxia es 30 veces más delgada que una hoja de papel.

Entonces, ¿por qué solo vemos los brazos espirales? A causa de las estrellas más masivas y brillantes que nacen allí y cuya luz hace que las nubes de gas interestelares brillen, resaltando los brazos, que son las zonas donde la densidad de estrellas y nubes es mayor que en el resto del disco. ¿Y por qué no hay —o hay muy pocas— estrellas grandes y brillantes fuera de los brazos? Debido a una regla básica del mundo de las estrellas: cuanta más masa tienes, más brillas y antes mueres. Por tanto, a las estrellas más brillantes que nacen dentro de un brazo espiral no les da tiempo a salir antes de desaparecer explotando como supernova. Eso no es del todo malo, sino todo lo contrario, porque a partir del material que lanzan al espacio con la explosión —más rico en elementos pesados como el oxígeno o el hierro— se formará una nueva generación de estrellas. Por el contrario, aquellas estrellas más

CUANDO PENSAMOS EN GALAXIAS LA IMAGEN QUE SE NOS VIENE A LA MENTE SON LAS MAJESTUOSAS ESPIRALES

A LOS ASTROFÍSICOS LES COSTÓ DARSE CUENTA DE QUE LOS BRAZOS NO SON MÁS QUE SECCIONES CONCRETAS DEL DISCO

pequeñas y menos masivas — como es el caso de nuestro Sol — vivirán lo suficiente para salir del brazo, pero su tenue luz no basta para iluminar su entorno.

¿Cómo aparecieron esos brazos? Resulta evidente que no nacieron con ellos, sino que se formaron millones de años después. En el caso de la Vía Láctea fue gracias a que nuestra galaxia es una tragaldabas y capturó una más pequeña que pasó por su lado. ¿Y cómo deriva esta glotonería en una estructura estable como esa? Quizá la mejor forma de entenderlo es realizando el siguiente experimento propuesto por el astrónomo Neil F. Comins. Llenemos un balde grande con agua (la Vía Láctea) y dejemos caer una piedrecita en el centro (la pequeña galaxia devorada): vemos que se forman unas olas, unas perturbaciones en la superficie en forma de anillos concéntricos alrededor del punto de caída de la piedra. Ahora colocamos el balde sobre un torno para modelar arcilla y lo hacemos girar: al dejar caer la piedrecita no aparecerán círculos concéntricos, sino ondulaciones espirales. Esto es, en esencia, el mecanismo de formación de los brazos: una perturbación gravitatoria en el disco de la galaxia.

¿POR QUÉ UNAS ACABAN SIENDO ELÍPTICAS Y OTRAS ESPIRALES?

Entender la dinámica de los brazos espirales tampoco es sencillo. A primera vista parece que los brazos espirales se mueven con las estrellas, como las aletas de un gigantesco molinillo en el espacio. Sin embargo, las observaciones indican que las estrellas del disco orbitan aproximadamente a la misma velocidad. Por su parte, las estrellas cercanas al bulbo de la galaxia, que se mueven en círculos con radios menores, completan una órbita en mucho menos tiempo que las estrellas alejadas del centro. Por tanto, si los brazos espirales se movieran junto con las estrellas, sus partes centrales darían vueltas alrededor de la galaxia mucho más rápido que sus partes exteriores, y en unas pocas rotaciones galácticas los brazos quedarían enrollados alrededor del centro formando una espiral apretada. Pero esto no es lo que se observa: los brazos se parecen más a las ondas de un remolino que a las aletas de un molinillo gigante.

A los astrofísicos les costó darse cuenta de que los brazos no son más que secciones concretas del disco que se ven con más claridad. Fueron Bertil Lindblad, C.-C. Lin y Frank Chu quienes a principios de los sesenta sugirieron que los brazos espirales eran como un miliario, marcan simplemente la posición de una onda de densidad, una región de compresión que se desplaza lentamente por el disco de la galaxia. En esencia funcionan como un atasco en una autopista: los coches (estrellas) se mueven a 120 km/h pero cuando llegan a él, reducen su velocidad adaptándose a la del embotellamiento (onda de densidad), lo que hace que aumente el número de coches (la densidad de estrellas). Una vez superado, los coches (estrellas) vuelven a recuperar su velocidad anterior. Por eso se ven brazos espirales aunque

en realidad todo el disco está lleno de estrellas y gas. Estas ondas de densidad tienen poco efecto en las estrellas, ya que siempre permanecen demasiado separadas como para colisionar entre sí. Sin embargo, cuando una enorme nube de gas entra en una, se comprime y comienza la formación de estrellas. Las explosiones de supernovas de estrellas masivas del disco, que comprimen aún más las nubes circundantes, desencadenan más formación estelar.

¿Y qué hay de la otra parte de la galaxia espiral, el bulbo galáctico? En él se encuentran estrellas muy antiguas que giran alrededor del centro. Pero hay una diferencia respecto a las del disco: mientras que estas se mueven de forma ordenada en un plano horizontal, las que componen el bulto parecen abejas pululando erráticamente alrededor de su colmena. Por desgracia, aún no tenemos claro cómo se forma esa parte central: mientras que algunos creen que se desarrolla antes que el disco, otros piensan lo contrario.



En la imagen se muestran los efectos de la lente gravitacional causada por un objeto llamado SDSS J1152+3313.

ENLACE AL CANAL

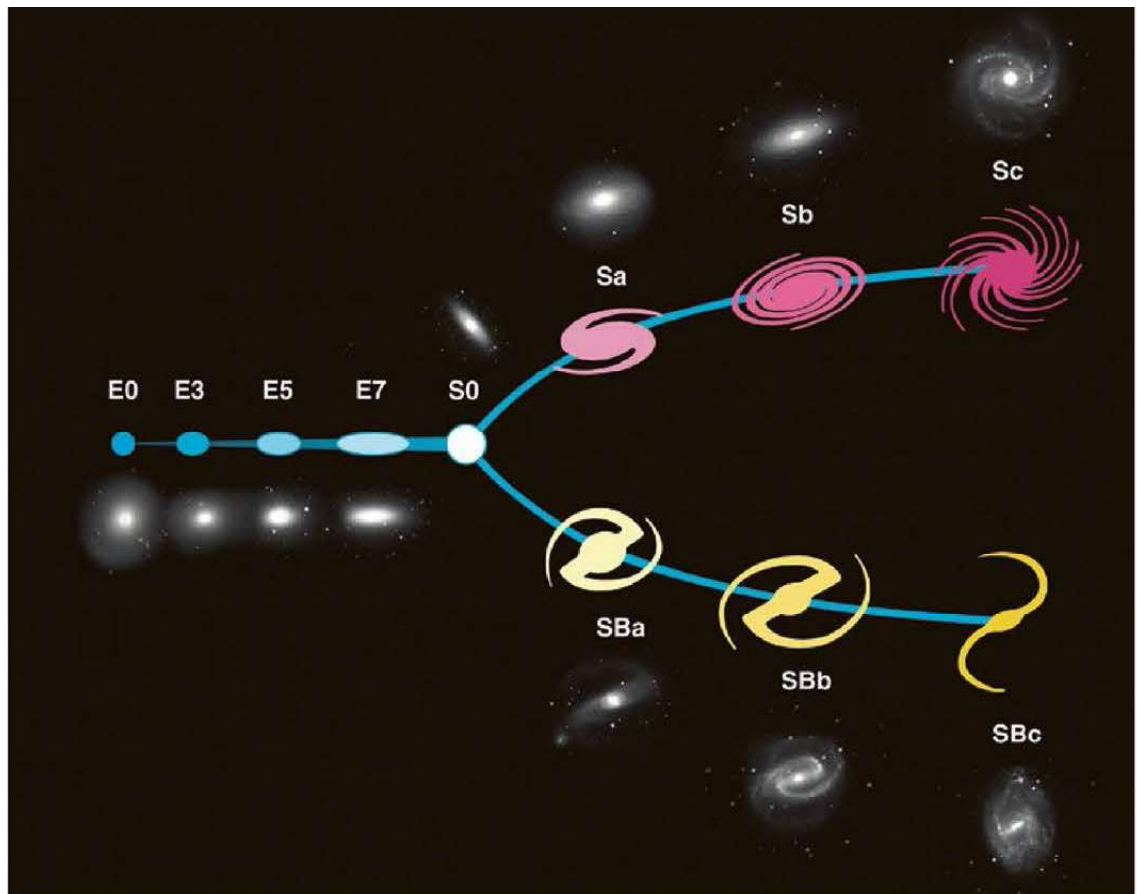
x.com/byneontelegram

O escanea el código QR:



La aparición de las galaxias

Cuándo surgieron las primeras estrellas y galaxias? Para responder a esta pregunta los astrofísicos utilizan uno de los resultados más importantes de los últimos tiempos: el diagrama de Madau, que dibuja el ritmo de formación estelar en el cosmos desde los primeros tiempos hasta hoy. Según él, la creación de estrellas aumentó rápidamente al poco de nacer el universo, en los primeros miles de millones de años, y alcanzó la cúspide, con la mayoría de las estrellas y galaxias actuales ya formadas, entre 5000 y 6000 millones de años después del Big Bang. Los astrónomos intuyen que algo trascendental tuvo que pasar por entonces: está demostrado que la densidad de cuásares alcanza su punto álgido en esa época, lo mismo que el ritmo de producción de elementos pesados —oxígeno, nitrógeno...—. A ese periodo los astrónomos lo llaman la época de redshift 2. ¿Qué pasó antes? No está nada claro.



Infografía de los distintos tipos de galaxias según el esquema de clasificación de Hubble: una E indica una galaxia elíptica; una S es una espiral; y SB es una galaxia espiral barrada.

El último tipo de galaxias, las lenticulares, se encuentra entre las espirales y las elípticas y puede considerarse como un tipo de galaxia intermedia. Al igual que las espirales, tienen un disco grande, pero no brazos espirales. Son galaxias que han usado o perdido la mayor parte de su materia interestelar y, por lo tanto, el ritmo de formación estelar es muy bajo. A pesar de ello, suelen retener una cantidad significativa de polvo en su disco. Eso sí, comparten con las elípticas una población envejecida de estrellas. Se trata de un tipo de galaxias poco comprendido y poco abundante, al igual que sucede con el último tipo, las irregulares, con formas demasiado amorfas para que puedan caer dentro de alguna categoría. Los ejemplos más cercanos a nosotros son nuestras dos galaxias-satélite, visibles desde el hemisferio sur: las Nubes de Magallanes.

Pero seguimos sin resolver una cuestión: en el universo observable, aquel que es accesible a nuestros telescopios, hay del orden de 200 000 millones de galaxias. Todas ellas han seguido un proceso de formación más o menos similar, a partir de una nube de gas y polvo primigenia. Entonces, ¿por qué unas acaban siendo elípticas y otras espirales? ¿Es posible que la secuencia de Hubble sea, en realidad, una gráfica de la evolución galáctica? Que Hubble llamara a las galaxias elípticas y lenticulares de «tipo temprano» y a las espirales «tardías» hizo que muchos pensa-

**EN EL UNIVERSO OBSERVABLE, AQUEL QUE ES
ACCESIBLE A NUESTROS TELESCOPIOS, HAY DEL
ORDEN DE 200 000 MILLONES DE GALAXIAS**

ran así: las elípticas se convierten con el paso del tiempo en espirales. Sin embargo el propio Hubble lo dejó claro en un artículo publicado en 1927: «La nomenclatura se refiere a la posición en la secuencia y las connotaciones temporales se hace por cuenta y riesgo de cada uno».

CADA GALAXIA TIENE SU PROPIA HISTORIA

Imaginemos una galaxia que toda ella sea el bulbo. Sin disco, la veríamos como una esfera gigante o una enorme pelota de rugby: estamos ante una galaxia elíptica. Pues bien, se supone que uno de los procesos más comunes que crean galaxias elípticas es la fusión de dos espirales. Una prueba indirecta de esta hipótesis es ese movimiento aleatorio que tienen allí las estrellas: al producirse la fusión, las estrellas comienzan

a tirar unas de otras, interrumpiendo la parsimoniosa rotación que llevaban antes de la fusión. No hace falta aclarar que no todas las fusiones dan como resultado una galaxia elíptica: la Vía Láctea es un buen ejemplo de ello, pues mantiene su forma a pesar de que a lo largo de su vida ha ido aumentando su masa devorando galaxias enanas que se encontraban cerca de ella.

De lo que no hay duda es de que cada galaxia, como cada ser humano, tiene su propia historia, y esa historia queda reflejada en la apariencia que tiene. En este caso, que adquiera una forma u otra depende de tres factores: la velocidad de rotación, el tiempo y la gravedad. Para el astrofísico de la Universidad de California en Santa Cruz, Raja GuhaThakurta, experto en evolución galáctica, la velocidad de rotación desempeña un papel crucial en el futuro aspecto de la galaxia, pues



Retrato de Edwin Powell Hubble (1931), realizado por el fotógrafo e intelectual artístico Johan Hagemeyer.

cuanto más masiva y más rápidamente rote la nube primigenia, más probable es que termine convirtiéndose en una galaxia espiral. Por otro lado, Todo partió de un hecho observacional bien conocido desde hace medio siglo: las galaxias espirales tienden a encontrarse solas en el espacio mientras que las elípticas y lenticulares prefieren quedarse en cúmulos y cerca de otras galaxias. ¿Por qué? Quizá el entorno galáctico condiciona el aspecto que tendrá una galaxia. Para astrofísicos como Joel Pfeffer de la Universidad de Swinburne (Australia) «hemos descubierto que los brazos espirales son muy frágiles y, a medida que aumenta la densidad de galaxias en los cúmulos, las espirales comienzan a perder su gas, dejan caer sus brazos y acaban teniendo una apariencia lenticular».

Por desgracia, es mucho lo que desconocemos: la formación y evolución de galaxias es una de las mayores preguntas abiertas en el campo de la astrofísica. ■



De las galaxias activas a los cuásares

Las galaxias activas alimentan agujeros negros supermasivos en sus centros que aceleran materia a velocidades relativistas, creando chorros de partículas que se extienden miles de años-luz.

Los cuásares representan la versión más extrema de estos fenómenos, siendo los objetos más luminosos del universo observable.

SHUTTERSTOCK

En 1943, en plena Segunda Guerra Mundial, mientras el mundo estaba pendiente sobre el cambio de dirección que estaba tomando la guerra a favor de los Aliados, un astrónomo en el Observatorio Yerkes de la Universidad de Chicago se dedicaba a mirar el cielo. Su nombre era Carl Keenan Seyfert. Al analizar con paciencia las fotografías espectroscópicas de varias galaxias cercanas notó algo que no encajaba. En los núcleos de seis de esas galaxias observó un brillo desmesurado y un conjunto de líneas de emisión peculiares, intensas y anchas, que no podían explicarse por la actividad habitual de las estrellas. Seyfert publicó sus resultados en un artículo que pasó casi desapercibido pero que, en los años siguientes, se convirtió en la primera

pieza de un rompecabezas cósmico. Sin proponérselo, había descubierto lo que hoy conocemos como galaxias activas, objetos cuya energía proviene de procesos tan extremos que durante décadas nadie pudo explicar con certeza de dónde provenía semejante despliegue pirotécnico.



UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY SPECIAL COLLECTIONS RESEARCH CENTER

En esta fotografía el astrónomo Dr. Carl Keenan Seyfert observa a través de un ocular del telescopio *McDonald*.

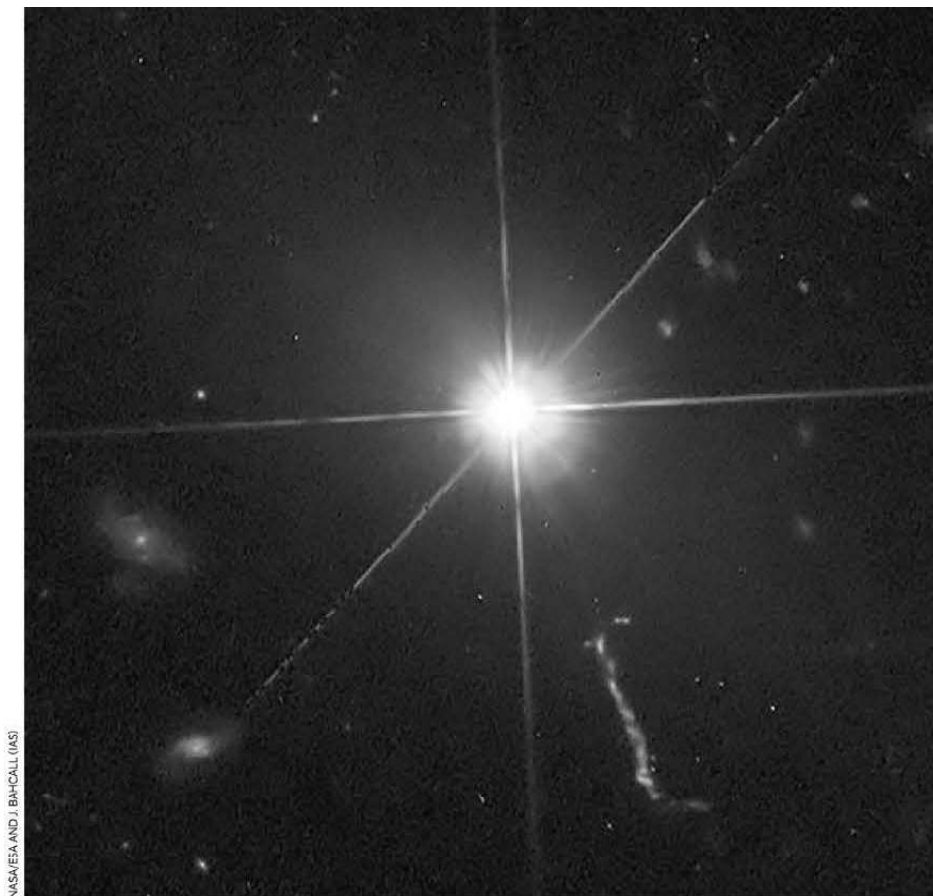
LÓBULOS DE RADIO

La luminosidad del núcleo de lo que desde entonces se conoce como una galaxia Seyfert es inmensa: equivale a toda la radiación emitida por la Vía Láctea pero proveniente de una región de un tamaño de menos de un año-luz de diámetro. El centro de las galaxias Seyfert también contienen nubes de gas que se mueven a velocidades de unos 10 000 kilómetros por segundo o más y, en algunos casos, el núcleo expulsa gas a chorros a velocidades cercanas a la

de la luz. La intensa radiación del núcleo de una galaxia Seyfert también puede fluctuar rápidamente en intensidad, a veces en cuestión de minutos.

En la década de 1950, con el advenimiento de la radioastronomía, los astrónomos comenzaron a identificar otro tipo de galaxias a las que denominaron radiogalaxias. Como su nombre indica, emiten grandes cantidades de energía en la parte radio del espectro, típicamente millones de veces más que la energía de

AL ANALIZAR LAS FOTOGRAFÍAS ESPECTROSCÓPICAS, CARL KEENAN SEYFERT NOTÓ QUE ALGO NO ENCAJABA



La cámara avanzada para sondeos (ACS) del telescopio espacial *Hubble* ha proporcionado la visión más clara hasta el momento en luz visible del cuásar, 3C 273.

radio emitida por una galaxia normal. La mayoría son galaxias elípticas y la emisión proviene principalmente de regiones externas a la galaxia, que por su forma se denominan «lóbulos de radio». Estos lóbulos aparecen por la interacción entre los chorros de materia —que salen disparados en direcciones opuestas— y el medio intergaláctico. Los lóbulos pueden extenderse desde cientos hasta millones de años-luz: los de la radiogalaxia Alcioneo alcanzan los 16 millones de años-luz y fue descrita por sus descubridores como la «estructura más grande conocida de origen galáctico» (recordemos que la Vía Láctea tiene unos cien mil años-luz de diámetro).

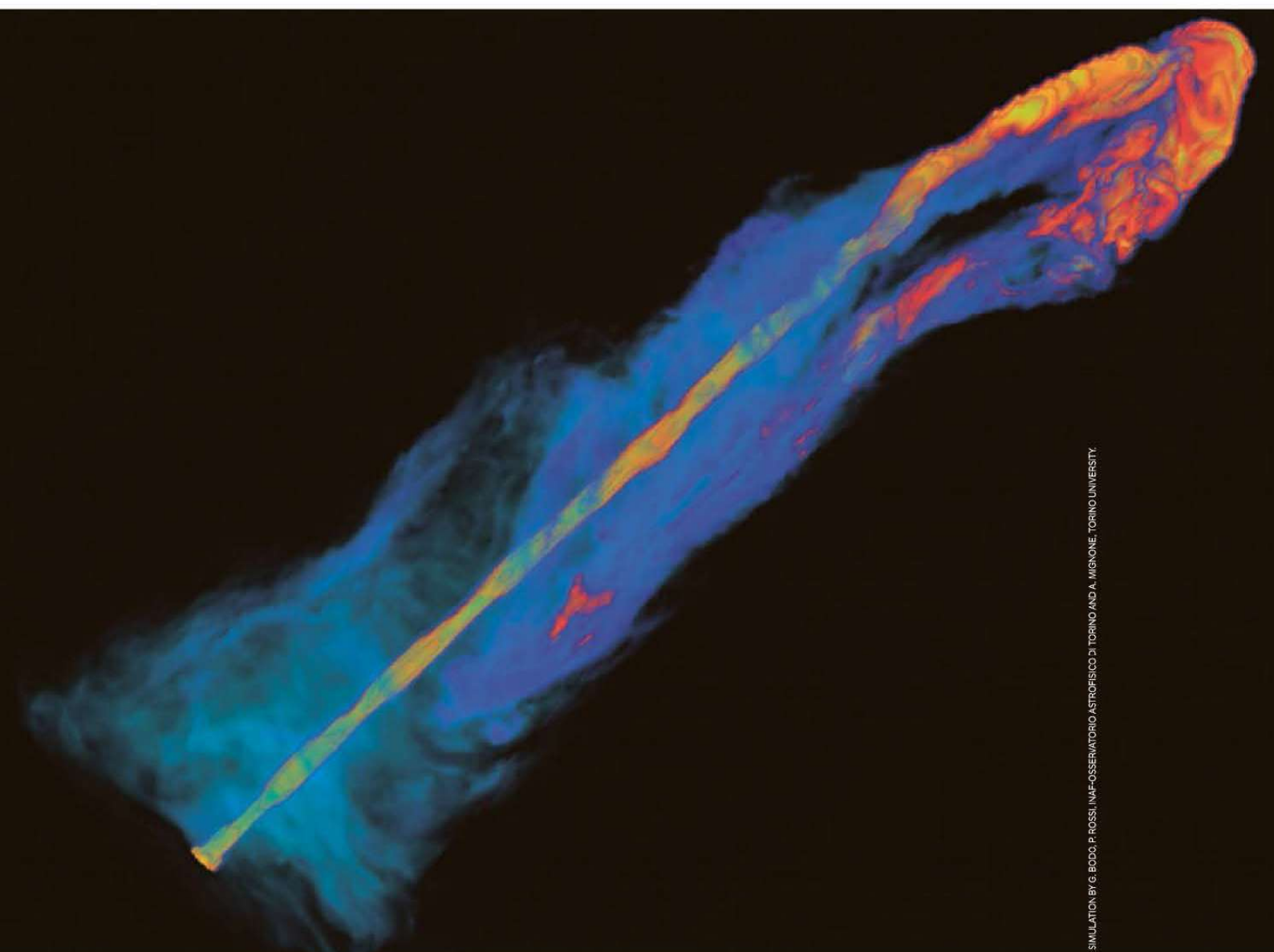
Pero la exploración del cielo en ondas de radio tenía reservada una sorpresa aún mayor, fuentes de radio que, aparentemente, no tenían contrapartida visible en el cielo. Eran los cuásares, uno de los descubrimientos más fundamentales de la astrofísica moderna.

El primer cuásar que fue identificado como un objeto extraño fue 3C 48 (el número 48 del tercer catálogo de radiofuentes de Cambridge). Sabiendo de la existencia de ese foco emisor en radio, Thomas Matthews y Allan Sandage, de los Observatorios Hale, comenzaron una búsqueda sistemática en el visible por la zona del cielo en la que debía estar. Y lo encontraron. A través del telescopio era un puntito luminoso, como una estrella, pero con un espectro realmente extraño, porque tenía líneas de emisión anchas en unas longitudes de onda que no se correspondían con ninguna de las características observadas en los espectros de las estrellas. De ahí que se bautizara como objeto cuasi estelar, cuásar.

La solución al puzle llegó en 1962 cuando otra de estas radiofuentes, 3C 273, pasó por detrás de la Luna. Determinando con exactitud el instante de la ocultación se pudo discriminar con precisión a qué estrella —vista por el telescopio—

correspondía. Resultó ser el cuásar más brillante que jamás se haya descubierto. Al año siguiente, Maarten Schmidt descubrió que su espectro mostraba un notable desplazamiento al rojo, al igual que 3C 48, que había estudiado con anterioridad. Eso significaba que ambos estaban a una distancia cosmológica enorme y, por tanto, debían ser extraordinariamente luminosos para que pudiéramos detectarlo desde tan lejos. Desde ese momento, los cuásares pasaron a ser los faros cósmicos más brillantes conocidos, protagonistas de intensos debates y de no pocas anécdotas, como la famosa afirmación del astrónomo ruso Kardashev en 1965 de que el cuásar CTA-102 podría ser un mensaje en ondas de radio de una civilización extraterrestre.

A lo largo del tiempo se han ido descubriendo otros objetos extragalácticos que emiten gran cantidad de energía: además de las galaxias Seyfert, los cuásares o las radiogalaxias tenemos los blázares, que se encuentran entre los fenómenos



SIMULATION BY G. BODO, P. ROSSI, INF-OSSERVATORIO ASTRONOMICCO DI TORINO AND A. MIGNONE, TORINO UNIVERSITY

Sobre estas líneas, simulación magnetohidrodinámica 3D de un jet extragaláctico mostrando las inestabilidades que causan ondulaciones en su estructura.

A LOS ASTRÓNOMOS SOLO LES QUEDABA PLANTEAR LA HIPÓTESIS DE QUE EL NÚCLEO DEBE CONTENER ALGO MUY INUSUAL

más violentos del universo y que se caracterizan por emitir un chorro de partículas a velocidades cercanas a la de la luz, o los objetos BL Lacertae que tienen un cambio de brillo muy pronunciado y muy rápido (en días o semanas).

UN CUÁSAR TÍPICO EQUIVALE A MIL VÍAS LÁCTEAS

A todos estos cuerpos extragalácticos se les conoce por el nombre de Núcleos Galácticos Activos, o AGN por sus siglas en inglés. Independientemente del brillo y de sus características peculiares, todos ellos tienen una cosa en común: que

el origen de semejante despliegue luminoso se produce en una zona pequeña. Además, algunos cuásares son potentes fuentes tanto en ondas de radio como en rayos gamma. ¿Cómo es posible que puedan emitir semejante cantidad de energía y en un rango muy amplio de longitudes de onda? ¿Y por qué algunas son potentes emisoras de radio y otras no? En un principio se pensó que podría deberse a explosiones de supernovas u otros fenómenos de naturaleza estelar, pero pronto se descartó esa idea pues la potencia de algunos núcleos activos alcanza mil billones de veces la luminosidad de nuestro Sol; ningún proceso estelar puede generar algo así de forma sostenida en el tiempo. A los astrónomos solo les quedaba plantear la hipótesis de que el núcleo debe contener algo muy inusual: ningún grupo de estrellas que pudiera producir tanta



Maarten Schmidt definió una de las leyes fundamentales que rigen la formación de estrellas en las galaxias.

radiación podría estar concentrado en una región tan pequeña.

Un tipo de objeto muy pequeño que puede emitir radiación intensa es el disco de acreción de un agujero negro. ¿Podría el centro de una galaxia activa contener un inmenso agujero negro? ¿Podría la radiación que observamos provenir del gas caliente de un disco de acreción que gira alrededor de dicho agujero? Este es precisamente el modelo de galaxias activas más popular entre los astrónomos. Según este modelo una galaxia activa tiene en su núcleo un agujero negro super-

AUNQUE LA MAYOR PARTE DE LA MASA ACABA CAYENDO EN EL AGUJERO NEGRO, PARTE DEL MATERIAL DEL DISCO DE ACRECIÓN SE EVAPORA

masivo que va acumulando materia a su alrededor, formando un disco de acreción tan grande como todo el sistema solar que gira furiosamente bajo la intensa atracción gravitatoria del agujero negro. El gas, acelerado a velocidades cercanas a la de la luz, se calienta hasta la incandescencia por las fuerzas de fricción que aparecen por el roce de la materia que orbita en el disco. Y aunque la mayor parte de la masa acaba cayendo en el agujero negro, parte del material del disco de acreción se evapora y escapa en dos chorros opuestos a lo largo de los polos del agujero canalizados por su campo magnético.

De este modo, el llamado modelo unificado de los núcleos activos de galaxias propone que, a pesar de la gran variedad de nombres y clasificaciones que reciben estos objetos —cuásares, blázares, radiogalaxias o galaxias Seyfert—, todos son manifestaciones del mismo fenómeno: un agujero negro supermasivo rodeado por un disco de acreción que alimenta el agujero y, además, todo ese sistema está igualmente rodeado por una rosquilla o dónut de materia que, en determinadas condiciones, puede llegar a enmascarar u ocultar la zona central. Por tanto, la cla-



NASA, ANDREW S. WILSON (UNIVERSITY OF MARYLAND)

Una galaxia Seyfert es una clase de galaxia cercana con una región central brillante que a menudo oscurece las estrellas. En la imagen, galaxia Circinus.

ve no está tanto en las diferencias internas que tengan los AGN, sino en el ángulo desde el que los observamos. Si nuestra línea de visión coincide con los chorros de materia expulsados a gran velocidad, percibimos una fuente extremadamente violenta a la que llamamos blázar. Si miramos desde una posición más abierta, vemos un cuásar, cuyo brillo delata la enorme energía liberada cerca del agujero negro. Cuando el anillo de polvo oculta la región central lo que detectamos es una radiogalaxia si tiene chorros activos, o una galaxia Seyfert si no los tiene.

Actualmente se conocen más de doscientos mil cuásares, todos con enormes desplazamientos al rojo que indican que se encuentran a miles de millones de años-luz de distancia. Eso significa que los observamos tal y como eran cuando el universo era joven. Y lo más importante, son testigos de los violentos procesos que sucedían entonces, porque para ser tan brillante a una distancia tan inmensa un objeto debe ser inmensamente luminoso: un cuásar típico equivale a mil vías lácteas.

Este hecho ha confundido a los astrónomos durante mucho tiempo, haciéndoles pensar que estábamos ante un objeto totalmente diferente, pero no es así. Los cuásares son, efectivamente, los núcleos activos de galaxias. Lo que los hace especiales es que en ellos el agujero negro supermasivo está en una fase de gran actividad, devorando enormes cantidades de gas y polvo. Ese proceso libera tal energía que el brillo del núcleo eclipsa por completo a la galaxia anfitriona, hasta el punto de que, desde nuestra perspectiva, parece que lo único que existe es un punto muy luminoso en el cielo.

SE PRODUJO UNA EXPLOSIÓN SEYFERT

Ahora bien, ¿por qué no vemos semejante actividad en galaxias cercanas? La juventud es la clave. Para mantener la luminosidad típica de los cuásares, el núcleo debe consumir una cantidad de materia del orden de tres veces la masa del Sol por día. Si el entorno no es capaz de suministrarle esa cantidad ingente de combustible, el disco de acreción de cada galaxia activa va cayendo hacia el agujero negro central y la actividad cesa: el cuásar se «apaga». Las galaxias cuyos núcleos alguna vez fueron cuásares activos las tenemos a nuestro alrededor, incluso también lo fuera nuestra Vía Láctea en sus tiempos jóvenes, pero al envejecer su actividad desapareció y solo queda como recuerdo de aquella época el enorme agujero negro central.

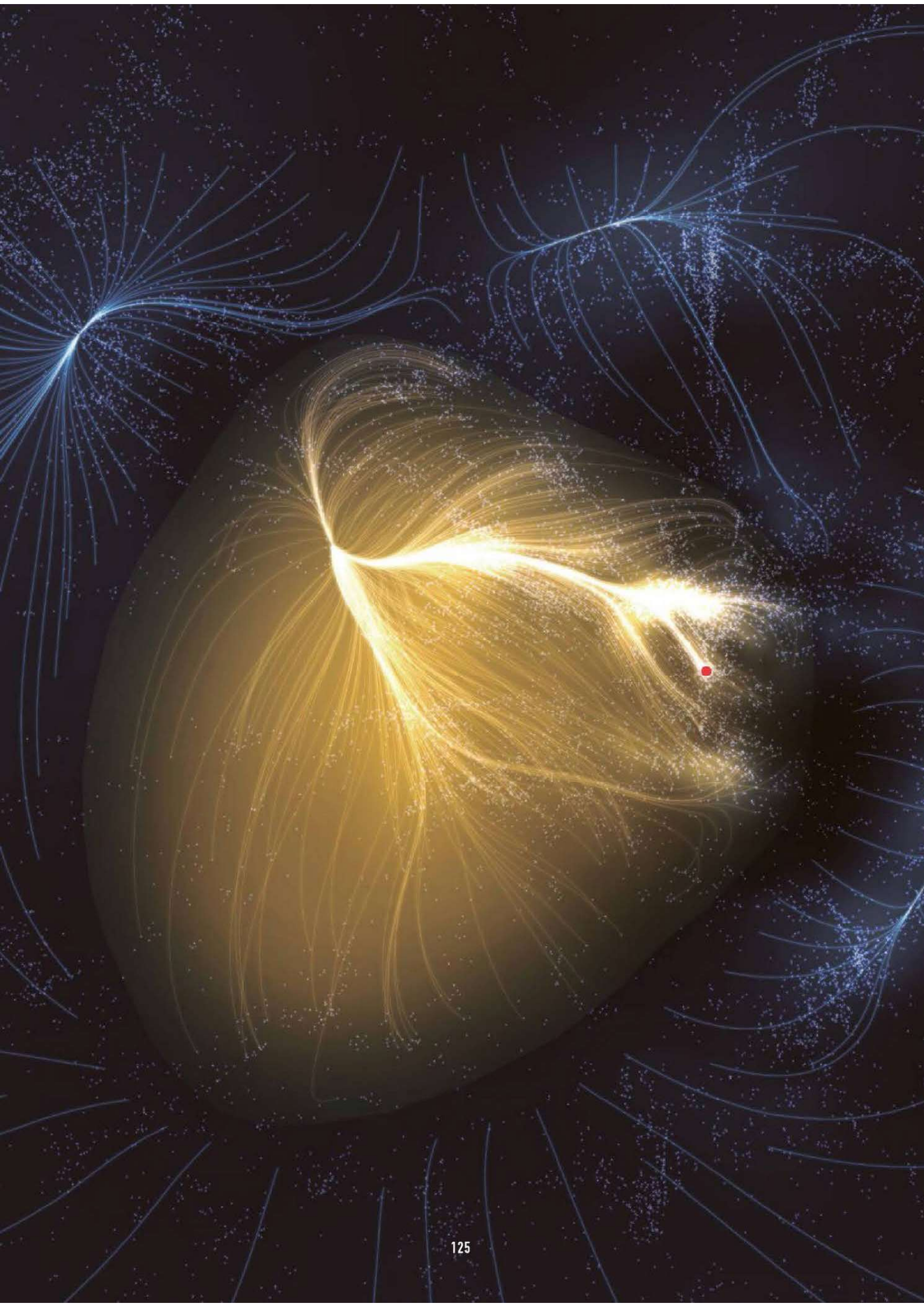
Sin embargo, el disco de acreción puede reabastecerse con materia de, al menos, dos fuentes. Por un lado, las estrellas de la galaxia pueden acercarse demasiado al agujero negro y ser destrozadas por sus fuerzas de marea. Sus restos caen al disco de acreción convirtiéndose en una nueva fuente de combustible. Por otro, las colisiones con galaxias vecinas añaden nuevo material a medida que la galaxia canibaliza a sus vecinas más pequeñas. Cada uno de estos eventos proporciona al disco de acreción un nuevo estallido de energía, lo que provoca que la galaxia vuelva brevemente a su tiempo de juventud, reviva y aumente su brillo.

Algo así pudo suceder a la Vía Láctea hace dos millones de años, cuando el superagujero negro lanzó una tremenda cantidad de radiación de alta energía al espacio, cien millones de veces más potente que su emisión actual: se produjo una explosión Seyfert. Quizá nuestros antepasados, allá en la sabana africana, vieran el foganazo... ■

Cúmulos, super cúmulos y murallas

Supercúmulo Laniakea (representado en amarillo), la estructura galáctica masiva que contiene nuestra Vía Láctea. Científicos de la Universidad de Hawái determinaron los límites de este supercúmulo al analizar las velocidades peculiares de más de 8000 galaxias cercanas.

ALBU



La mayoría del universo se encuentra más allá de la Vía Láctea. En la constelación de Andrómeda encontramos un tenue jirón de gas, visible a simple vista, que delata la existencia de otra Vía Láctea. La luz que vemos proviene de una galaxia espiral situada a 2,4 millones de años-luz y salió de allí mucho antes de que el ser humano se irguiera sobre la sabana africana. Más cerca de nosotros, a unos diez años-luz, se encuentra IC 342, una galaxia espiral que si no estuviera oculta por el gas y polvo que abunda en el ecuador de nuestra galaxia la veríamos a simple vista; es por eso que se la llama



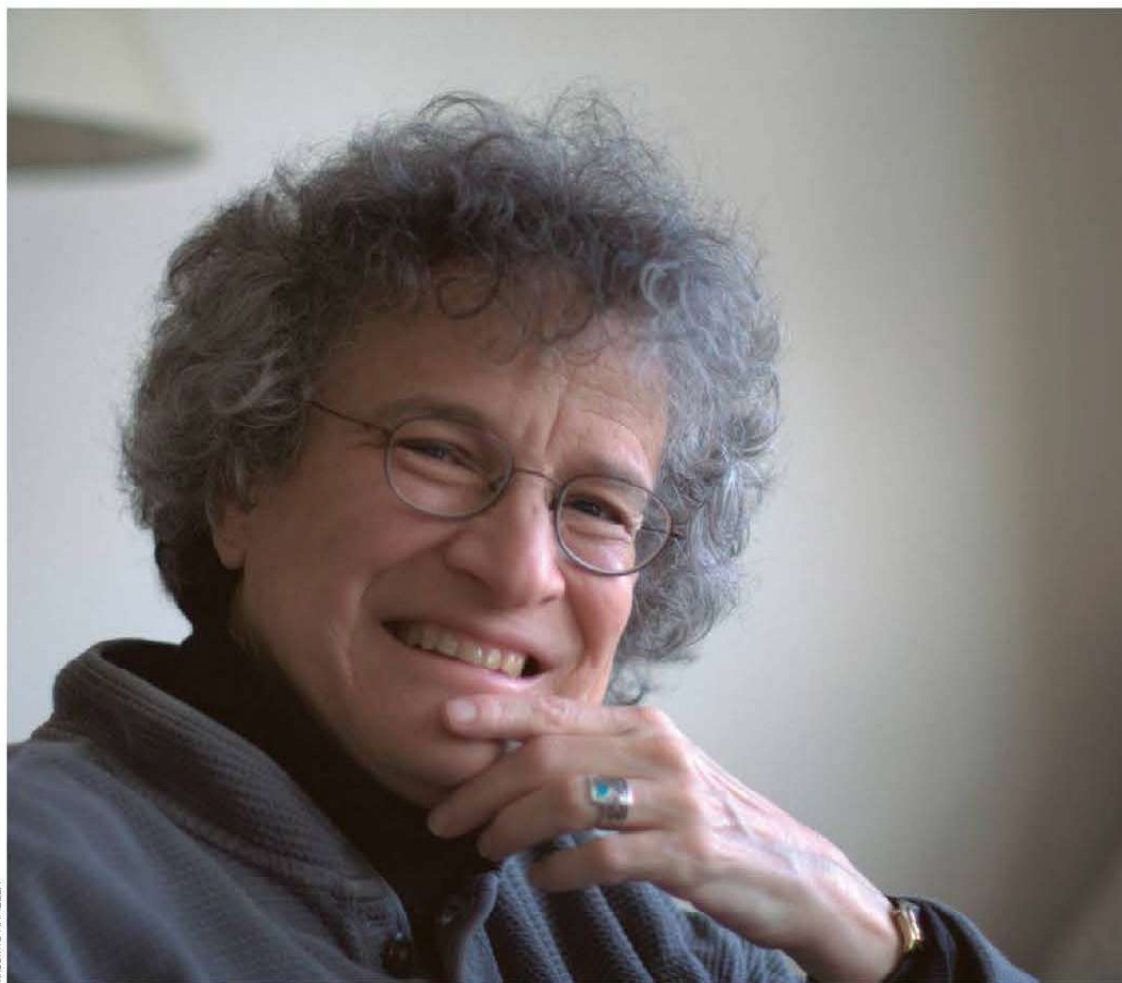
M79 es uno de los dos únicos cúmulos globulares de Messier que nuestra galaxia podría haber robado de otras galaxias.

la galaxia Escondida. Y en 1994 se descubrió la galaxia elíptica enana de Sagitario, justo al otro lado de la Vía Láctea: tiene un diámetro de 10 000 años-luz y se encuentra a 70 000 años-luz de la Tierra. Pero no es la más cercana. Ese título le corresponde a la galaxia enana del Can Mayor, a 25 000 años-luz de nosotros. Este es nuestro barrio galáctico. Junto con la Vía Láctea pertenecen a un cúmulo de galaxias de nombre poco inspirado, el Grupo Local, que contiene unas tres docenas de estos universos-isla. De entre todas ellas, Andrómeda es la más grande y brillante, seguida de cerca por la Vía Láctea; el resto, y posiblemente otras de las que no tenemos noticias, son más pequeñas: espirales enanas, irregulares y elípticas. Dentro de los estándares de los cúmulos de galaxias, nuestro Grupo Local es bastante mo-

desto: si apuntáramos a él con un telescopio situado a una distancia de 10 millones de años-luz, solo veríamos unas pocas galaxias. Los pequeños grupos como el nuestro son bastante comunes, como el del Escultor, con seis componentes, o el de M81, con ocho miembros conocidos.

¿CÓMO DIFERENCIAR UN CÚMULO DE OTRAS ESTRUCTURAS?

Pero nuestra pertenencia no termina en el Grupo Local. Hace mucho tiempo, antiguos astrónomos vieron en un grupo de estrellas al sur del mango de la Osa Mayor la figura de una mujer portando unas gavillas de trigo y la bautizaron como Virgo, la segunda constelación más grande del cielo. Allí se encuentra un cúmulo compuesto por más de 1500 de galaxias cuyo centro está a unos 54 millones de años-luz. Este cúmulo es el corazón de algo mucho más grande, que un astrónomo inconformista bautizó con el nombre del Supercúmulo Local (también conocido como supercúmulo de Virgo).



MASSIMO RANELLA

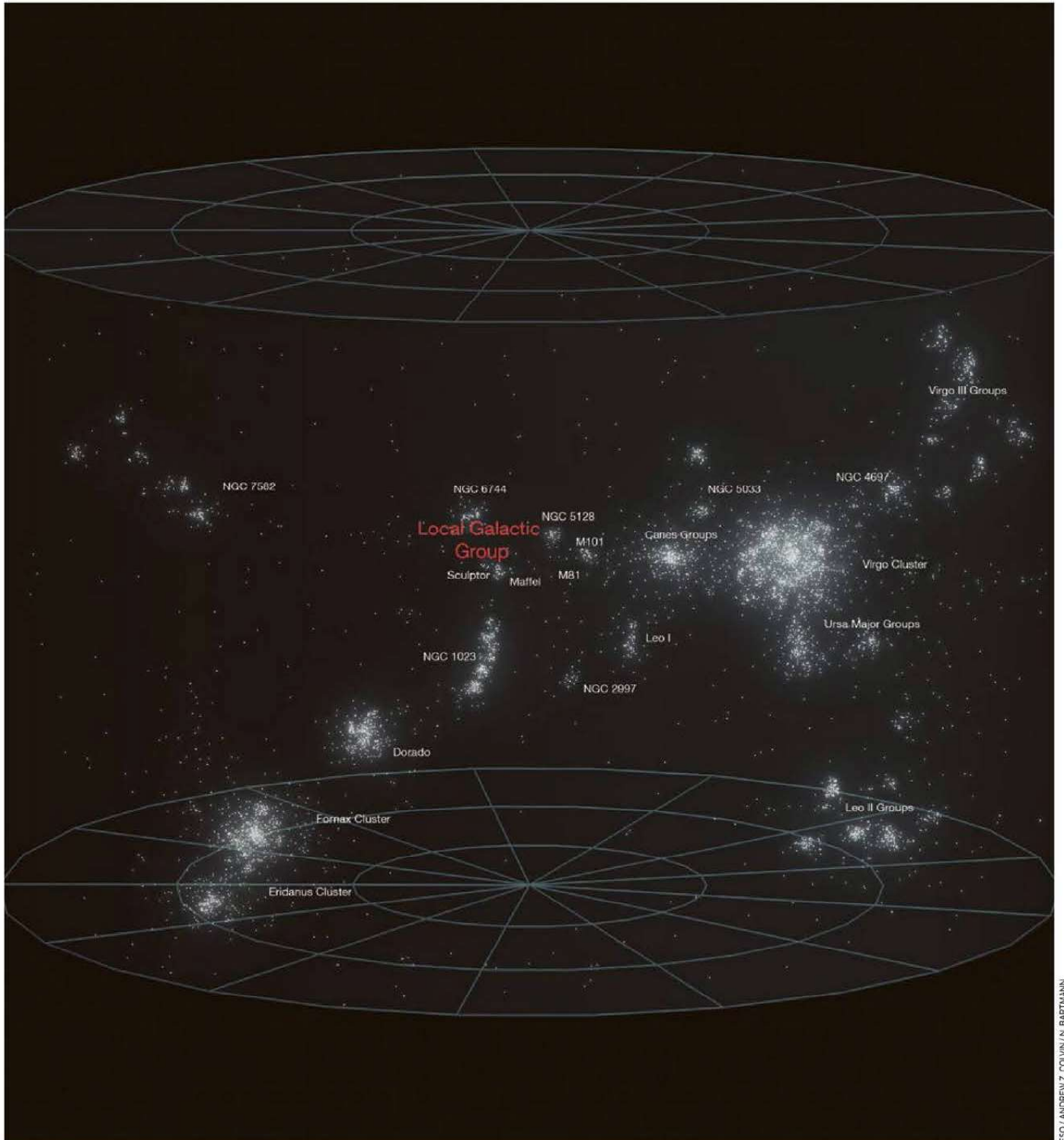
Dentro de los objetivos científicos de la Dra. Geller están descubrir la apariencia del universo y comprender cómo llegó a tener los patrones que observamos en la actualidad.

Pero no todo acaba ahí. En 2014 un grupo internacional de astrónomos dirigido por R. Brent Tully, de la Universidad de Hawái, amplió aún más nuestra pertenencia a la tribu cósmica. Su nombre es Laniakea, una palabra hawaiana que significa «cielo (*lani*) inconmensurable (*akea*)». Es una supermegaestructura: tiene un tamaño de 520 millones de años-luz, alberga más de 100 000 galaxias de tamaño parecido a la Vía Láctea —junto con un número indeterminado de otras más pequeñas— con una masa de más de mil billones de soles.

Este descubrimiento vuelve a poner de manifiesto la peculiar estructura a gran escala que tiene nuestro universo, que la astrofísica de Harvard Margaret Geller la describió con una frase memorable: «El universo local se parece a un fregadero lleno de agua con jabón de lavar los platos». No es una analogía descabellada.

EN 1994 SE DESCUBRIÓ LA GALAXIA ELÍPTICA ENANA DE SAGITARIO, JUSTO AL OTRO LADO DE LA VÍA LÁCTEA

UNO DE LOS PROBLEMAS DE LOS ASTRÓNOMOS ES DECIDIR CUÁNDO UN CONJUNTO DE CÚMULOS FORMA UN SUPERCÚMULO



Mapa del Grupo Local de galaxias con las principales estructuras galácticas en un radio de aproximadamente 10 millones de años-luz.

Pero vayamos por partes. Aunque la estructura cósmica es un continuo, con los límites entre los diferentes niveles de jerarquía no siempre claros, los astrofísicos han identificado cuatro niveles de estructuras mayores que las galaxias: grupos, cúmulos, supercúmulos y los agregados más grandes conocidos, complejo de supercúmulos o murallas. Los grupos son las estructuras más pequeñas. Tienen un tamaño de unos pocos millones de años-luz y constan de tres a seis galaxias de buen tamaño y de una a varias docenas de otras más pequeñas, bastantes de las cuales son satélites de las más grandes. Como hemos visto, el Grupo Local es un buen ejemplo de este tipo.

Por el contrario, los cúmulos suelen medir de 10 a 20 millones de años-luz de diámetro y contienen cientos o miles de galaxias —dependiendo si estamos en un cúmulo rico o pobre— y suelen tener dos formas: irregular y esférica. Los primeros tienen una forma algo dispersa, mientras que los segundos se parecen a las galaxias elípticas gigantes. Además, los cúmulos irregulares —como el de Virgo— tiene gran cantidad de galaxias espirales, los esféricos están dominados por galaxias elípticas y lenticulares. Son enormes, con un diámetro lineal de hasta 50 millones de años-luz y pueden contener hasta 10 000 galaxias, que se concentran hacia el centro del cúmulo.

Ahora bien, ¿cómo diferenciar un cúmulo de otras grandes estructuras? Porque el cúmulo es la mayor estructura cósmica que se encuentra ligada gravitacionalmente. Cualquier otra más grande está siendo estirada por la expansión cósmica, que aleja unas partes de otras. Paradójicamente, las galaxias son el componente que menos masa aportan al total del cúmulo, solo un uno por ciento, aunque es el único que emite en el espectro visible. Le sigue el gas intracúmulo, compuesto principalmente por hidrógeno y helio ionizado (esto es, átomos que han perdido parte o todos sus electrones) que da cuenta del 9 % de la masa total encerrada en el cúmulo. Calentado a una temperatura entre 10 y 100 millones de grados, sabemos que está ahí porque emite en la región de los rayos X. El 90 % restante de la masa del cúmulo está en forma de materia oscura de cuya existencia sabemos solo por el efecto gravitacional que ejerce sobre los componentes visibles del cúmulo.

¿EL SUPERCÚMULO ES ALGO INMUTABLE?

Por otro lado, distinguimos entre cúmulos y grupos por las velocidades orbitales de las galaxias que lo componen: en un grupo son bajas, del orden de 100 a 200 km/s, mientras que en los cúmulos son diez veces mayores. Esto es así porque la densidad de materia en los cúmulos es mayor que en los grupos: las galaxias en los cúmulos orbitan más rápido por la misma razón que el satélite de Urano Dione completa su órbita en solo 2,7 días, mientras que la Luna, atrapada en el pozo gravitacional de la Tierra, más débil que el del gigante gaseoso, lo hace en 27,3 días.

Si subimos en la escala nos encontramos con los supercúmulos, sistemas no ligados gravitatoriamente, lo que implica que resulta difícil definir las fronteras que separan unos de otros. Normalmente eso se hace mirando cómo está distribuida la materia, algo que, en el fondo, resulta demasiado subjetivo. Algunos astrónomos intentan establecer definiciones más objetivas, como medir el movi-

miento de las galaxias y así determinar quiénes son compañeros de viaje. Otros defienden que una determinada distribución de galaxias es un supercúmulo si algún día colapsará en único objeto. Según esta definición, Laniakaea no lo es, pues en un futuro lejano algunas de sus galaxias se dispersarán. ¿Quién tiene razón? Todo depende de lo que se desea medir, si los movimientos en conjunto

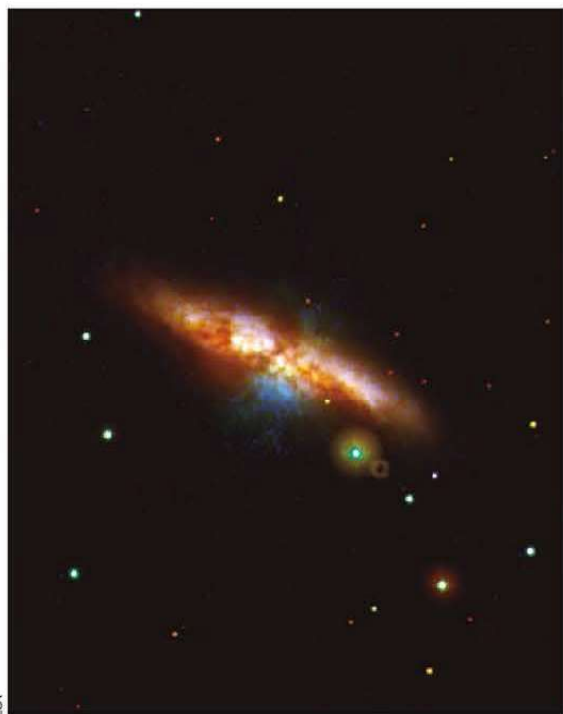


Imagen óptica y ultravioleta de Messier 82, también conocida como M82, la galaxia del Cigarro y NGC 3034.

de un grupo de galaxias o las que van a tener un mismo futuro. Claro que también hay que considerar si un supercúmulo es algo inmutable o si, por el contrario, está en continuo cambio: hoy puedes pertenecer a cierto supercúmulo pero mañana no, del mismo modo que un ser humano puede cambiar de nacionalidad. La cuestión sobre qué es un supercúmulo sigue abierta.

Sea como fuere, los supercúmulos miden típicamente unos 100 millones de años-luz de diámetro y contienen en torno a las decenas de miles de galaxias. Durante años se creyó que estas eran las estructuras más grandes, pero ahora sabemos que forman parte de estructuras aún mayores llamadas murallas u hojas, que pueden tener miles de millones de años-luz de tamaño. Esto significa que hablamos de más del 5 % del radio

del universo observable. Dentro de esas murallas nos encontramos con enormes vacíos, burbujas cósmicas de 300 millones de años-luz donde brillan por su ausencia las galaxias y los cúmulos. Curiosamente (o no tanto) los supercúmulos más densos se encuentran donde esas burbujas intersectan.

LA TIERRA NO ES EL CENTRO DEL SISTEMA SOLAR...

Una buena forma de entender esta estructura es mirar a nuestro entorno cósmico. Un buen lugar es hacerlo hacia la constelación de Virgo, el lugar donde encontramos a la concentración de galaxias brillantes más rica del cielo. Allí, a 60 millones de años-luz, se encuentra, a la sazón, el cúmulo de Virgo o Cúmulo

**LOS SUPERCÚMULOS MIDEN TÍPICAMENTE UNOS
100 MILLONES DE AÑOS-LUZ DE DIÁMETRO Y
CONTIENEN DECENAS DE MILES DE GALAXIAS**

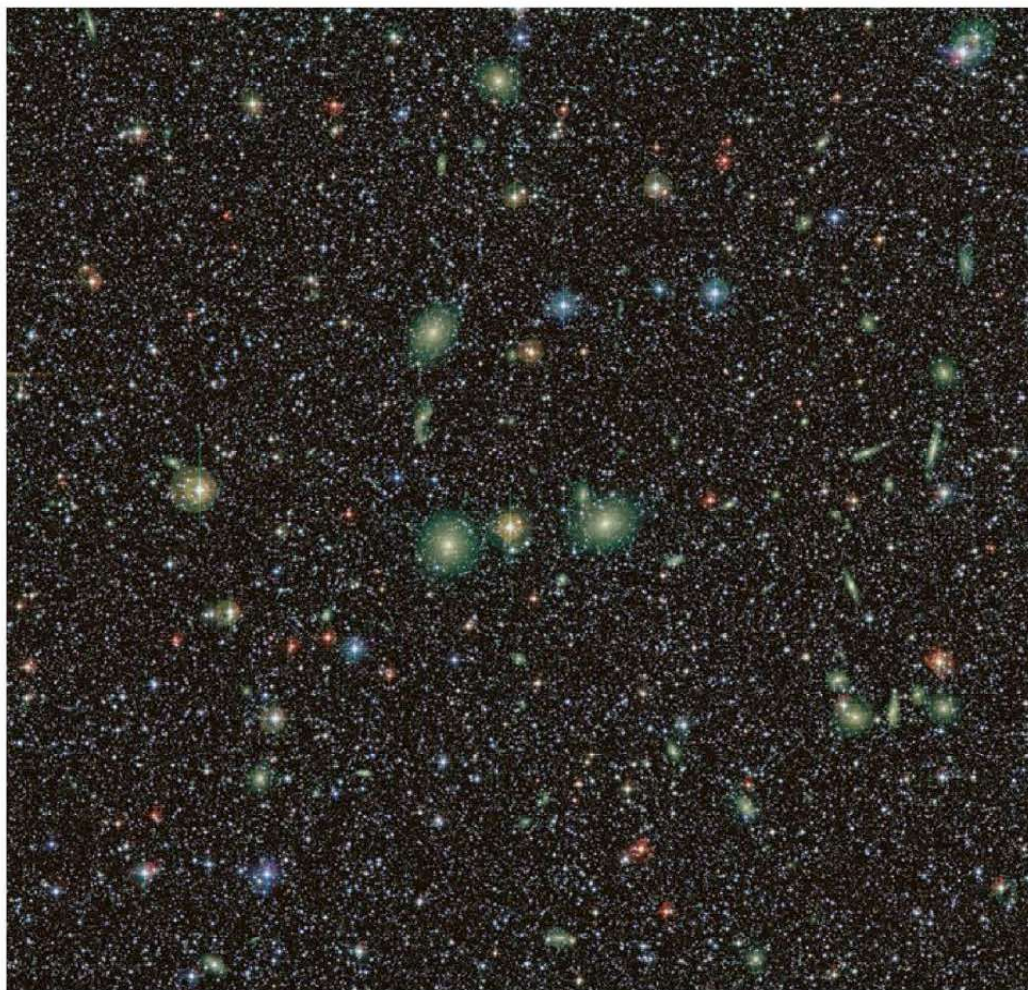


Cúmulo de galaxias masivo llamado PSZ2 G138.61-10.84, a unos seis mil millones de años-luz de distancia. Imagen tomada por el telescopio espacial *Hubble*.

Local, una agrupación irregular de 1200 galaxias brillantes —y, sin duda, de varios miles de galaxias enanas que somos incapaces de ver con nuestros telescopios—.

El camino que lleva de la Vía Láctea al cúmulo de Virgo es como una de las galerías del Prado de galaxias pintorescas. A lo largo de esa línea encontramos un objeto sorprendente, Centaurus A, una galaxia elíptica que se está convirtiendo en una galaxia espiral; o M81, uno de los mejores ejemplos del diseño espiral en una galaxia y cuyo satélite, la galaxia M82, o galaxia del Cigarro, es el prototipo de galaxia con brote estelar causado por una interacción gravitatoria que tuvo lugar entre 200 y 500 millones de años con M81; o la enorme M101, la Galaxia del Molinete, una de las más grandes conocidas, con un tamaño el doble de la nuestra. ¿Por qué tenemos semejante colección de preciosidades camino al Cúmulo de Virgo? Porque posee un vasto halo de galaxias —análogo a los halos de estrellas y cúmulos globulares que rodean las mayores galaxias— que a su vez se fusionan en un supercúmulo, el Supercúmulo de Virgo, un trozo del cual se extiende hasta nuestra ubicación y un poco más allá. Este supercúmulo contiene, al menos, once cúmulos en su centro y quizá más de cincuenta en el halo.

Visto lo visto, queda clara nuestra posición arrabalera en el universo. Ni la Tierra es el centro del sistema solar —como nos dijeron Copérnico y, siglos antes, Aristarco de Samos—, ni el sistema solar se encuentra cerca del centro galáctico —como demostró Harlow Shapley—. La Vía Láctea no es



Campo estelar de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ en la constelación de Norma, en dirección al Gran Atractor. La imagen muestra estrellas de la Vía Láctea en primer plano.

la galaxia dominante del Cúmulo Local, que se encuentra hacia los límites exteriores del Supercúmulo de Virgo. Pero no todo termina aquí. Muchos supercúmulos parecen estar conectados por puentes de galaxias. El Supercúmulo de Hydra-Centauro-Pavo, situado a un par de centenares de millones de años-luz, está conectado con el de Virgo.

Como hemos visto, uno de los grandes problemas de los astrónomos extragalácticos es decidir cuándo un conjunto de cúmulos forman un supercúmulo. Hasta hace pocos años el de Virgo era un objeto distinto al supercúmulo de Acuario, una hebra de 14 cúmulos ricos en galaxias que se extiende a lo largo de más de 1000 millones de años-luz (a lo que debemos añadir 31 cúmulos más pobres, de menos de 50 galaxias por cúmulo) que llenan y extienden ese filamento a una distancia que muy bien podría llegar a los 2000 millones de años-luz. Sin embargo, desde 2014 los supercúmulos de Virgo y Acuario, más el de Hydra-Centauro y el de Pavo-Hindus, quedan englobados en una estructura aún mayor, el supercúmulo Laniakea: con un tamaño de 520 millones de años-luz, alberga más de 100 000 galaxias de tamaño parecido a la Vía Láctea, junto a un número indeterminado de otras galaxias más pequeñas. Nosotros nos encontramos en los arrabales de Laniakea.

Todas estas observaciones nos conducen a dos conclusiones: que hay grandes estructuras en el universo y que no está muy claro decidir cuáles son. La primera

LOS ASTRÓNOMOS HAN DESCUBIERTO EL TIRÓN GRAVITACIONAL DE ALGO QUE HAN LLAMADO EL GRAN ATRACTOR

es sencilla y nos ayuda a entender cómo es la jerarquía del universo: las estrellas se agrupan en galaxias y estas en cúmulos. Curiosamente estos no se han formado en regiones solitarias, sino en compañía de otros. De hecho, muchos de ellos parecen extenderse hasta el siguiente cúmulo del mismo modo que las ciudades se extienden hasta unirse con otras. De este modo, centenares de galaxias forman puentes o finas hojas entre cúmulos creando estructuras más grandes: los supercúmulos, que contienen al menos una masa de mil billones de soles.

Si todo fuera así sería muy sencillo, pero el universo siempre tiene un as en la manga para acabar de enmarañarlo todo. Sin tener que irnos muy lejos, todo nuestro universo local, compuesto por 1000 billones de soles, se dirige hacia un punto situado en la dirección de las constelaciones de Hidra y Centauro a una velocidad de 600 km/s, más de dos millones de kilómetros por hora. Allí se encuentra el Gran Atractor, una estructura que encierra una masa de 10 000 billones de soles y cuyo centro se encuentra a 250 millones de años-luz de nosotros. Pero la duda se ha instalado en el corazón de los astrofísicos extragalácticos, pues no tienen claro si nos dirigimos hacia ese Gran Atractor o hacia otra megaestructura mayor que se encuentra detrás de él: la concentración de Shapley, un conjunto de 17 cúmulos de galaxias a unos 650 millones de años-luz. Y no solo eso, sino que rizando el rizo otros astrónomos piensan que puede haber algo todavía más masivo detrás de Shapley, ya que según ellos el movimiento que tiene el Grupo Local no se puede explicar invocando solo el tirón gravitacional del Gran Atractor y el supercúmulo de Shapley. En este estado de incertidumbre llegó Laniakea, que ha convertido al Gran Atractor en el centro de este supercúmulo.

NO DEBERÍA, PERO AHÍ ESTÁ

Las sorpresas no acaban aquí. Mirando hacia el otro lado del Gran Atractor, a 250 millones de años-luz de aquí, se encuentra la Muralla de Coma o Gran Muralla CfA2, un filamento de galaxias a 200 millones de años-luz y cuyas dimensiones son 500 millones años-luz de larga, 330 millones de ancha y «solo» 15 millones de años-luz de grosor. Pero no es la pared cósmica más grande: ahí tenemos la Gran Muralla de Sloan, de 1380 millones de años-luz de longitud y situada a 1000 millones de nosotros. Con un diámetro de 1/60 del universo visible. ¿No hay nada más grande? Nadie podía creérselo pero en 2013 se encontró la Gran Muralla de Hércules-Corona Boreal, un verdadero monstruo: mide más de 10 000 millones de años-luz de largo, 7200 millones de años-luz de ancho y 700 millones de grosor. ¿Cómo puede existir una estructura que ocupe, por su lado más largo, la novena parte del universo visible? Peor aún, ¿cómo pudo formarse tan solo 3000 millones de años después de la Gran Explosión? No hay astrónomo capaz de explicar su existencia. Teóricamente no debería estar ahí, pero ahí está. ■

La gran revolución cosmo lógica

A la derecha podemos ver cómo se muestra la nebulosa espiral Messier-81, ubicada cerca de la Osa Mayor en la constelación de la Osa Mayor, a través del telescopio *Hale*.

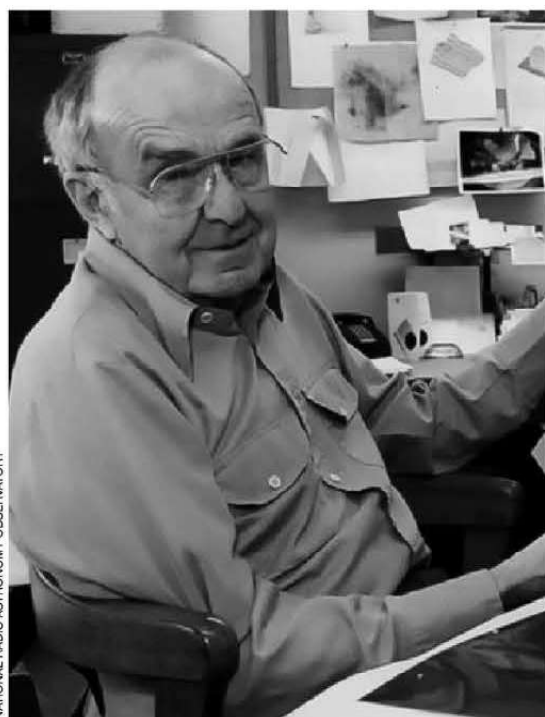
NASA, ESA, Y JEFFERSON
SMITHSONIAN CENTRE FOR ASTROPHYSICS



En 1970 la revista *Physics Today* publicaba un artículo del gran Allan Sandage, Don Cosmología, el sucesor de Edwin Hubble —descubridor de la expansión del universo en 1929— en el observatorio de Monte Wilson. Su título definía concisa y precisamente lo que era la cosmología: «La búsqueda de dos números». Esos números son la constante de Hubble, H_0 , y el parámetro de deceleración, q_0 . Determinar su valor no es empresa fácil. Los cosmólogos llevan intentándolo casi un siglo.

LA CONSTANTE DE HUBBLE

En el centro del Estado de Colorado, donde la nieve se arremolina por la cordi-



El estadounidense Allan Rex Sandage fue uno de los cosmólogos observacionales más influyentes del siglo xx.

llera Sawatch, en las Rocosas, un puñado de físicos y cosmólogos se reúnen todos los años en la turística ciudad de Aspen. Allí la nieve se arrastra sobre los tejados planos de una serie de pequeños edificios de cedro que albergan el Centro de Física, mientras los científicos, sentados en pupitres y con ropa de esquiar, discuten sobre el origen y evolución del universo. Curiosamente, durante años uno de los puntales de la comunidad de cosmólogos de Aspen fue Maurice, el bajito y alegre chef francés que se ocupaba de alimentarlos y empezaba todas sus recetas con 120 gramos de mantequilla. El universo, por su parte, comenzó con una gran explosión, pero mientras todos los cosmólogos sabían cuándo debían acudir al comedor, ninguno podía decir con certeza cuándo nació el universo. ¿Por qué?

Se puede calcular la edad del universo del mismo modo que conociendo la posición y velocidad de una

piedra somos capaces de saber cuándo la soltaron de la mano. Para el universo basta con estimar su velocidad de expansión, que viene especificada por la constante de Hubble. Aunque viene expresada en unas curiosas unidades (kilómetros por segundo y por megaparsec), su inversa es la edad del universo. Y aquí está la

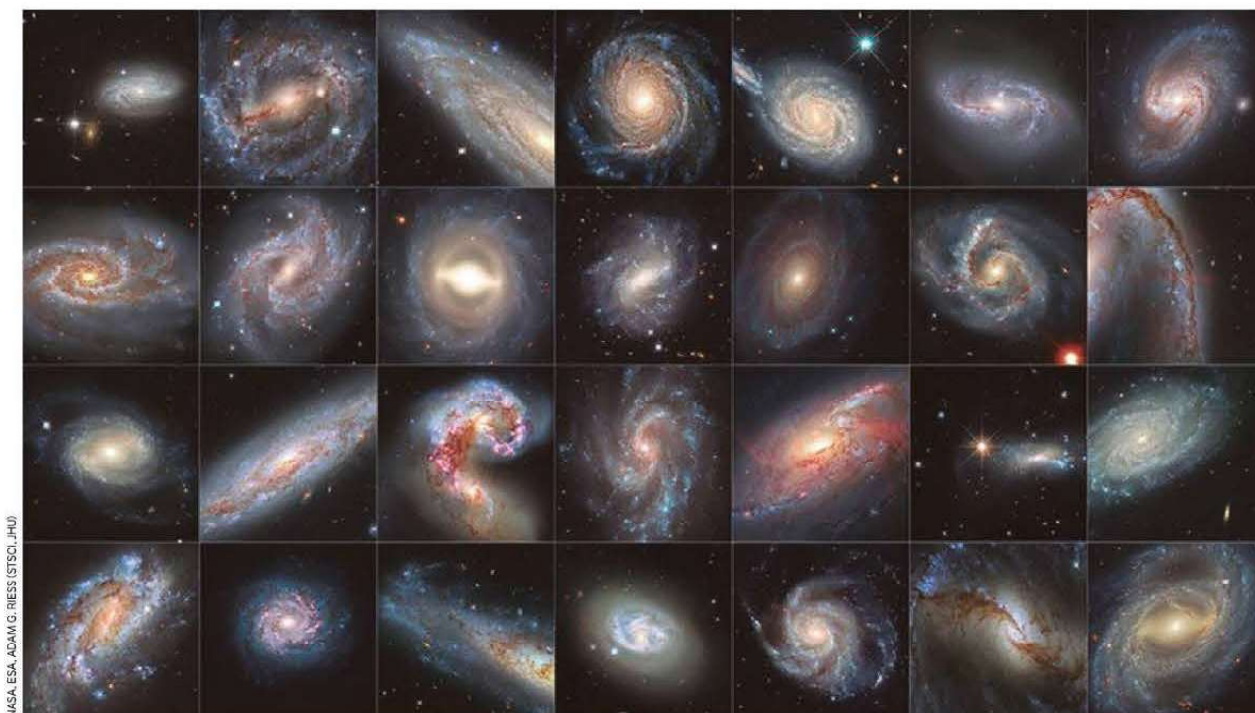
LOS RESULTADOS DE HIGH-Z Y SCP NOS DIJERON QUE EL UNIVERSO NO SE ESTABA FRENANDO, SINO ACELERANDO

complicación. Hace casi un siglo los cosmólogos estaban divididos en dos bandos: aquellos que pensaban que el universo se expande relativamente rápido, con un valor para la constante de 100, y aquellos que favorecían una expansión lenta, con un valor de 50. Esta era una pelea repleta de puyas, enfados y fina ironía. «Vale 50, al margen de lo que ellos midan», dijo en cierta ocasión «SuperHubble» Sandage. «¿Lo ha dicho una zarza ardiente?», le contestaron. «Un ministro baptista, pero no reveló sus fuentes», replicó Sandage.

En estas estaban cuando en 1990 se lanzó el telescopio espacial *Hubble*. Uno de los proyectos clave era zanjar de una vez por todas el debate midiendo la distancia de 31 galaxias espirales lejanas. Demasiadas esperanzas para una conclusión final que recuerda la sentencia del viejo rey Salomón: la constante de Hubble vale 74. El universo tiene, por tanto, algo más de trece mil millones de años. Pero la polémica no ha terminado. Las últimas mediciones nos revelan cómo uno de los más importantes números de la cosmología todavía sufre de importantes incertidumbres.

En julio de 2019, se calculó la constante de Hubble a partir de la fusión de dos estrellas de neutrones: 73,3. Ese mismo julio, usando los datos del Hubble para observar gigantes rojas salía que era de 69,8. En julio de 2023, se obtuvo una estimación independiente de la constante de Hubble a partir de la kilonova AT-2017gfo, el resplandor óptico de la fusión de una estrella de neutrones. El valor de la constante de Hubble salió 67.

La cuestión es tan peliaguda que hasta utilizando un mismo instrumento las medidas difieren significativamente. Por ejemplo, veamos la misión Planck, un observatorio espacial de la ESA que se lanzó en 2009 para mapear con gran precisión la radiación de fondo de microondas. Una medición «temprana» publicada en 2018 dio un valor de 67,4 a la constante de Hubble pero las «tardías»



Sobre estas líneas, montaje con varias imágenes tomadas por el telescopio espacial *Hubble* de la NASA donde se muestran galaxias que albergan cefeidas y supernovas.

salió 74,03, un valor confirmado por el telescopio espacial *James Webb* en 2023. Aunque vamos afinando su valor, la constante de Hubble sigue flotando en el limbo entre 74 y 65. Eso sí, la mayoría de los astrónomos creen que el valor real se encuentra más cerca del primero que del segundo.

EL UNIVERSO, ¿ACELERA O DECELERA?

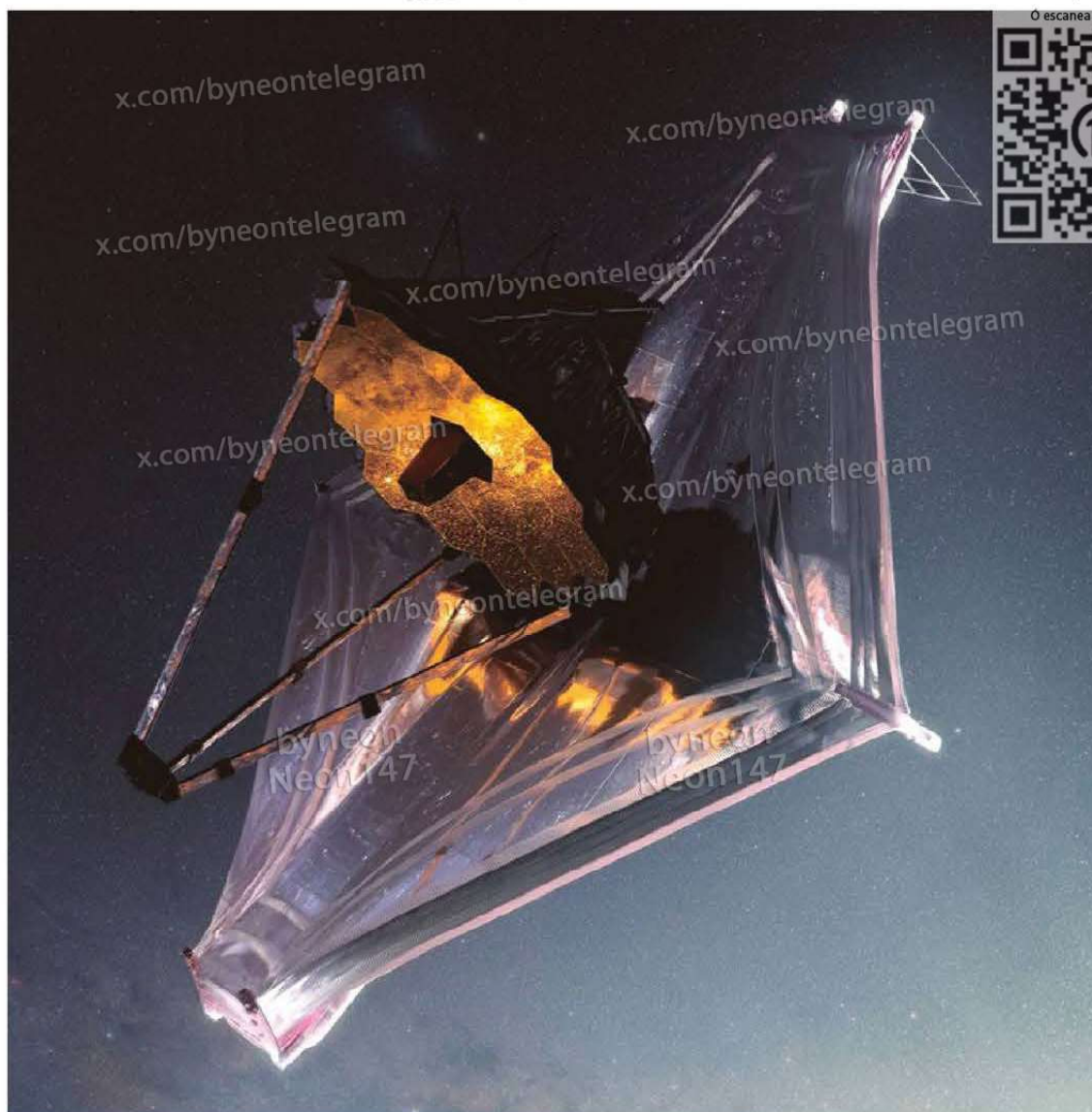
Si la medición de la velocidad de la expansión del universo da semejantes quebraderos de cabeza, hacer lo propio con sus cambios puede parecer una empresa imposible. El universo se está expandiendo, pero ¿acelera o decelera? Resolver este misterio requiere medir el segundo número, el parámetro de deceleración q_0 .

Hace unos años quien quisiera hacerlo debía pesar la materia que contiene todo el universo. Si solo fuera realizar un mero conteo de estrellas, nebulosas y galaxias ya lo hubiéramos obtenido. Ahora bien, Einstein dijo que «la naturaleza es sutil,

ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

O escanea el código QR:



El telescopio espacial *James Webb* es el observatorio espacial más avanzado. Su espejo compuesto de 18 segmentos funciona como un único reflector gigante de 6,5 metros.

LA «ENERGÍA DEL VACÍO» TIENE UN EFECTO SOBRE EL UNIVERSO PROPORCIONÁNDOLE UN EMPUJÓN ADICIONAL A LA EXPANSIÓN

pero no maliciosa», pero en este caso hay que reconocer que se ha pasado de pillina. Observando la rotación de las galaxias espirales y los movimientos internos en los cúmulos de galaxias los astrónomos saben que gran parte del universo se encuentra en forma de materia oscura, que no se ve. Sin embargo, en la década de 1990 hubo motivos para la esperanza gracias a unos peculiares objetos estelares llamados supernovas Tipo Ia. Su brillo es tan uniforme que se utilizan como candelas estándar para medir la distancia a la que se encuentran galaxias muy lejanas. Y a ello se dedicaron dos equipos internacionales: el High-Z Supernova Search Team (High-Z) y el Supernova Cosmology Project (SCP). A estos astrónomos lo que realmente les preocupaba era su escasez: este tipo de supernovas solo aparecen en una galaxia una vez cada 100 años. No imaginaban lo que se les venía encima.

Determinar el valor del parámetro de deceleración era, además, una prueba del nueve para el modelo cosmológico comúnmente aceptado, que no decía nada sobre qué valor debe tomar la constante de Hubble pero sí sobre el parámetro de deceleración: debía ser 0,5. Desastre. Los resultados de High-Z y SCP nos dijeron que su valor era en realidad más bajo y, por tanto, que el universo no estaba frenando, sino acelerando.

LA MECÁNICA CUÁNTICA

Los cosmólogos tenían que resolver un importante problema. La teoría cosmológica estándar predecía que la densidad de materia del universo era justo el valor crítico que separa un universo que colapsa bajo su propia gravedad de otro que se expande indefinidamente. Pero las observaciones de las supernovas implicaban una densidad de materia negativa, algo ridículo. Ante semejante desastre los cosmólogos no se amilanaron. De hecho, son unos personajes muy flexibles y decidieron introducir un ente sorprendente y tan imposible de creer como lo era el éter que llenaba el espacio decimonónico: la energía del vacío. Esto nos lleva directamente a la física de lo muy pequeño, a la mecánica cuántica. Según el famoso principio de incertidumbre, el vacío —entendido como ausencia de materia y energía— no existe. En realidad es un hervidero de partículas que aparecen y desaparecen en menos tiempo que dura un suspiro. La cuestión es que esta «energía del vacío» tiene un efecto visible sobre el universo, proporcionándole un empujón adicional a la expansión.

Teniendo en cuenta este nuevo término las observaciones de los dos equipos cazadores de supernovas nos mostraron un universo completamente desconocido hasta ahora, donde la «energía del vacío» es de dos a tres veces mayor que la encerrada en la materia ordinaria, los átomos de los que estamos hechos. Como dijo el biólogo y genetista John B. S. Haldane, «sospecho que el universo no es más raro de lo que suponemos, sino más raro de lo que podemos suponer». ■



Universo OS CU ro

Cúmulo de Perseo observado desde los telescopios *Chandra* (NASA), *XMM-Newton* (ESA) y *Hitomi* (Japón). La foto muestra el gas caliente intracúmulo que emite rayos X (púrpura y rosa) y revela la estructura a gran escala del cúmulo y las ondas de choque generadas por el agujero negro central.

NASA/CXC/FABIAN

El universo es enorme, a una escala que nadie es capaz de experimentar. En realidad, nadie sabe lo grande que es; lo que podemos ver es un volumen de alrededor 91 mil millones de años-luz de diámetro que contiene miles de millones de galaxias, la mayoría con miles de millones de estrellas. Son números que llegan a marear a cualquiera, pero esa grandeza del universo quedó como algo insignificante ante los dos descubrimientos más importantes de la astrofísica del siglo pasado y que han significado que lo que pensábamos que era todo, tan solo es un 5 % de la realidad.

LA MATERIA OSCURA

En 1933 Fritz Zwicky estaba a punto de revolucionar la astronomía de una forma que ni él podía imaginar. Y decir eso de este astrónomo de origen búlgaro es decir mucho: a él le debemos las supernovas, las estrellas de neutrones y las lentes gravitacionales. Para sus colegas sus predicciones eran poco más que especulaciones sin fundamento, simples desvaríos. La opinión en buena parte estaba sustentada por su carácter excéntrico, arrogante, obstinado y autoritario; calificaba a las revistas profesionales astronómicas como «basura inútil» y de sus colegas dijo una vez que eran «unos bastardos esféricos. No importa cómo los mires, son solo unos bastardos». Quizá por ello, y a pesar de sus enormes contribuciones a la astronomía, Zwicky sigue siendo prácticamente desconocido para el gran público.

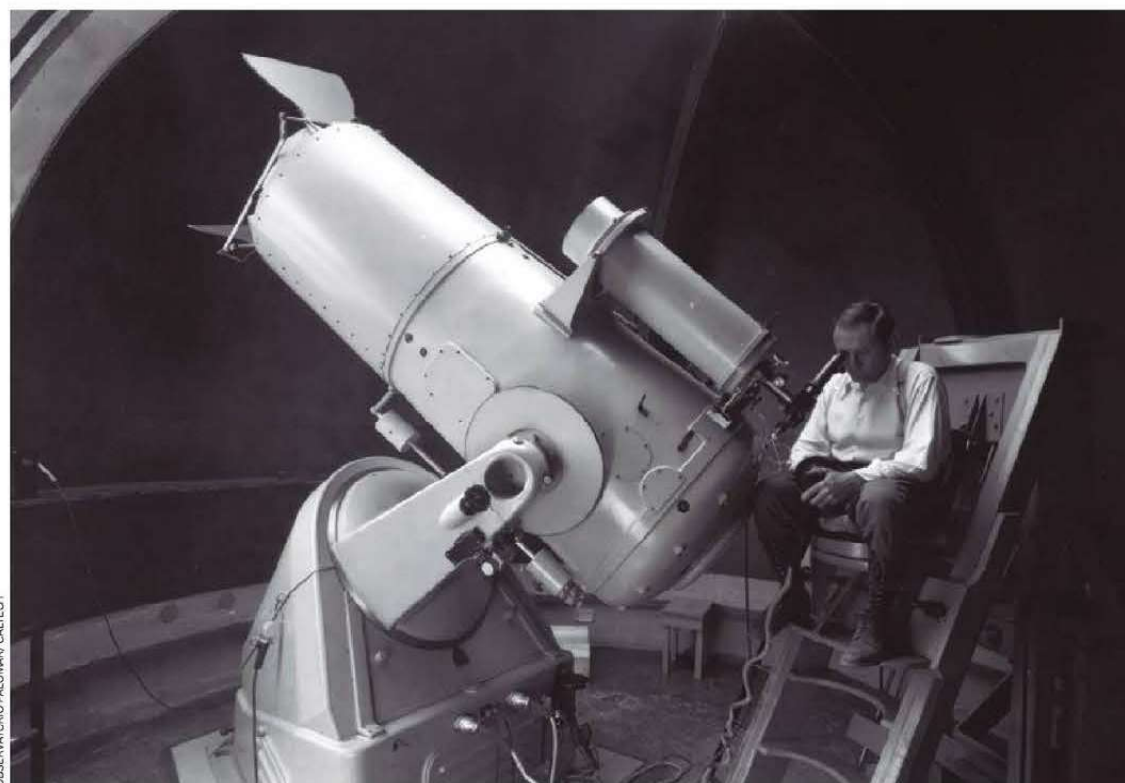
Aquel año decidió estudiar el cúmulo de galaxias más cercano a la Vía Láctea. Situado en la constelación de Coma Berenices, se encuentra a 320 millones de años-luz de nosotros y contiene más de 1000 galaxias que se mueven a velocidades altísimas, del orden de los mil kilómetros por segundo. Zwicky quería pesar el cúmulo y para ello calculó, a partir de las velocidades de las galaxias que lo componen, qué masa mínima debería tener retenerlas y que no se hubiera disgregado ya. Luego, calculó su masa por un método más directo: a partir del brillo de las galaxias. Obviamente no iban a salir cantidades iguales —hay materia que no vemos en forma de nubes oscuras, planetas...— pero sí parecidas. Pero, para su sorpresa, encontró que el cúmulo de Coma debía albergar mucha más materia de la que se podía ver en forma de estrellas y nebulosas. Zwicky llamó a esa masa oculta «dunkle Materie», materia oscura.

En 1937, a Zwicky se le ocurrió otra forma de buscar esa «masa perdida» utilizando la relatividad general de Einstein. Si por casualidad una galaxia masiva se encuentra en la línea de visión entre nosotros y una galaxia distante, podría actuar como una «lente gravitacional», deformando el espacio circundante para magnificar, distorsionar e incluso hacer aparecer múltiples imágenes de la galaxia de fondo. Zwicky predijo que las galaxias masivas distorsionarían los rayos de luz de los objetos de fondo y que esa distorsión podría usarse para «pesar»

**PARA LOS COLEGAS DE FRITZ ZWICKY,
SUS PREDICCIONES ERAN POCO MÁS QUE
ESPECULACIONES SIN FUNDAMENTO**

esas lentes galácticas. A sus colegas seguramente se les escapó una risita y con un ademán de la mano la despreciaron como otra de las veleidades intelectuales de este astrónomo de carácter insoportable. Pero en 1979, cinco años después de su muerte, se descubrió la primera de esas lentes gravitacionales. Desde entonces es una de las técnicas que usan los astrónomos para medir los parámetros cosmológicos del universo y para revelar objetos distantes que de otro modo serían demasiado débiles para verlos.

La masa perdida de Zwicky durmió el sueño de los justos durante casi medio siglo hasta que en 1973 Jeremiah Ostriker y James Peebles calcularon que las galaxias espirales debían estar siendo estabilizadas por un halo con mucha masa. De hecho, según sus cálculos, el halo debía tener, como mínimo, la misma masa que el disco galáctico... y no había estrellas suficientes en el halo para justificar tanta masa. Pero por entonces la moda astronómica del momento eran los cuásares y nadie prestó atención a este enigma. Nadie excepto una joven astrofísica, Vera Rubin, que decidió investigar cómo rotaban las galaxias espirales. ¿Por qué? Porque con ello podemos calcular su masa gracias a las inmutables leyes de la mecánica celeste, que dicen que la velocidad de rotación de una estrella alrededor del centro depende de la cantidad de masa encerrada por el perímetro de su órbita. Si lo aplicamos a la órbita del Sol encontramos que la masa de la Vía Láctea es aproximadamente cien mil millones de masas solares. Las medidas de luminosidad también sugieren que hay ese número de estrellas en nuestra galaxia, si cada una de ellas, en promedio, brilla como nuestro Sol. Como estamos en las afueras de la galaxia, es natural que ambos números concuerden.



OBSERVATORIO PALOMAR/ CALTECH

Fritz Zwicky observa a través del telescopio *Schmidt* en 1936. Al astrónomo suizo de origen búlgaro le debemos las supernovas, las estrellas de neutrones y las lentes gravitacionales.

Pero ¿y si hacemos lo mismo con objetos que se encuentran más lejos, como por ejemplo las grandes nubes de monóxido de carbono o los cúmulos globulares, grupos de estrellas que se encuentran en el halo que rodea la galaxia? ¿O con nuestras galaxias satélite, las Nubes de Magallanes? Aquí la predicción de la mecánica celeste se desmorona. Si, como suponemos, toda la masa de la Vía Láctea se encuentra por dentro de la órbita del Sol, la velocidad de cualquier objeto exterior debería disminuir cuanto más lejos se encuentre del centro galáctico (pasa lo mismo con los planetas: su velocidad de traslación disminuye a medida que se alejan del Sol). Pero Rubin descubrió que todos los objetos astronómicos situados en la parte más exterior de la galaxia orbitan a la misma velocidad, independientemente de dónde se encuentren. La única explicación, razonó Rubin, es que existe una esfera de materia invisible que envuelve la galaxia; una masa diez veces mayor que la de toda la masa visible.

¿CUÁNTA MATERIA OSCURA HAY EN EL UNIVERSO?

Pero hay una evidencia más directa de la existencia de materia oscura, y proviene del llamado Cúmulo Bala (Bullet Cluster). Este cúmulo es resultado de la colisión entre dos de ellos: uno grande, con una masa de 2000 billones de soles, y otro con una masa unas 30 veces menor. El choque comenzó hace 100 millones de años (pues aún no ha terminado) a una velocidad muy alta (5000 km/s). Estudiando la distribución de masas de esta «supercolisión» los astrofísicos se encontraron con algo asombroso: una masa de gas hidrógeno muy caliente se encuentra en el centro del nuevo cúmulo y, simétricamente a ambos lados, aparecen dos concentraciones que contienen la mayor parte de la masa de los cúmulos iniciales. Pero al contrario que la masa de gas central, estas no emiten ningún

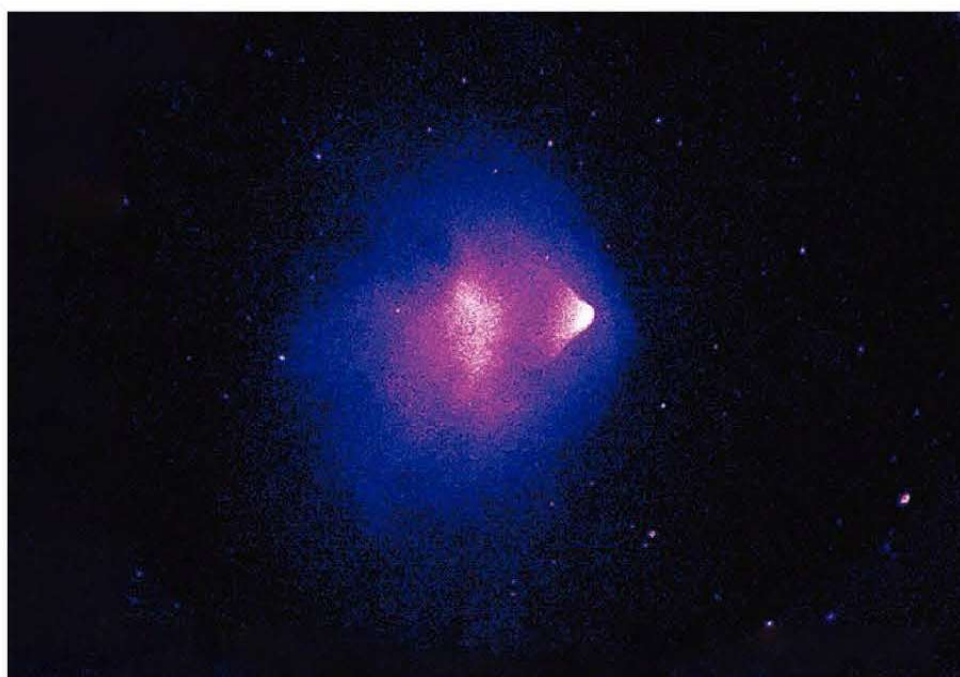


Imagen del Cúmulo Bala (1E0657-56) tomada por el Observatorio de rayos X *Chandra*. Este cúmulo se ha convertido en la evidencia de la existencia de materia oscura.

RUBIN DESCUBRIÓ QUE LOS OBJETOS ASTRONÓMICOS QUE ESTÁN EN LA PARTE MÁS EXTERIOR ORBITAN A LA MISMA VELOCIDAD

tipo de radiación: sabemos que están ahí porque provocan un efecto de lente gravitacional. Eso significa que el gas (la materia visible) se ha separado de «algo» que concentra la mayor parte de la masa de los cúmulos y que no podemos ver, la materia oscura. Más aún: mientras que el gas de cada uno de los cúmulos ha interactuado formando una gran nube, no ha hecho lo propio la materia oscura. Esto apunta a una nueva peculiar característica: la materia oscura no interacciona ni con la materia ordinaria ni con ella misma.

¿Cuánta materia oscura hay en el universo? Nuestras estimaciones actuales indican que el 85 % de la masa del universo. Por lo tanto, la materia que conocemos y entendemos, la que podemos

tocar y ver en la Tierra (una silla, un árbol, una roca), representa solo el 15 % de toda la materia existente en el universo. Ahora bien, ¿qué es esa materia oscura? La respuesta corta es que no tenemos ni idea. En un principio se pensó que podía ser materia ordinaria en forma de estrellas enanas marrones, estrellas de neutrones viejas, pequeños agujeros negros, planetas tipo Júpiter desparrramados por el espacio... una pannotia de objetos bautizados con el poco agraciado nombre de MACHOs (Massive Compact Halo Objects, objetos de gran masa del halo galáctico). El problema es que, aunque los MACHOs puedan existir, si se hacen números las cantidades que salen, asustan: 5 billones de ellos frente a 200 000 millones de estrellas luminosas. Nadie es capaz de explicar de dónde han salido. Y, además, esos



Esta imagen es una recreación artística de la distribución de la materia oscura en el halo que rodea a la Vía Láctea.

MACHOs se postularon para explicar la rotación de las galaxias espirales, pero de ningún modo dan cuenta de lo que sucede en el interior de los cúmulos y supercúmulos de galaxias. El golpe de gracia a la machirulez vino de los límites que la teoría de la nucleosíntesis primordial y las observaciones del fondo de microondas cósmico imponen a la cantidad de materia ordinaria existente en el universo: menos del 5 % de toda la masa-energía. Para explicar las observaciones debemos apelar a otro tipo de materia completamente diferente.

UNA MATERIA QUE NO ESTÁ HECHA CON LOS ELEMENTOS DE LA TABLA PERIÓDICA Y NO TENEMOS NI IDEA DE CÓMO CAPTURARLA

La conclusión es, cuando menos, alucinante: llevamos observando el universo desde hace 4000 años y hasta hace bien poco no teníamos ni idea de que por el universo hay suelta diez veces más materia que la que vemos en forma de estrellas y galaxias, una materia que —y esto hay que recalcarlo— no está hecha con ninguno de los elementos de la tabla periódica. Es un tipo de materia totalmente desconocida y que no tenemos ni idea de cómo capturarla. Aunque viajásemos al halo galáctico con un tarro con la intención de recogerla: ¿cómo hacerlo si no la podemos ver? Además, como no interacciona con nosotros se escaparía del tarro sin el menor esfuerzo. En estas condiciones desentrañar el misterio de la naturaleza de la materia

oscura puede ser tan agobiante como cazar gamusinos, pero para los cosmólogos es una oportunidad única para estirar y retorcer la teoría cuántica en busca de partículas-candidatos.

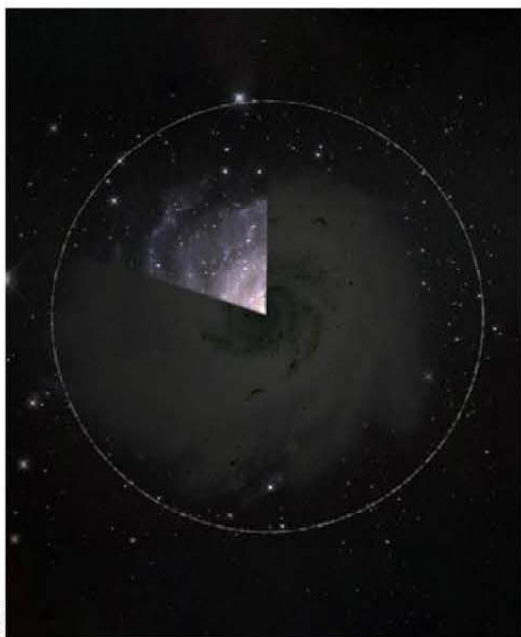


Diagrama que ilustra la composición de materia en el universo según las observaciones cosmológicas actuales.

MATERIA FRÍA/MATERIA CALIENTE

Ahora bien, no vale cualquiera; debe cumplir una serie de características. La primera, y más obvia, es que no debe tener carga eléctrica, pues veríamos su efecto. La segunda es que solo interacciona con la materia ordinaria a través de la gravedad, y prácticamente nada consigo misma. También debe ser estable, pues en el universo primitivo la cantidad de materia oscura era casi igual a la actual. Además, las partículas de materia oscura deben ser tan abundantes como para constituir el 26 % de toda la masa del universo. Y

finalmente, aunque la materia oscura pueda ser fundamental para la formación y evolución de galaxias y cúmulos, no debe modificar la evolución estelar.

Los cosmólogos han clasificado a todos los potenciales candidatos en dos grupos, en función de su velocidad. Si tienen una masa como la del protón o mayor, se moverán lentamente: es la materia fría. Pero si son más ligeras, viajarán a velocidades cercanas a la de la luz: es la materia caliente. En la actualidad los cosmólogos se decantan por la materia fría, pues los modelos computacionales revelan que solo con ella (o con una mezcla de fría y caliente, la materia templada) aparecen las estructuras que hoy vemos en el universo.

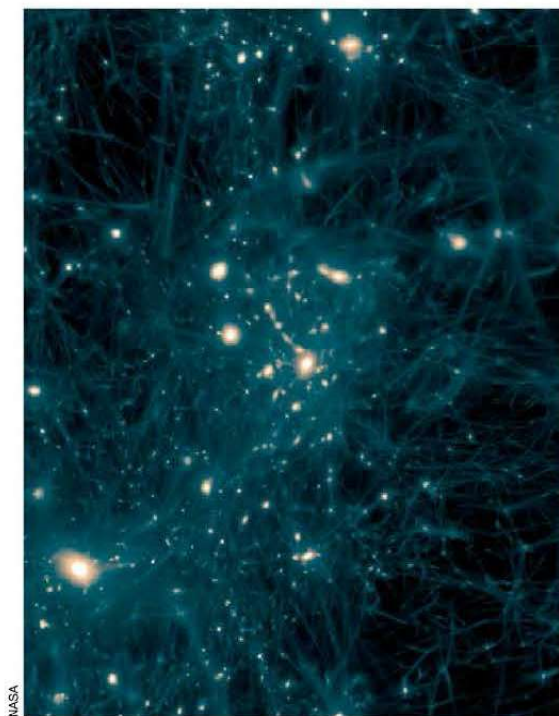


ESO/DIGITAL SKY SURVEY

Galaxia enana esferoidal, ubicada en la constelación de Fornax, es un satélite de nuestra Vía Láctea y una de las diez utilizadas en la búsqueda de materia oscura de Fermi.

Eso sí, la pregunta del millón es: ¿qué es esa materia oscura fría? Los teóricos apuestan por las WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), partículas masivas que interaccionan débilmente. Bajo este nombre se agrupan toda una colección de partículas cuya existencia se deduce de una teoría de moda (sin verificar, por supuesto): la supersimetría, que postula que cada partícula elemental conocida tiene una pareja más pesada. De entre ellas la más popular es el neutralino: alrededor del 50 % de los artículos científicos sobre candidatos a materia oscura son sobre partículas relacionadas con él. Hay diferentes tipos de neutralinos, con masas entre 10 y 10 000 veces la del protón, lo que proporciona muchas formas de jugar para poder obtener un modelo de universo acorde a las observaciones. El problema es que las predicciones de la supersimetría no se ha materializado en los experimentos de colisiones de partículas en el Gran Colisionador de Hadrones en Ginebra, por lo que la supersimetría está perdiendo muchos puntos. Esto ha hecho que las miradas se vuelvan hacia una partícula con nombre de lavavajillas: el

axión (y no es broma, su nombre viene de un lavavajillas de la compañía Colgate-Palmolive). Su existencia fue propuesta para resolver un problema de una rama de la física teórica de nombre bastante abstruso: la cromodinámica cuántica. Tiene una masa de una milmillonésima la del electrón e interacciona muy poco con la materia. Otro candidato es el neutrino estéril, un tipo de neutrino hipotético que, a diferencia de su primo (y bien conocido) neutrino, solo interacciona con la materia a través de la gravedad. El zoo de candidatos a materia oscura es enorme, pero ninguno resuelve el problema.



Las partículas masivas de interacción débil representan una clase hipotética de partículas para explicar la materia oscura.

GRAVEDAD NEGATIVA

Ahora bien, ¿realmente existe un tipo de materia tan extraña? Para el que fuera premio Nobel de Física Abdus Salam la materia oscura era

como los invisibles *djinns* (genios) de *Las mil y una noches*. Por eso hay físicos que afirman que no existe tal materia oscura sino lo que realmente necesitamos es una nueva física. Eso implica modificar una de las más sacrosantas teorías de la física del siglo XX, la relatividad general; según estos pocos heterodoxos, al igual que la gravitación newtoniana no explica lo que sucede cuando tenemos campos gravitatorios intensos, quizá la relatividad einsteniana no sea aplicable a grandes distancias. Sea cual sea la solución, lo único cierto es que la materia oscura lleva entre nosotros casi 90 años y seguimos sin saber qué demonios es. Por si toda esta confusión no fuera bastante, en diciembre de 1997 el proble-

LA SUPERSIMETRÍA POSTULA QUE CADA PARTÍCULA ELEMENTAL CONOCIDA TIENE UNA PAREJA MÁS PESADA

ma se complicó aún más. Ese mes el telescopio espacial *Hubble* detectó un tremendo fogonazo que sucedió hace 10 000 millones de años: se trataba de una supernova, bautizada como 1997ff, que explotó en una lejana galaxia elíptica. Era la supernova más distante jamás observada hasta entonces y la prueba de que nuestro universo es más extraño de lo que podíamos imaginar. Demostró que las dos terceras partes de todo lo que contiene el universo está en forma de una energía que funciona, a grandes escalas, como si se tratara de una gravedad negativa, una fuerza repulsiva que ha hecho que el universo se haya expandido un 10 % más deprisa en los últimos miles de millones de años. Eso implica que debe existir «algo» que empuje: el cosmólogo Michael Turner la llamó «energía oscura» y así ha quedado desde entonces. Es una pastilla difícil de tragar: nadie sabe a ciencia cierta qué es ni de dónde viene esa fantasmagórica energía que no reside en ningún objeto del universo, sino en el mismísimo espacio-tiempo.

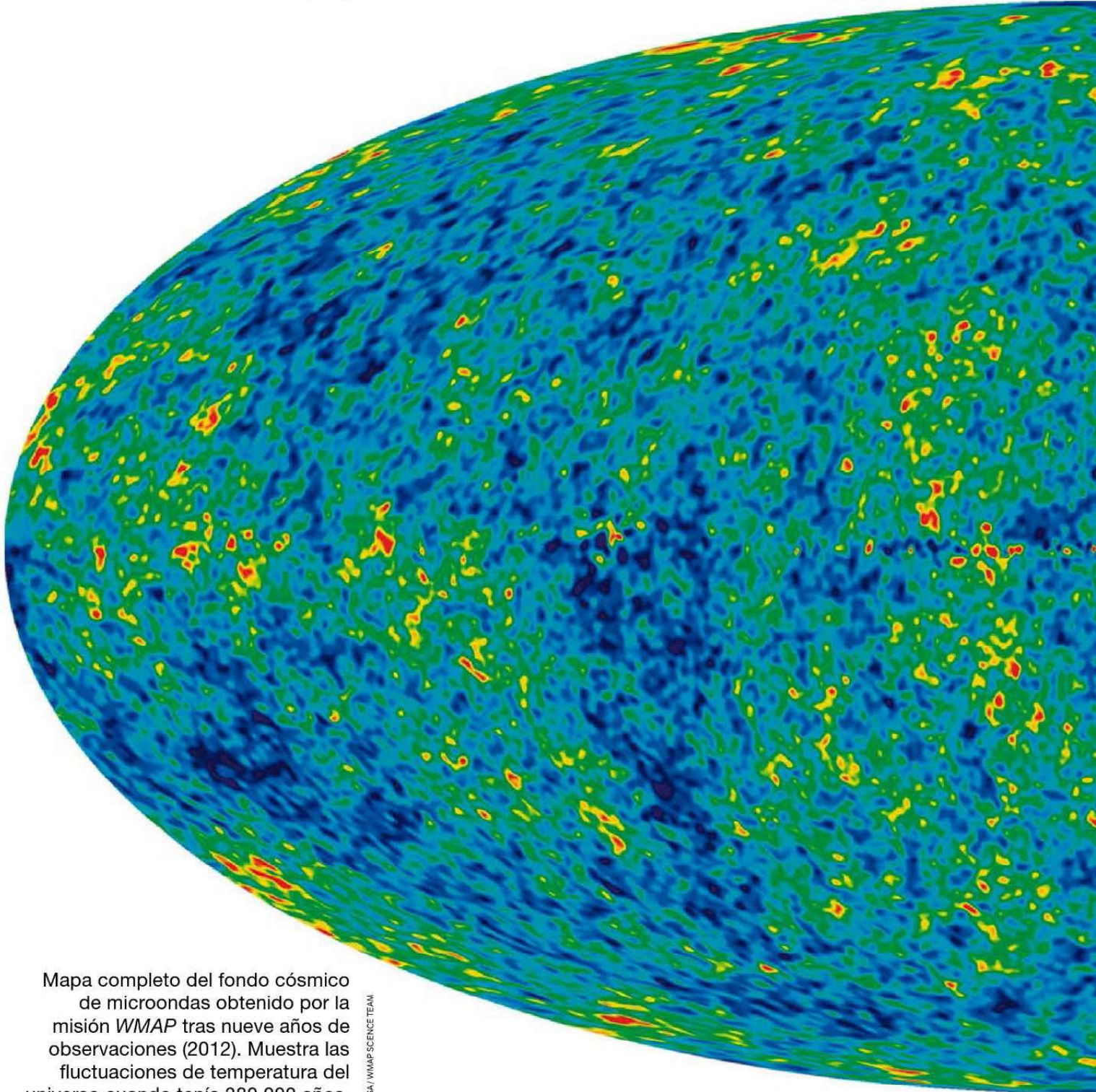
A medida que se han obtenido más datos se ha hecho posible estimar cuánta energía se necesita para semejante aceleración. A nivel local, el efecto es minúsculo: necesita menos de un julio de energía por metro cúbico de espacio, la energía que necesitamos para levantar una manzana a un metro de altura. Pero si consideramos todo el universo la cosa cambia. Si convirtiéramos toda esa energía en materia a través de la conocida ecuación de Einstein $E = mc^2$, obtendríamos catorce veces más masa que toda la materia ordinaria que existe en el universo.

¿TERMINARÁ COLAPSANDO EN UN BIG CRUNCH?

En el cosmos la oscuridad impera; solo un 4,6 % de todo lo que contiene es materia tal y como la conocemos: el 95 % que falta se lo reparten la materia oscura (23 %) y la energía oscura (72 %). Así, el futuro del universo, si asistiremos a una expansión sin fin o terminará colapsando en un Big Crunch, está en manos del lado oscuro. Nosotros no pintamos nada.

Las apuestas sobre lo que es la energía oscura se dividen en dos. La primera apunta a una constante cosmológica, inmutable en el tiempo. La segunda opción es que cambia con el tiempo, y los cosmólogos le han dado un nombre muy aristotélico, quintaesencia. Desde finales del siglo xx los teóricos intentan dirimir entre ambas, pero no acaban de ver la luz al final del túnel. Aun así, la opción más popular es que la energía oscura se oculta en forma de una constante cosmológica, que se interpreta como una energía del vacío. Pero esta interpretación y nuestros mejores intentos de cuantificarla a partir de una teoría fundamental nos ha llevado a la peor estimación teórica de la historia de la ciencia: la diferencia entre lo que observamos y lo que calculamos es de un uno seguido de 120 ceros. Es como decir que la teoría cuántica predice que el protón tiene un tamaño de cuatro veces el universo visible. Algo marcha desastrosamente mal en la teoría. ■

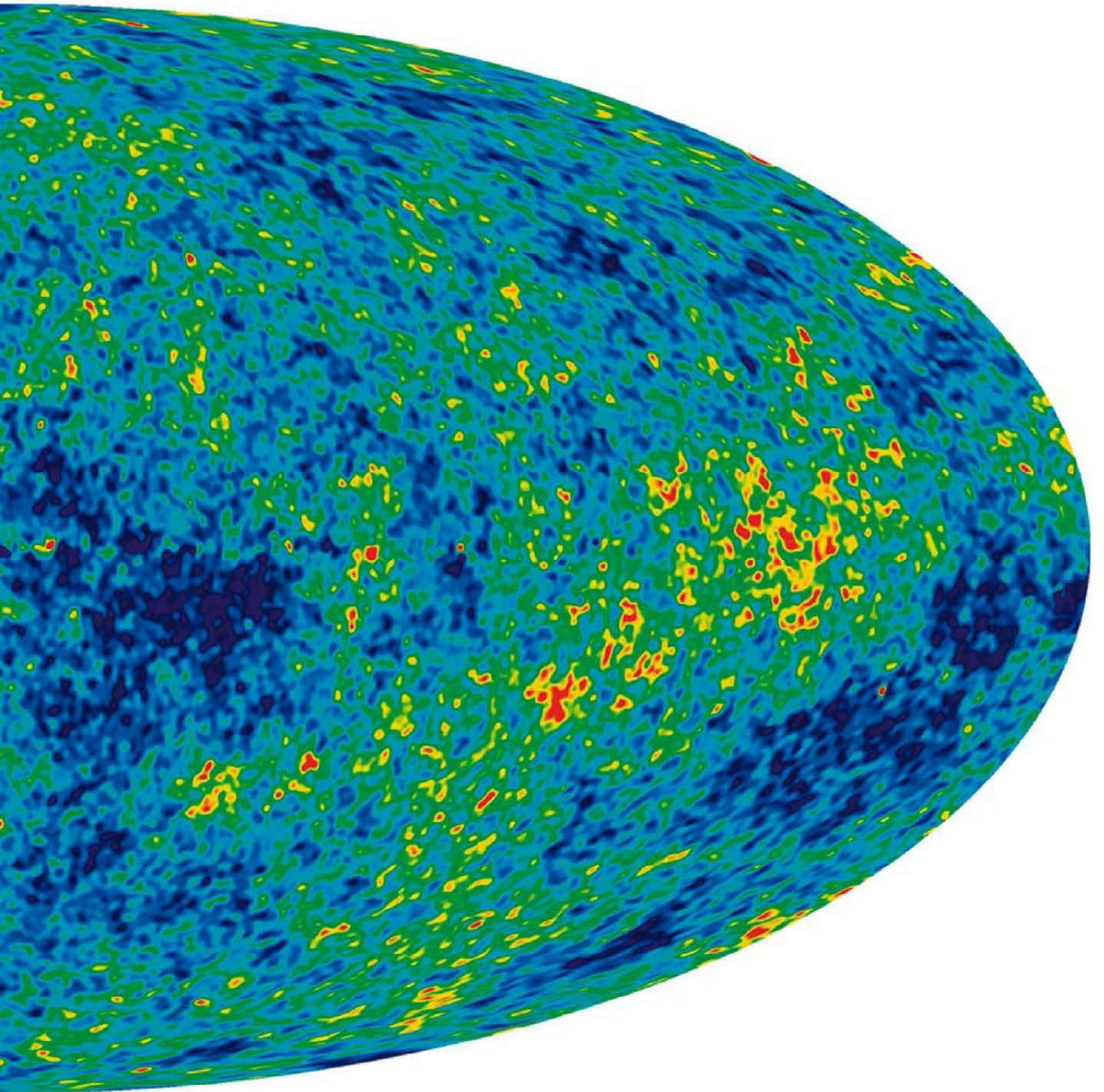
Big Bang



Mapa completo del fondo cósmico de microondas obtenido por la misión *WMAP* tras nueve años de observaciones (2012). Muestra las fluctuaciones de temperatura del universo cuando tenía 380 000 años.

NASA / WMAP SCIENCE TEAM

Así surgió todo



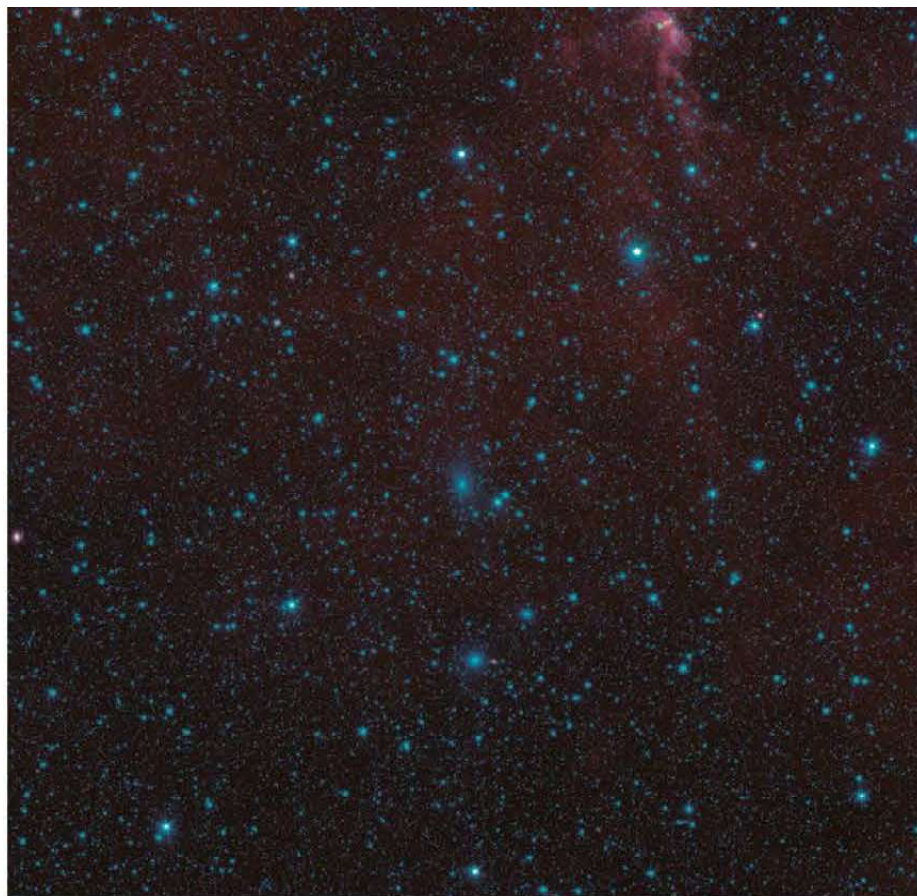


Imagen del telescopio espacial *Spitzer* de la NASA que muestra el supercúmulo de galaxias Perseo-Piscis, ubicado a 250 millones de años-luz de distancia.

Hace 13 800 millones de años se produjo un fenómeno único, una explosión que dio origen a todo: la materia, la energía, el espacio y el tiempo. Desde entonces el universo se está expandiendo. Cada hora, cinco millones de kilómetros de espacio nuevo se abre entre nosotros y el cúmulo de Virgo y 20 millones de kilómetros aparecen entre nosotros y el supercúmulo de Piscis-Perseo.

Resulta imposible imaginarla porque nuestra experiencia nos dice que una explosión sucede dentro de algo: una habitación, al aire libre, o incluso en el frío espacio, cuando una estrella muy masiva acaba sus días. El Big Bang no sucedió dentro de nada porque el espacio se creó con él.

RUIDO DESCONOCIDO

Extraña donde las haya, la del Big Bang es una teoría científica porque es un modelo de la naturaleza diseñado para explicar un conjunto de observaciones. Más aún, es la única teoría que lo hace. Podría haber otra, pero nadie la ha encontrado y las que han aparecido han sido incapaces de explicar esas observaciones. La primera de ellas, y más obvia, es el descubrimiento por Edwin Hubble en 1929 de que vivimos en un universo en expansión. Esto quiere decir que en una época muy remota todo el universo tuvo que estar concentrado en un punto a altísimas temperaturas y presiones: un «huevo cósmico», en palabras de quien formuló esta hipótesis por primera vez, el sacerdote belga Georges Lemaître. Pero esa no es la única predicción comprobable que el Big Bang hace sobre el universo. La teoría predice que el universo debe estar lleno de un ruido de fondo en el rango de las microondas.

Su descubrimiento se anunció en 1965. Arno Penzias y Robert Wilson, dos físicos que trabajaban en los Laboratorios Bell de Nueva Jersey, calibraban una antena de microondas diseñada para comunicaciones por satélite. Con gran disgusto y estupor descubrieron que cada vez que hacían una medición su antena captaba un «ruido» inesperado, el mismo independientemente de hacia dónde apuntaran la antena. Asqueados, no sabían a qué podía ser debido.

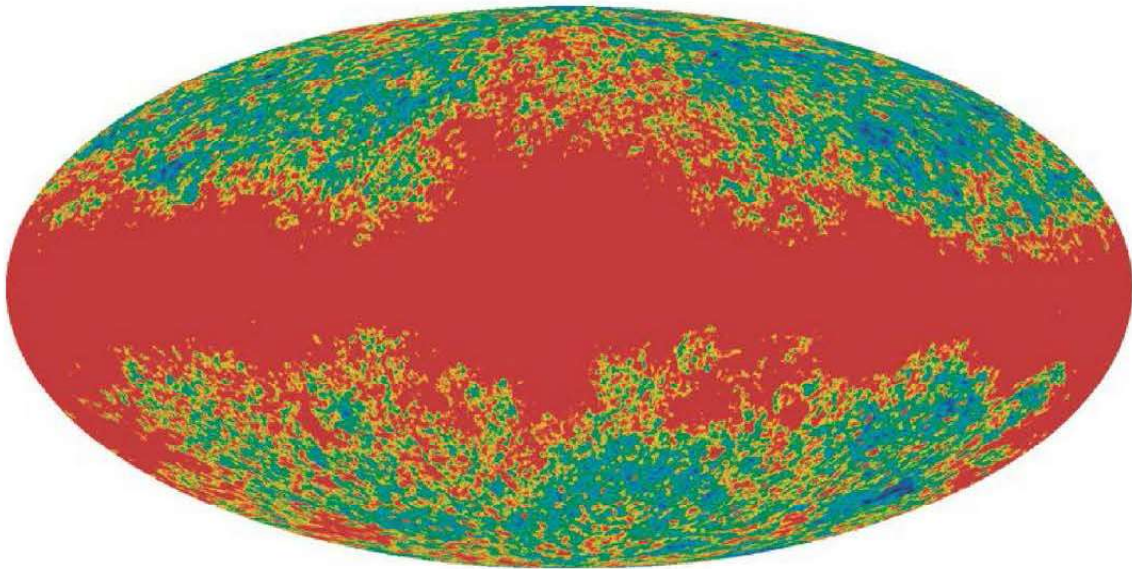
Mientras, físicos de la cercana Universidad de Princeton liderados por R. Dicke se dedicaban a calcular las características esperadas de la radiación resultante del Big Bang, predicha teóricamente en 1948 por Gamow, Alpher y Herman, y olvidada en las páginas de las revistas científicas. A principios de los 60 la propuesta fue redescubierta y mejorada por R. Dicke e Y. Zel'dovich. Concluyeron que, si el Big Bang realmente había ocurrido, esta radiación debería estar permeando todo el universo y debería ser detectable con una antena de microondas. Ahora bien, ¿existía? El grupo de Princeton se reunió a toda velocidad con Penzias y Wilson y se dio cuenta de que el «ruido» de su antena era el fondo cósmico de microondas que los teóricos llevaban diciendo que existía desde hacía casi 20 años: estábamos ante la primera evidencia sólida de que el Big Bang realmente había ocurrido.

El fondo cósmico de microondas consiste en fotones de microondas que han viajado por el espacio, no desde el momento de la Gran Explosión, sino de cuando el universo tenía unos 380 000 años: ese fue el momento en que el cosmos se hizo transparente a la luz. Hasta entonces, los fotones chocaban con los electrones y protones que viajaban libres por el espacio, de forma que la luz no podía recorrer grandes distancias sin interactuar con la materia. Pero en ese momento, la temperatura del universo descendió lo suficiente para que los núcleos de hidrógeno, helio y litio creados en el Big Bang atraparan los electrones libres y formaran átomos neutros, que interactúan menos con los fotones. Estos vieron el camino despejado para poder viajar sin obstáculos por todo el universo.

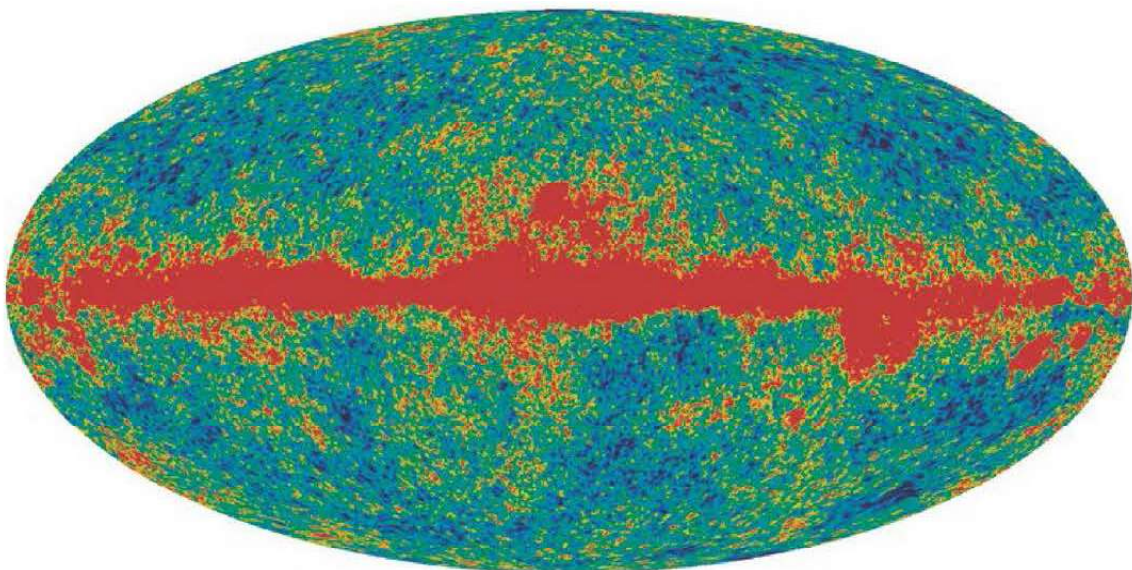
UNOS POCOS GRADOS POR ENCIMA DEL CERO ABSOLUTO

Según la teoría del Big Bang en esa época la temperatura del universo era de unos 3000 K, similar a la temperatura superficial de una estrella gigante roja. Dado que el universo se ha ido expandiendo desde entonces un factor aproximadamente 1000, las longitudes de onda de estos fotones deberían haberse agrandado unas 1000 veces su longitud original. Por lo tanto, la longitud de onda máxima de la luz liberada entonces ahora debe ser de, aproximadamente, un milímetro, justo en la zona de microondas del espectro y que corresponde a una temperatura de solo unos pocos grados por encima del cero absoluto: ese es el fondo cósmico de microondas.

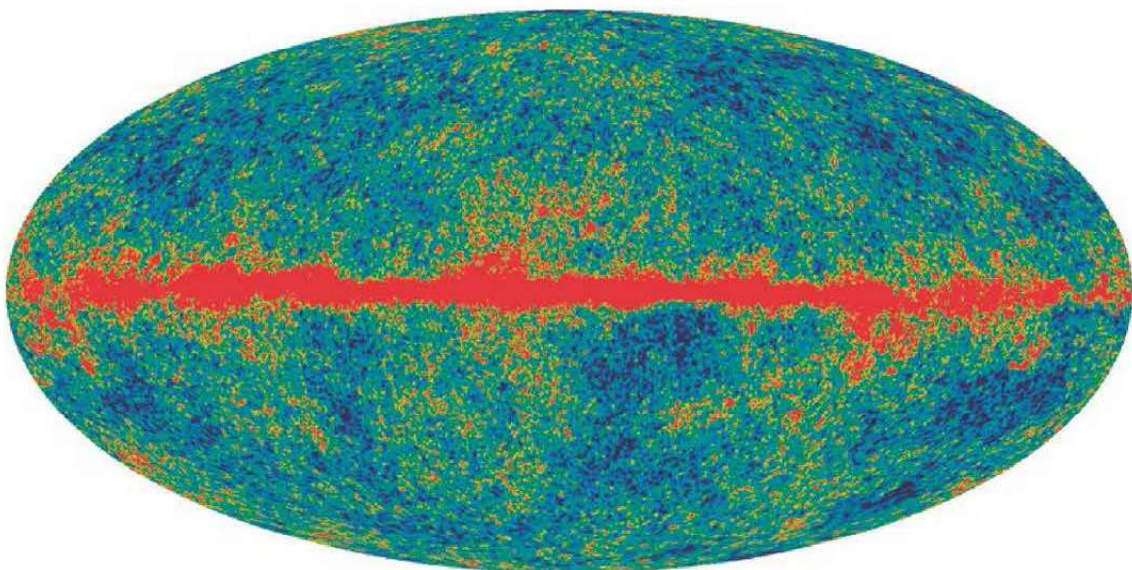
EN UNA ÉPOCA MUY REMOTA EL UNIVERSO TUVO QUE ESTAR CONCENTRADO EN UN PUNTO A ALTÍSIMAS TEMPERATURAS Y PRESIONES



WMAP 2008 23GHz



WMAP 2008 41GHz



WMAP 2008 94GHz

Mapas del fondo cósmico de microondas obtenidos por *WMAP* durante cinco años de observaciones, que muestra tres frecuencias diferentes (23, 41 y 94 GHz).

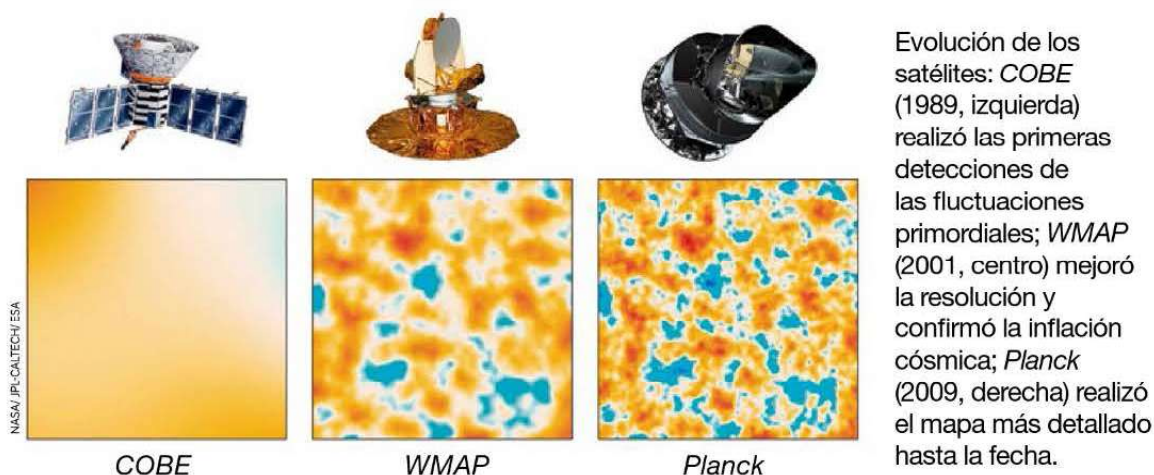
EN EL UNIVERSO, UNAS TRES CUARTAS PARTES DE LA MASA DE LA MATERIA ORDINARIA ES HIDRÓGENO Y UNA CUARTA PARTE, HELIO

A principios de la década de 1990 se lanzó un satélite de la NASA llamado Explorador del Fondo Cósmico (*COBE*) para probar estas ideas. El resultado fue un éxito rotundo para la teoría: el fondo cósmico de microondas posee, efectivamente, un espectro de radiación que corresponde a una temperatura de 2,73 K.

COBE y sus misiones sucesivas, la Sonda de Anisotropía de Microondas Wilkinson (*WMAP*) y el satélite *Planck*, también han cartografiado la temperatura del fondo cósmico de microondas en todas las direcciones y han descubierto que es extraordinariamente uniforme en todo el universo, tal como predice la teoría del Big Bang, con variaciones de temperatura de un lugar a otro de tan solo unas pocas partes por 100 000. Esas ligerísimas variaciones también son un acierto de la teoría: lo que sabemos de la formación de galaxias se basa en el supuesto de que el universo primitivo no era del todo uniforme; algunas regiones del universo debieron haber comenzado siendo ligeramente más densas que otras, de modo que pudieran servir como semilla para la formación de galaxias. Esas pequeñas variaciones en la temperatura del fondo cósmico de microondas indican que la densidad del universo primitivo realmente difería ligeramente de un lugar a otro.

¿DÓNDE ESTÁ EL HELIO?

Otro de los éxitos de la teoría del Big Bang es que resuelve el problema del origen del helio. En el universo, unas tres cuartas partes de la masa de la materia ordinaria es hidrógeno y una cuarta parte, helio. Así, la fracción de helio de la Vía Láctea es de, aproximadamente, el 28% y ninguna galaxia tiene una cantidad de helio inferior al 25%. Sabemos que este gas noble se crea por fusión en el interior de las estrellas, pero los cálculos muestran que esta producción solo representa una pequeña proporción del helio total observado. Eso quiere decir que la mayor parte del helio del universo tenía que estar presente antes de la formación de las primeras estrellas.



NO HAY FORMA DE VER LO QUE SUCEDIÓ ANTES: ESTAMOS ANTE UN MURO DE LUZ QUE NOS IMPIDE ATISBAR LO QUE HAY DETRÁS

Pues bien, el Big Bang hace una predicción específica sobre la abundancia de helio. La teoría postula que a los cinco minutos de vida del universo la temperatura del universo era de cien mil millones de grados. En ese momento las reacciones nucleares podían convertir los neutrones en protones y viceversa. Si el universo se hubiera mantenido con esa temperatura, la cantidad de protones y neutrones no habría cambiado. Pero el universo se estaba enfriando debido a la expansión y esa conversión neutrón-protón empezó a favorecer a los protones. A diez mil millones de grados los neutrones seguían transformándose en protones, pero los protones no volvían a ser neutrones. La razón es bien sencilla: como el neutrón es más pesado que el protón, convertir neutrones en protones necesita energía. ¿Cuánta? Como mínimo la diferencia de masa entre el neutrón y el protón (recordemos que masa y energía son intercambiables gracias a la ecuación de Einstein $E = mc^2$). ¿De dónde sale esa energía? De la que tiene el propio universo y que viene definida por la temperatura. Cuando la energía del universo no es suficiente para la transformación de protones en neutrones, esta se detiene. Por el contrario, la conversión de neutrones en protones libera energía (como en el caso anterior, justo la diferencia de masa entre las dos partículas), por lo que su transmutación no se ve impedida por el descenso de temperatura.

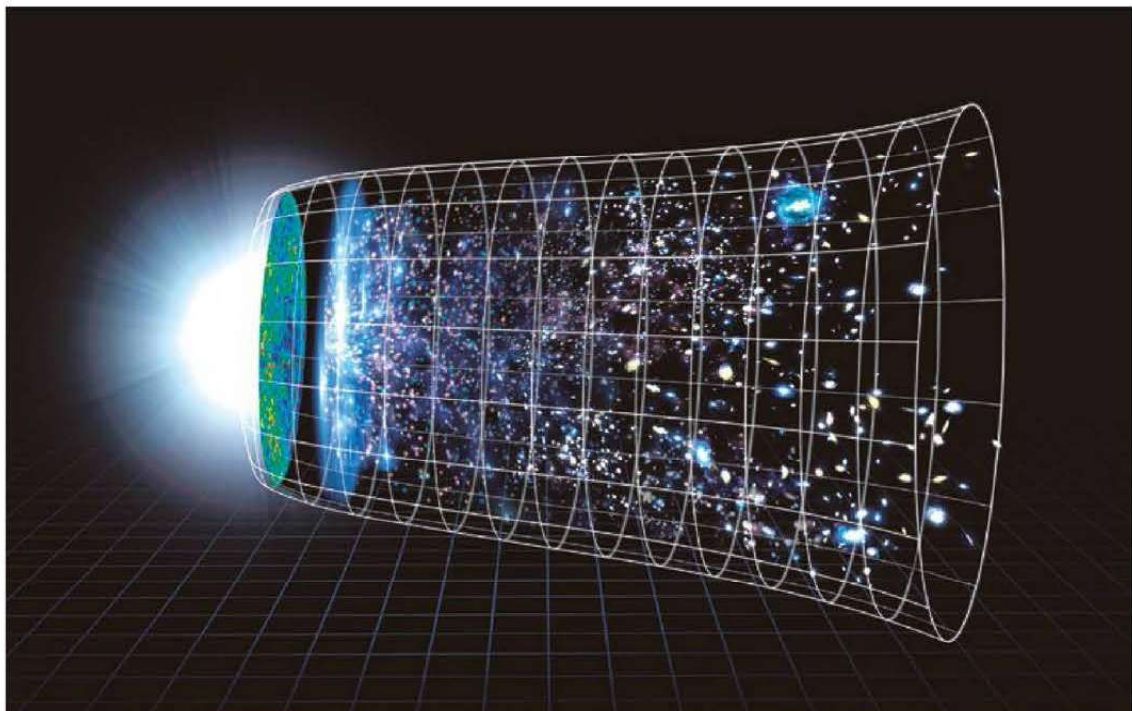
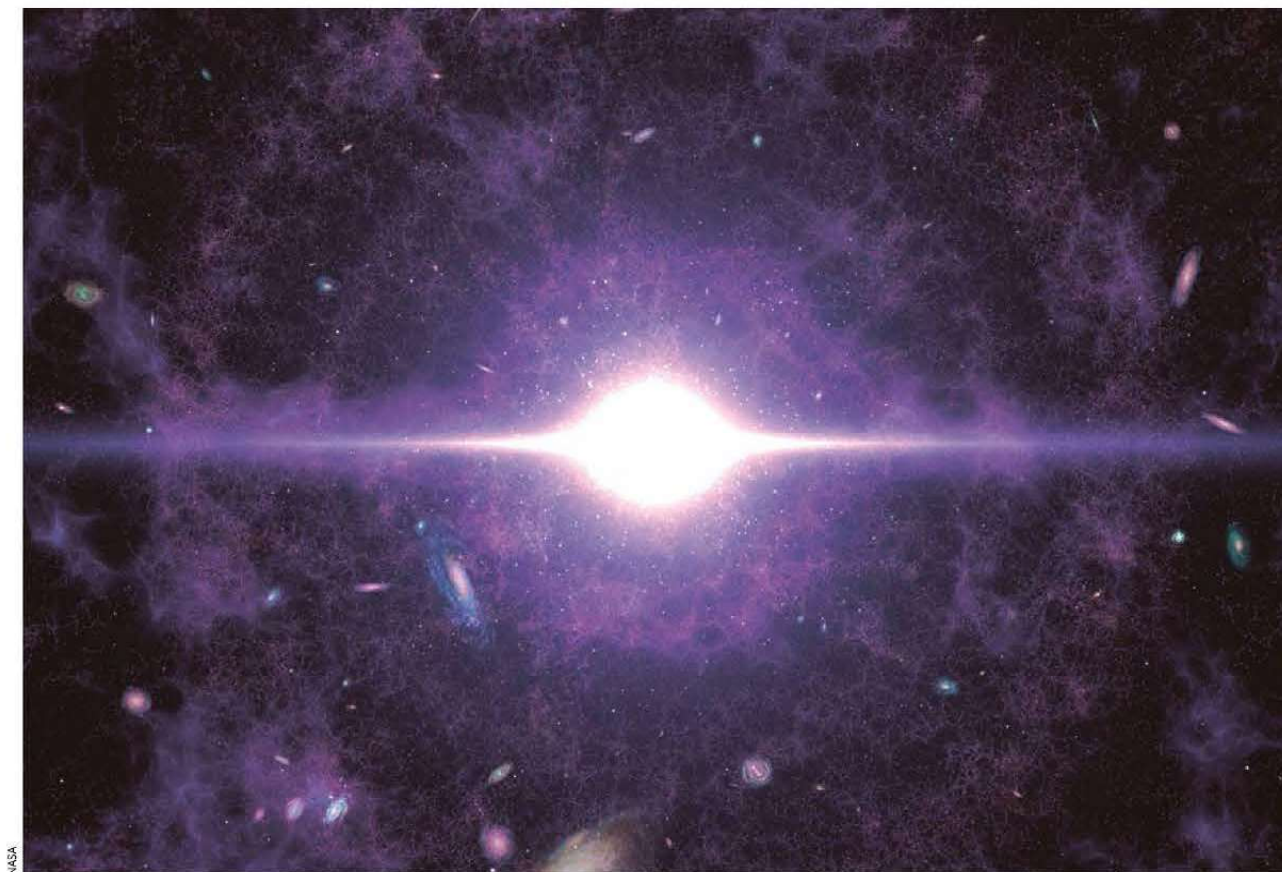


Ilustración donde se representa la evolución del universo a lo largo de 13 770 millones de años. La parte de la izquierda muestra el momento más temprano que podemos explorar.



Representación del Big Bang en el momento inicial de la expansión del universo, desde un estado de densidad y temperatura extremas dando origen a la materia y a la energía.

¿Y QUÉ SUCEDIÓ ANTES?

Durante los siguientes minutos, el universo permaneció lo suficientemente caliente y denso como para que se produjera la unión de protones y neutrones para formar helio. Por desgracia, durante la primera parte de la era de la nucleosíntesis, los núcleos de helio eran destruidos en el momento de formarse debido a los numerosos rayos gamma que todavía llenaban el universo. Solo empezaron a ser estables cuando el universo se enfrió lo suficiente para que se redujera sensiblemente la cantidad de esos rayos gamma destructivos. Los cálculos muestran que, cuando eso sucedió, la proporción protón-neutrón debería haber sido de aproximadamente 7 a 1, lo que implica que el universo debería haber acabado con una composición de 75 % de hidrógeno y 25 % de helio al final de la nucleosíntesis. Y eso es lo que se observa.

Esto es lo único que podemos saber que sucedió antes de esos 380 000 años de los que procede la radiación cósmica de microondas. No hay forma de ver lo que sucedió antes: estamos ante un muro de luz que nos impide atisbar nada de lo que hay detrás. No hay nada que nos permita atisbar lo que sucedió, ningún resultado observacional, salvo una panoplia de teorías físicas sin base experimental: véase la teoría de cuerdas, la supersimetría, las teorías de gran unificación... Hipótesis que, después de 40 años, no han saltado de los papeles garrapateados de los departamentos de física teórica al mundo real. Y posiblemente nunca lo harán. ■



¿Qué hubo antes del Big Bang?

Saber qué hubo antes es una de las cuestiones de la cosmología actual más problemáticas desde el punto de vista científico. Si el espacio-tiempo mismo comenzó en ese momento, el concepto de «antes» podría carecer de significado físico, pero tener mucho de filosófico.

SHUTTERSTOCK

En su última aparición en un medio de comunicación, a Stephen Hawking le preguntaron ¿qué hubo antes del Big Bang? La respuesta del famoso físico teórico no se hizo esperar: «La condición de contorno del universo es... que no tiene frontera». Era la respuesta favorita de Hawking cuando le hacían esa pregunta; una respuesta que apareció en su *best-seller* de 1988 *Breve historia del tiempo*. En esencia quiere decir que no existe nada parecido a un antes previo a la gran explosión que dio el banderazo de salida a nuestro universo; una respuesta similar a la que dio el teólogo cristiano Agustín de Hipona en el siglo IV: «El mundo no es creado en el tiempo sino con el tiempo».



VADIM SHULTS

El ruso-norteamericano Andrei Linde es uno de los cosmólogos teóricos más influyentes de las últimas décadas.

UN PROBLEMA MÁS QUE UNA SOLUCIÓN

Hawking llevaba muchos años lidiando con la existencia de unas peculiares zonas donde la física pierde los papeles, las singularidades espaciotemporales. En el caso de un agujero negro es ese punto matemático situado en el centro donde, teóricamente, se concentra toda la masa; en el caso del universo, el momento y lugar en que se produce el Big Bang. Aunque muy diferentes entre sí, en ambas situaciones nos encontramos ante una ruptura de las leyes de la naturaleza, y eso a los físicos no es algo que les entusiasme. De hecho, que el comienzo del universo sea, como algunos han descrito, «un punto agudo donde todo lo que vemos está triturado en una bola de energía mucho más pequeña que un átomo y

luego estalla», es más un problema que una solución. Porque, ¿qué había antes? Para Andrei Linde, cosmólogo de la Universidad de Stanford, «preguntar qué hay antes del Big Bang, que es el principio del tiempo, es una autocontradicción».

Es aquí donde engarza la propuesta de Hawking: el tiempo, tal como lo conocemos y lo definimos, va perdiendo su significado a medida que nos acercamos al momento de la gran explosión. Las piruetas matemáticas del brillante físico teórico inglés consiguen librarse de ese incómodo punto de partida: podemos

**EL TIEMPO VA PERDIENDO SU SIGNIFICADO
A MEDIDA QUE NOS VAMOS ACERCANDO AL
MOMENTO DE LA GRAN EXPLOSIÓN**

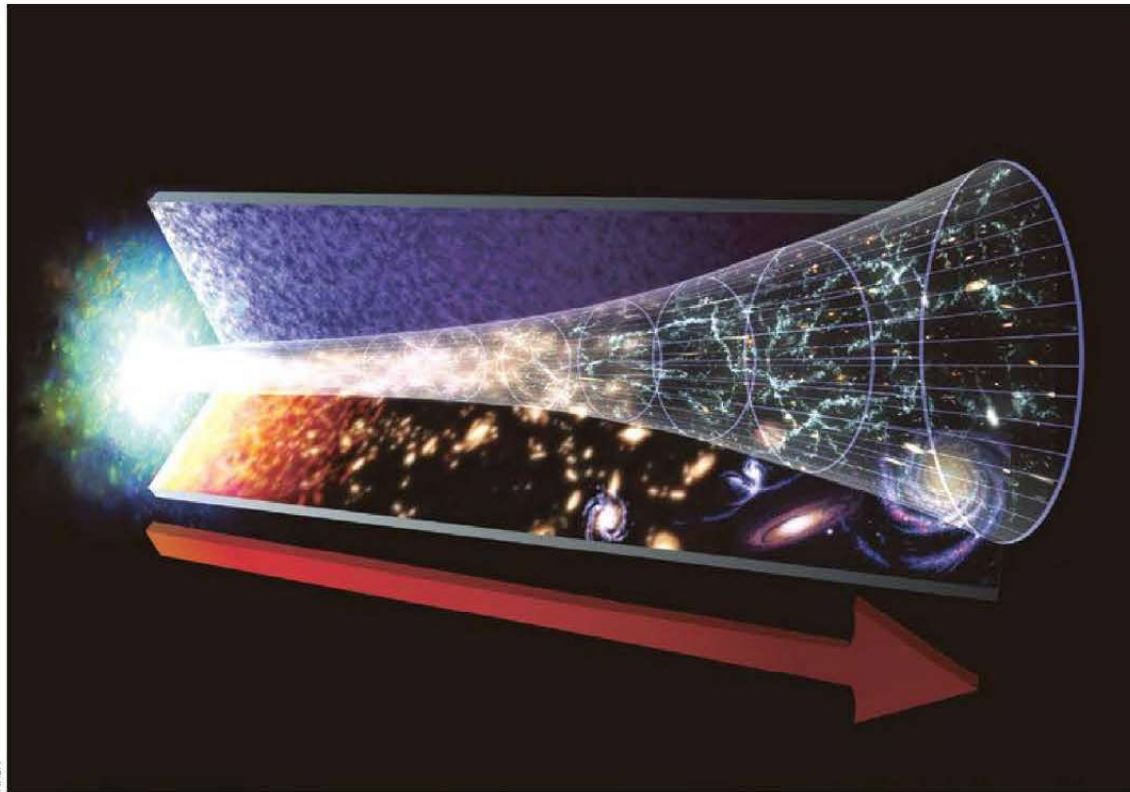


Diagrama desde el Big Bang hasta la actualidad. La flecha roja indica la dirección temporal, representando los 13 800 millones de años transcurridos desde el origen del cosmos.

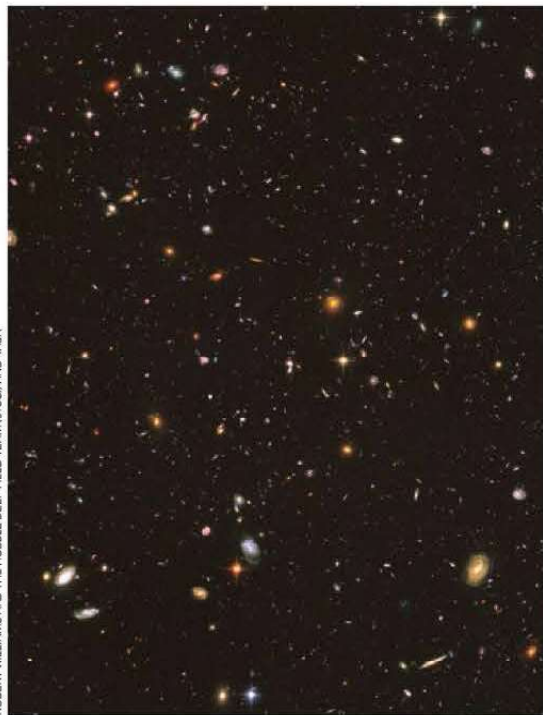
retrasar todo lo que queramos nuestro reloj, acercándolo al momento del chupinazo inicial, pero jamás lograremos ponerlo a cero. Como él mismo comentaba en su libro *Una breve historia del tiempo*, preguntar sobre lo que existía antes del Big Bang es como preguntar si ponemos seguir caminando hacia el sur una vez hemos llegado al Polo Sur: nada ni nadie puso en marcha el cronómetro del universo porque nunca se llegó a esa situación. Esta es la llamada «proposición de la no-frontera». En una conferencia sobre esta conjetura, Hawking explicó: «Los eventos antes del Big Bang simplemente no están definidos, porque no hay forma de que uno pueda medir lo que sucedió en ellos. Dado que los eventos anteriores al Big Bang no tienen consecuencias observacionales, uno puede quitarlos de la teoría y decir que el tiempo comenzó en el Big Bang».

Así pues, si echamos la película del universo hacia atrás, veremos que el tiempo se va ralentizando a medida que nos acercamos al Big Bang, y podremos acercarnos más y más, pero nunca llegaremos. «No hay nada al sur del Polo Sur, por lo que no había nada antes del Big Bang», sentenciaba Hawking. Dicho de forma más explícita: el universo es autocontenido; no hay un momento de la creación: «El universo no sería creado ni destruido —decía Hawking—. Simplemente existiría».

¿Por qué tanta pirueta matemática para eliminar la singularidad inicial? Porque para Hawking, como para la mayoría de los cosmólogos, las leyes de la física no pueden desaparecer ni dejarse de aplicar en ningún momento de la existencia del universo, lo que convierte a la singularidad inicial en «la vecina molesta» de la cosmología. Podrían asumirla como tal, pero el universo matemático que tanto gusta a los físicos teóricos perdería gran parte de su belleza.

EL UNIVERSO ESTÁ POCO DESORDENADO

Por supuesto, esta no es más que una de las diferentes explicaciones que los físicos teóricos ofrecen a la insidiosa pregunta de lo que había antes del Big Bang. Porque ya se sabe: cuando no hay forma de comprobar experimentalmente lo que uno afirma, la imaginación es libre y el papel aguanta lo que escribas. Y no hay



ROBERT WILLIAMS AND THE HUBBLE DEEP FIELD TEAM (STSC) AND NASA

El campo profundo del Hubble representa, sin duda, uno de los logros más importantes de la astronomía moderna.

mejor lugar para un teórico que un terreno donde puede estirar, retorcer y aplastar las ecuaciones a su antojo.

Pero aún hay más. Una de las propiedades del universo que más sorprende a los cosmólogos es que su entropía, una magnitud física que mide el nivel de desorden, es muy baja. O sea, que el universo está poco desordenado. Esto, que al común de los normales no nos preocupa lo más mínimo, a los físicos les hace poner la casa patas arriba. Veámoslo con un ejemplo: imaginemos una bomba llena de arena que explota sobre una superficie vacía: esto es el Big Bang. Lo esperable es que esa arena se esparza más o menos uniformemente por toda la mesa y no que empiece a formar castillos de arena. Pues eso es exactamente lo que pasa en el universo; en lugar de tener una distribución más o menos homogénea de energía y materia, te-

nemos estrellas, galaxias, cúmulos... Esto nadie lo entiende. ¿Qué hacer? Pues salir a buscar pedazos de teorías que ayuden a resolver el problema.

Pero ¿por qué un universo con baja entropía es algo tan sorprendente? Para eso debemos mirar a una de las leyes fundamentales de la naturaleza, la segunda ley de la termodinámica, que afirma que en un sistema aislado la entropía siempre debe aumentar. Y, hasta donde sabemos, nuestro universo es un sistema aislado, lo que implica que en el pasado debió estar más ordenado que en la actualidad. Y ese es el problema, que no es así. Para resolverlo se han propuesto distintas soluciones. Una de ellas es el Big Bounce, el Gran Rebote, que dice que nuestro universo de baja entropía nació de otro anterior que colapsó a un punto de gravedad infinita para luego «explotar» y producir nuestro propio universo.

UNIVERSO ECPIRÓTICO

Si todo esto le está levantando dolor de cabeza, no crea que lo que sigue lo va a mejorar. En 2001 los físicos Justin Khoury, Burt Ovrut, Paul Steinhardt y Neil Turok presentaron una variante que bautizaron como el universo ecpirótico, un nombre

IMAGINEMOS UNA BOMBA LLENA DE ARENA QUE EXPLOTA SOBRE UNA SUPERFICIE VACÍA: ESTO ES EL BIG BANG

ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

O escanea el código QR:



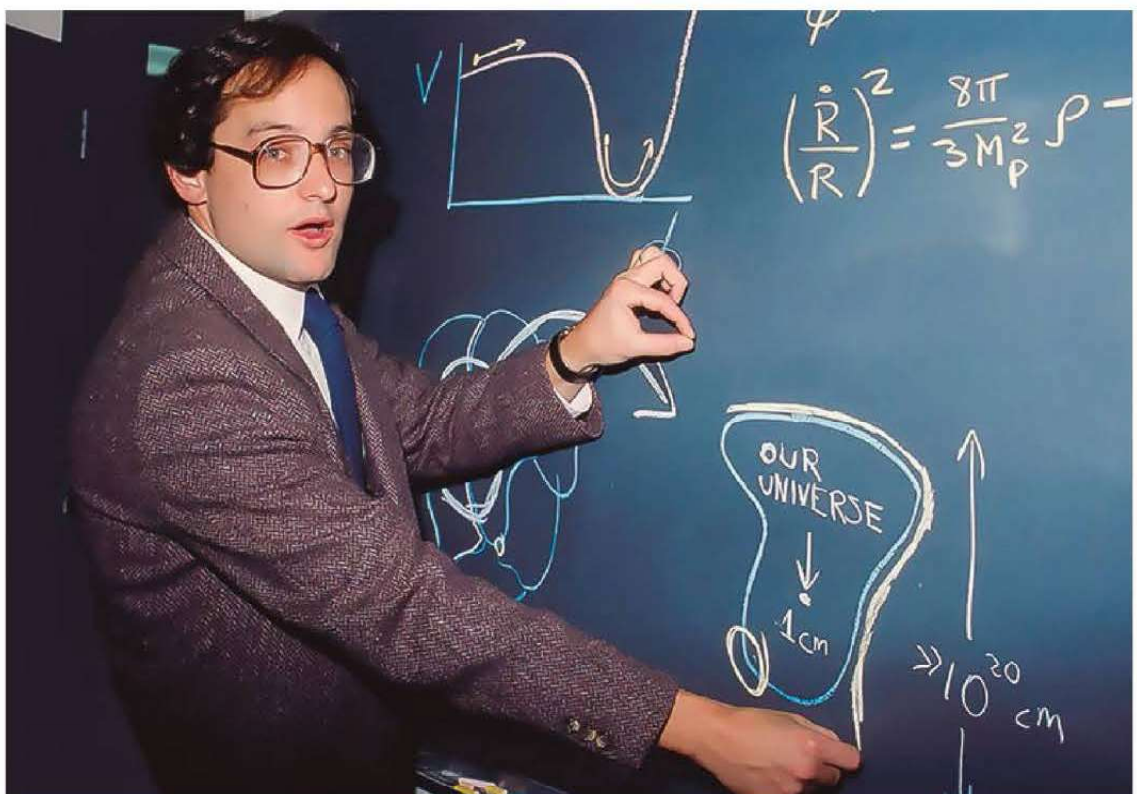
NASA/PAUL ALERS

Para Hawking —arriba, en 2008, en Washington— las leyes de la física no pueden desaparecer ni dejarse de aplicar en ningún momento de la existencia del universo.

ALAN GUTH ENCONTRÓ QUE HUBO UN MOMENTO EN EL QUE TODO SE DESBOCÓ Y CRECIÓ DE FORMA EXPONENCIAL

que se refiere a la creencia de los estoicos de que cada Gran Año el mundo desaparece en una gran conflagración (*ekpirosis*) para renacer a continuación, siguiendo un ciclo de eterno. Según esta nueva cosmología, nuestro universo está confinado en una especie de hoja tridimensional que recibe el nombre de *brana* y que se encuentra en un universo de dimensión superior, «el Bulto». Pero en el Bulto pueden existir otras *branas* (universos) que interaccionan entre ellas mediante la gravedad. Pues bien, y según cuenta el propio Steinhardt, «el modelo ecpirótico propone que nuestro universo surgió de la colisión de dos mundos tridimensionales (*branas*) en un espacio con una dimensión espacial extra (la cuarta)». Esos dos mundos colisionan, «se adhieren», y la energía liberada se convierte en los quarks, electrones, fotones... de nuestro universo, que se ven forzados a moverse en las conocidas tres dimensiones. Y adiós a la singularidad inicial.

Si esta colorista hipótesis resulta llamativa, no lo es menos la que publicaron Kurt Hinterbichler, Austin Joyce y Justin Khoury en el *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* en junio de 2012: al igual que los osos en invierno, nuestro universo pasó un tiempo hibernando.



Paul Joseph Steinhardt (en la imagen en una fotografía de la década de 1980), lejos de aferrarse a sus ideas originales, ha evolucionado críticamente hacia nuevos marcos teóricos.

Antes de la gran explosión se habría mantenido en lo que se llama un estado metaestable, esto es, que desde el punto de vista energético se encontraba como una pelota en la cima de una montaña: de allí no se moverá si no se produce ninguna alteración que la haga caer rodando al valle. Pues eso es exactamente lo que sucedió y fue lo que dio origen al Big Bang. Esta propuesta nos retrotrae a una similar que el cosmólogo Edward Tyron publicó en diciembre de 1973 en la revista *Nature*. En un artículo breve, de dos páginas, su título lo dijo todo: «¿Nació el universo de una fluctuación del vacío?». En esencia, explica el cosmólogo Alexander Vilenkin, «lo que Tryon estaba sugiriendo es que todo nuestro universo, con toda la materia que contiene, surgió de una fluctuación cuántica que de alguna forma lleva sin desaparecer diez mil millones de años». O lo que es lo mismo, y parafraseando a los Monty Python, el universo viene de la nada y vuelve a la nada. ¿Qué ha perdido? ¡Nada! No es de extrañar que Tyron dijera, cuando le preguntaban por su artículo, que «el universo es una de esas cosas que suceden de vez en cuando».

EL MULTIVERSO

Y llegamos a la hipótesis de moda entre los teóricos: el multiverso. Para comprenderla debemos viajar a la noche del 6 de diciembre de 1979, cuando el cosmólogo Alan Guth, jugando con las ecuaciones que describen el comienzo del universo, encontró que hubo un momento en el que todo se desbocó y creció de forma exponencial: fue de tal magnitud que si al virus de la gripe le pasara lo mismo, en lo que tardas en chascar dedos se haría mucho más grande que el universo visible actual. Así, pasada una cien millonésima de billonésima de billonésima de segundo desde el Big Bang, el universo dobló su tamaño casi 1000 veces. Esta es la inflación.

A partir de esta idea otros cosmólogos, como Andrei Linde, han tirado del hilo. En particular Linde se preguntó: ¿por qué solo tuvo que haber una época inflacionaria que afectara a todo el universo? Así nace la llamada inflación eterna o caótica. Para entenderla, Linde propone que imaginemos un balón de fútbol, con los hexágonos y pentágonos pintados de un color determinado. El proceso de inflación afecta al conjunto de todo el balón (el multiverso), pero de forma diferente a los hexágonos y pentágonos del balón (los distintos universos), cada uno con sus propias leyes físicas (el color), que se ven influidos de forma diferente por la inflación. Cada burbuja inflacionaria, concluye Linde, sería un nuevo Big Bang, un nuevo universo con diferentes características y tal vez incluso diferentes dimensiones. Nuestro universo sería simplemente uno de ellos. «Este proceso puede seguir sucediendo para siempre», añade. «Puede estar sucediendo ahora, en alguna parte del universo». Este «superuniverso» de la inflación eterna es tan inimaginablemente grande, caótico y diverso que la cuestión del comienzo se vuelve casi irrelevante. Para cosmólogos como Guth y Linde, ese es el atractivo de su hipótesis: «La inflación caótica nos permite explicar nuestro mundo sin hacer suposiciones tales como la creación simultánea de todo el universo de la nada», dice Linde.

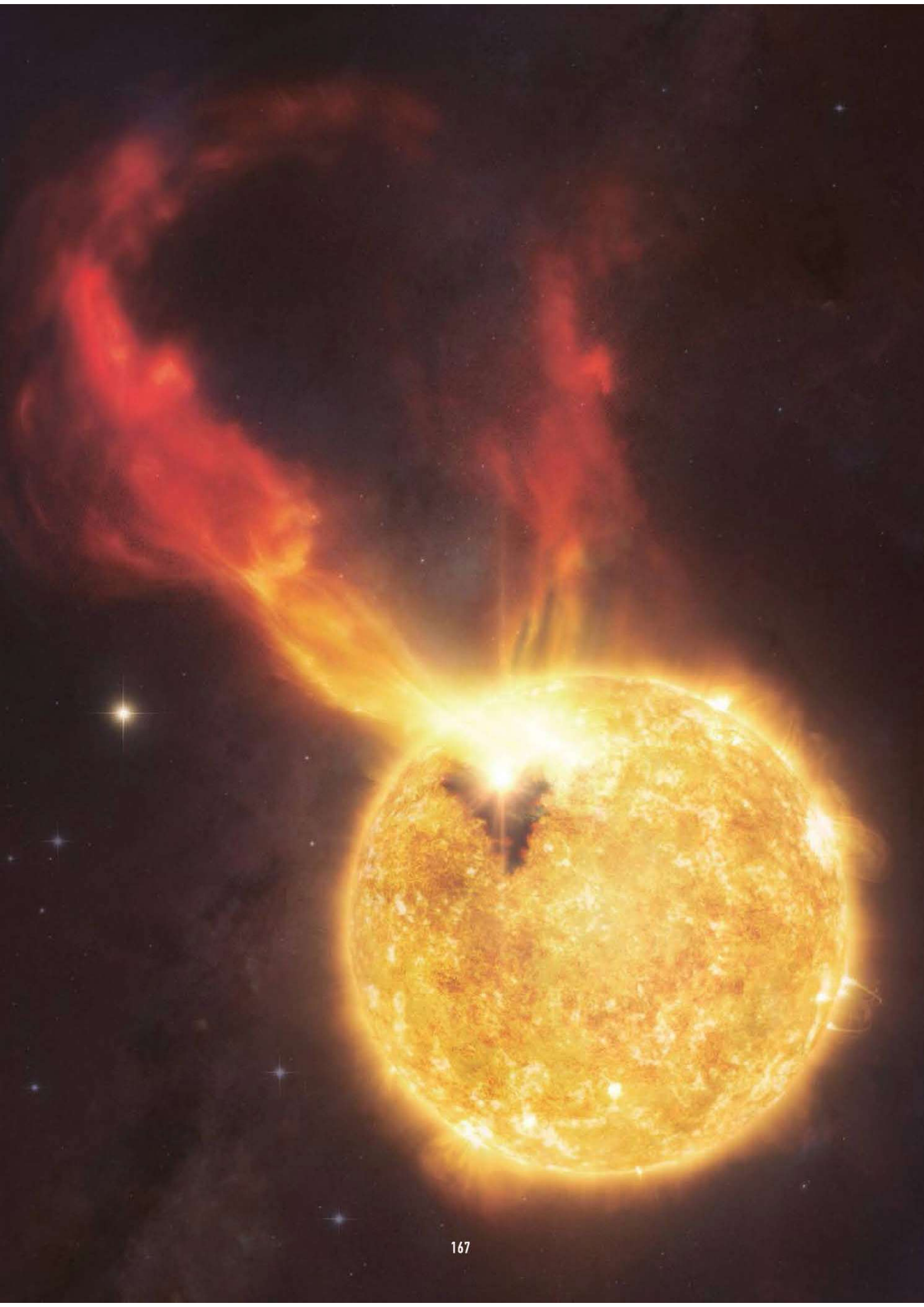
¿Sabremos algún día quién tiene razón?

Muy optimista hay que ser para creerlo. ■

El final de las estrellas

Representación de una llamarada de HD 283572. Durante los periodos de inactividad (o quietud), HD 283572 no puede detectarse con el Conjunto Submilimétrico (SMA). Sin embargo, el 17 de enero de 2022, se produjo una llamarada extrema.

CPA/MELISSA WEISS



La vida de una estrella es una lucha continua contra la gravedad. Para evitar el colapso gravitatorio cuenta con dos armas: la presión que ejerce el gas que la compone y la energía liberada en el corazón de la estrella. Como cualquier fuente de energía, las reacciones nucleares necesitan de combustible para funcionar. Dicho de otro modo, la estrella necesita átomos que pueda fusionar. Hemos visto que prácticamente a lo largo de toda su vida las estrellas utilizan el hidrógeno para obtener helio y energía. Si las condiciones del núcleo son las adecuadas (en esencia, presiones y temperaturas cada vez más altas) la estrella podrá usar el helio para obtener la energía que necesita para detener a la gravedad y obtendrá como subproductos oxígeno, carbono... Y así puede seguir durante cierto tiempo, en un ejemplo claro de reciclaje a escala astronómica: usa la basura generada para obtener más energía.

UNA ESTRELLA OSCURA Y MUERTA

¿De qué depende que esto suceda? De la masa de la estrella. Para una como el Sol el horno nuclear se detendrá cuando el núcleo agote su provisión de helio. La naturaleza ya no mostrará la menor piedad: el núcleo se contraerá y la envoltura se expandirá, hinchándose hasta tener un radio 500 veces mayor que el del Sol y ser 5000 veces más luminosa: habrá entrado en la fase de gigante roja, en la que vivirá unos mil millones de años (y alcanzará esa fase dentro de 5000 millones). Mientras, el núcleo, compuesto por átomos de carbono y oxígeno, que contiene el 60 % de la masa de la estrella, se comprime hasta que su densidad alcanza los diez millones de veces la del agua. Entonces la contracción se detiene porque los



Las estrellas de tipo solar pasan la mayor parte de sus vidas quemando lentamente su combustible nuclear primario, hidrógeno, para convertirlo en un elemento más pesado, helio.

A LO LARGO DE TODA SU VIDA LAS ESTRELLAS UTILIZAN EL HIDRÓGENO PARA OBTENER HELIO Y ENERGÍA

átomos no pueden estar más juntos: en esta situación se dice que la materia está degenerada. En esta fase el viento estelar cobra tanta importancia que impulsa las capas exteriores al espacio, pues la estrella es incapaz de sujetarlas gravitatoriamente. La gigante roja se ha convertido en una nebulosa planetaria, un nombre mal escogido porque nada tiene que ver con planeta alguno. Recibió ese nombre porque vista por telescopio tiene el aspecto de un anillo de humo.

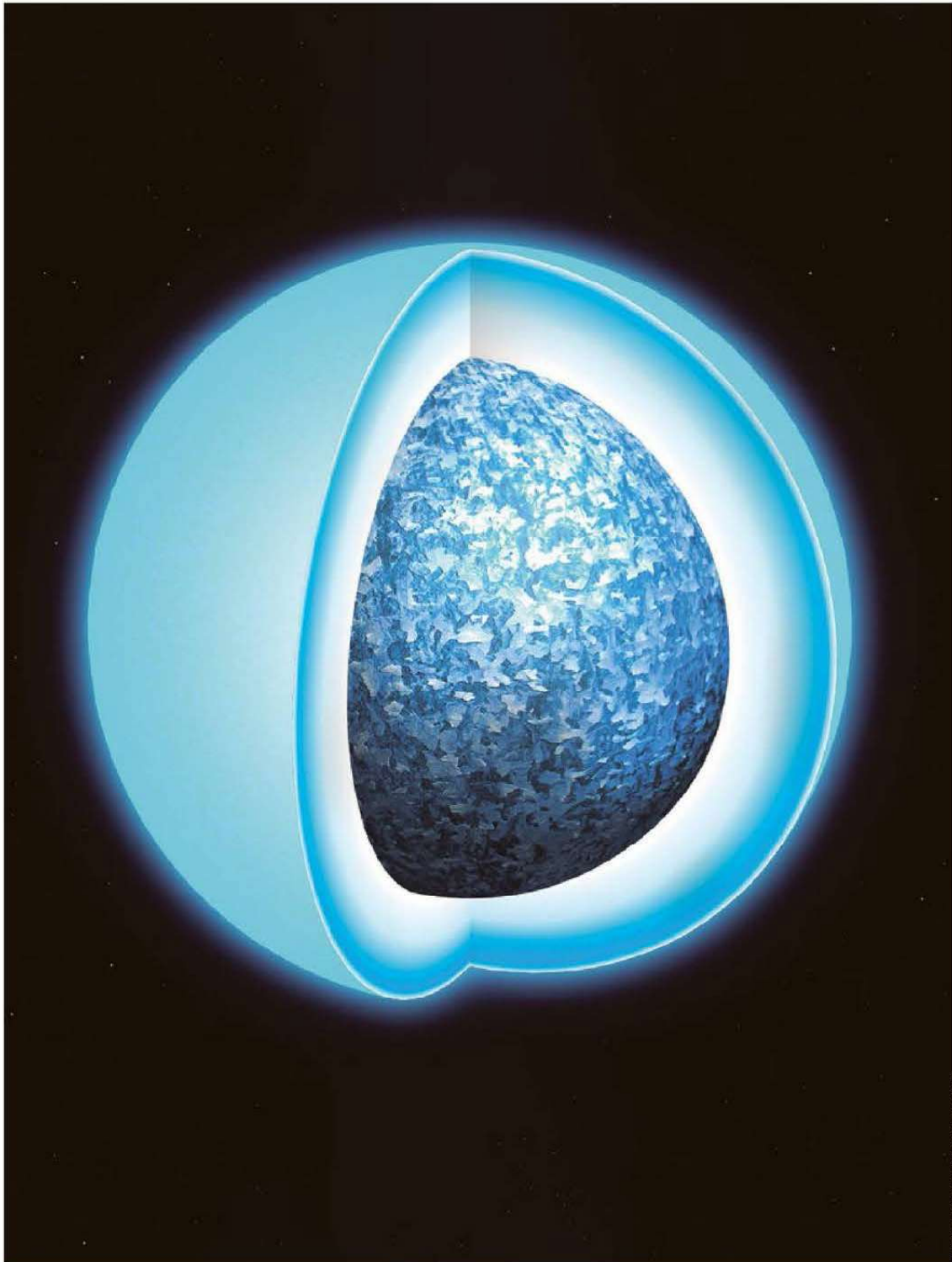
Lo que queda de la estrella es el núcleo, una enana blanca. En ella los átomos están dispuestos en una especie de estructura cristalina muy rígida de carbono y oxígeno rodeado por una atmósfera de hidrógeno y helio muy calientes, a 30 000 grados. Como la materia degenerada es muy buena conductora del calor, toda la estrella está a esa temperatura. Una enana blanca brilla porque está muy caliente. Y poco a poco, a lo largo de mil millones de años, se irá enfriando: del blanco pasará al rojo y de ahí al negro, convirtiéndose en una estrella oscura y muerta. Este es el futuro de nuestro Sol.

Sin embargo, si la estrella es muy masiva, su final es completamente diferente y muy complicado de predecir. Durante años se han desarrollado modelos computacionales para averiguar, en un proceso totalmente detectivesco, qué es lo que le sucede al final de sus días a una estrella muy masiva. Como no hay forma de observar lo que sucede dentro de una estrella, los astrofísicos tienen que echar mano de todo lo que sabemos de la física de la materia en las condiciones extremas del colapso catastrófico. Unas condiciones que dependen críticamente del tamaño y composición química de la estrella. Así que para poder describir lo que sucede vamos a fijarnos en una estrella de unas 25 veces la masa del Sol y que se encuentra en las fases finales de su vida.

En estos momentos la estrella se encuentra en la fase de supergigante roja, fusionando helio para obtener energía y dejando como residuo carbono y oxígeno. Se estima que se mantendrá así durante al menos medio millón de años, muy poco teniendo en cuenta que lleva brillando en el cielo unos seis millones de años. Cuando termine con el helio empezará a quemar carbono para producir neón, sodio y magnesio en un proceso que durará unos 200 años. Esto va a ser una constante en lo que queda de vida a la estrella: la reacción nuclear siguiente produce menos energía, en torno a la décima parte de la anterior, por lo que la estrella debe quemar más rápido su combustible para generar la energía necesaria para mantener su estructura.

A partir de la ignición del carbono todo empieza a ir cuesta abajo y sin frenos: agotado el carbono la quema del neón (que da oxígeno, aluminio, magnesio y fósforo) dura un año y después la del oxígeno (que produce silicio, azufre, argón y calcio) unos cuatro meses. En el momento en que comienza la fusión del silicio para producir hierro, níquel, cromo o cobalto, la suerte de la estrella está echada. El silicio desaparece en 24 horas dejando un núcleo esencialmente de hierro.

**ALREDEDOR DEL NÚCLEO DE HIERRO ESTARÁN
LAS DIVERSAS CAPAS DE QUEMA NUCLEAR DE
LOS ELEMENTOS QUE AÚN LE QUEDAN**

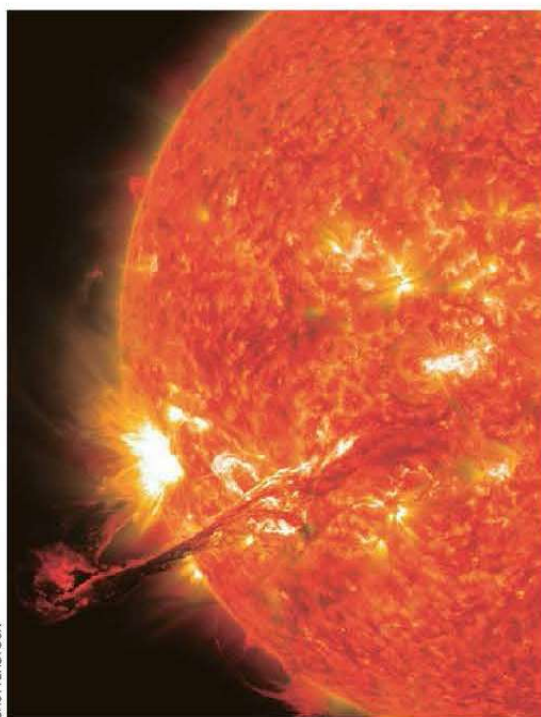


Las enanas blancas, remanentes estelares extremadamente densos, se enfrían lentamente durante miles de millones de años. Representación de la cristalización en una enana blanca

Esta es la peor noticia que puede recibir la estrella, pues el hierro es tremendamente estable. Eso implica que si quiere usarlo como combustible nuclear debe pagar un peaje: la fusión del hierro absorbe energía, cosa que no le conviene a la estrella. Lo único que puede hacer es apagar el fuego nuclear. Por supuesto, alrededor de este núcleo inerte de hierro estarán las diversas capas de quema nuclear de los elementos que aún le quedan, comenzando por una de silicio alrededor del núcleo, seguida de otra de neón y magnesio, otra de carbono y oxígeno, y otra de helio hasta terminar con la envoltura de hidrógeno. Sin embargo, este es un estado de cosas que no puede continuar por mucho más tiempo. De hecho, todo lo que sucede a continuación dura escasamente un segundo.

LA GRAVEDAD TOMA EL TIMÓN DEL DESTINO DE LA ESTRELLA

A la estrella no le queda otro camino que sucumbir ante su propio peso para poder extraer la energía que necesita para mantener su estructura. Es un proceso que la estrella conoce bien, porque lo ha hecho toda su vida: cuando se le



El plasma caliente del Sol genera un campo magnético que es fuente de energía para la vida en el planeta Tierra.

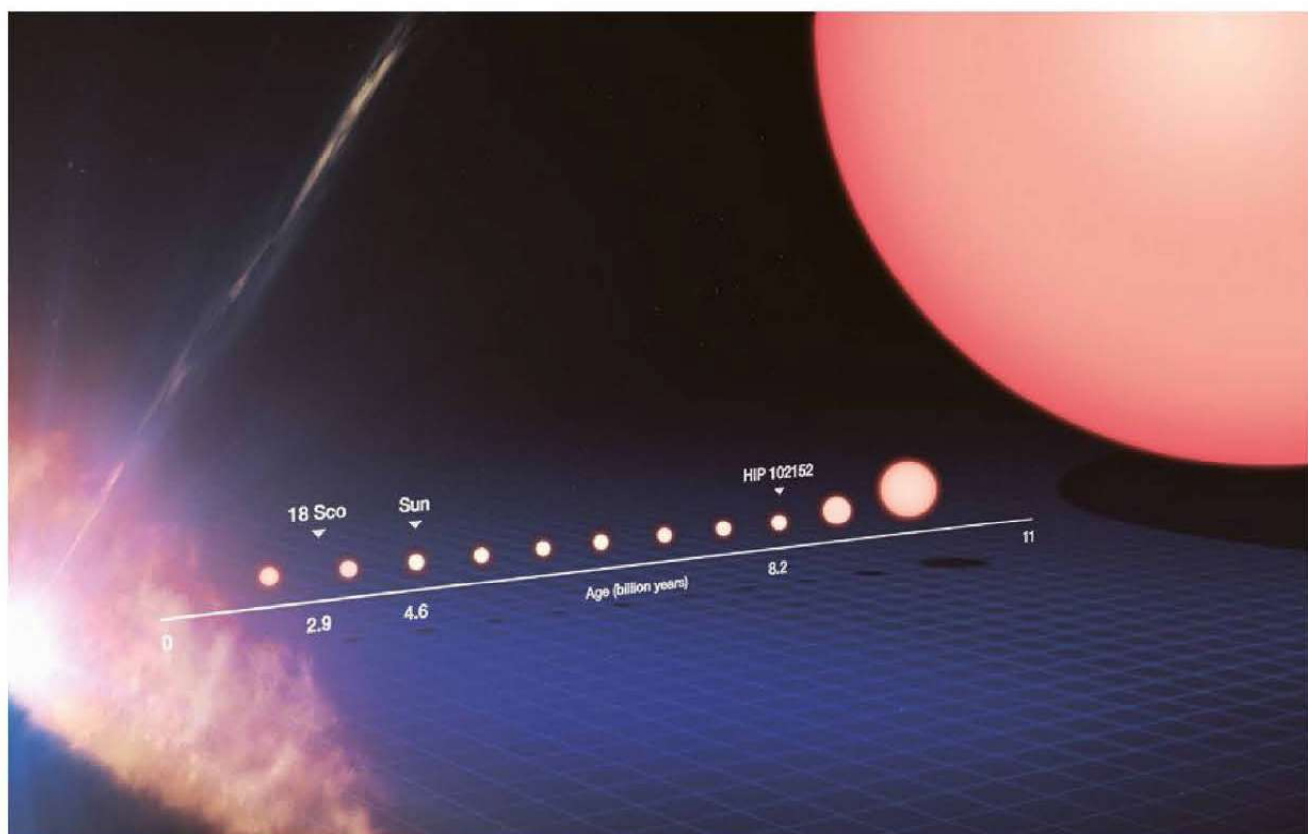
ha agotado el combustible, el núcleo empieza a contraerse, aumentando la temperatura, hasta que se alcanza la necesaria para que la basura nuclear se convierta en combustible y empiecen nuevas reacciones de fusión que proporcionen la energía suficiente para detener la contracción. Pero cuando tienes un núcleo de hierro... no hay nada que puedas hacer. La gravedad toma el timón del destino de la estrella y se hace cargo de manera catastrófica: en la treceava parte del tiempo que tarde el *airbag* del coche en abrirse, el núcleo se ve reducido de golpe al tamaño de una ciudad como Madrid.

Si el colapso por sí solo ya es catastrófico, hay dos consecuencias que lo convierten en una debacle monumental. La primera es el aumento de temperatura que conlleva, que alcanza los 500 millones de grados. A esta temperatura se crean

fotones de rayos gamma que al chocar con los núcleos de hierro, los descomponen en núcleos de helio, en un proceso que se llama fotodesintegración. Esta rotura roba energía a la estrella, enfriándola, y al hacerlo cae la presión del gas, acelerando el colapso. La segunda es que el colapso aumenta la densidad del núcleo. Al llegar a las 10 000 toneladas por centímetro cúbico, los electrones empiezan a juntarse con los protones de los núcleos de los átomos y se convierten en neutrones en un proceso que, cómo no, roba energía a la estrella. Para

colmo, esta reacción libera neutrinos, que escapan torrencialmente de la estrella. Los astrofísicos han calculado que esa energía que se llevan los neutrinos producidos en el centro de la estrella es cientos de millones de veces mayor a la que pierde en forma de luz. La cañería energética de la estrella está agujereada y la única forma que tiene para mantener su estructura es producir energía más rápido, acelerando las reacciones nucleares. Es la serpiente que se muerde la cola: la creación de neutrones roba energía de manera rápida e inexorable, hace que el núcleo colapse cada vez más rápido, aumentando la densidad, que dispara la creación de neutrones. Este drenaje de enormes cantidades de energía elimina los últimos vestigios de apuntalamiento de la estrella. La energía gravitacional que se libera como resultado del colapso del núcleo es igual a la luminosidad del Sol durante varios miles de millones de años.

¿No hay nada que detenga esta contracción? Cuando la densidad llega a unos inimaginables 100 millones de toneladas por centímetro cúbico, todos los núcleos atómicos se rompen y lo que queda es una sopa de neutrones y otras partículas subatómicas que tienen nombres tan singulares como el de piones. El núcleo de la estrella, que tendría que colapsar por acción de la gravedad, se soporta debido a la presión de degeneración. El peso de la estrella, que tiende a concentrar toda la masa en el centro, no vence porque dos partículas de materia no pueden estar en el mismo sitio al mismo tiempo. La parte más interna del núcleo de repente se vuelve rígida y la contracción se detiene abruptamente mientras el resto del núcleo sigue en su caída libre. Cuando este material choca contra el



Infografía que representa el recorrido de la vida de una estrella similar al Sol, desde su nacimiento (a la izquierda de la línea) hasta convertirse en una gigante roja (derecha).

LA LUZ QUE SE OBSERVA EN LA EXPLOSIÓN DE UNA SUPERNOVA ES SOLO ALREDEDOR DEL 1 % DE LA ENERGÍA TOTAL LIBERADA

centro degenerado es como chocar contra una pared irrompible: rebota y empuja hacia afuera el resto del material que todavía está cayendo, creando una onda de presión. Esto se llama rebote del núcleo.

LA EXPLOSIÓN DE UNA SUPERNOVA

El rebote hace que el núcleo se enfríe y, por tanto, disminuya la presión de manera significativa en aquellas regiones que lo rodean, lo que acelera la caída de material, que alcanza los 60 000 km/h. Y mientras cae, se encuentra con la onda de presión que llega del centro y que se mueve a una sexta parte de la velocidad de la luz. En solo una fracción de segundo, el material cambia de dirección y empieza a moverse hacia la superficie. La onda de presión se acelera a medida que se encuentra con las regiones menos densas de la estrella y alcanza una velocidad superior a la velocidad del sonido en las regiones exteriores: la onda de presión ahora se comporta como una onda de choque, que tarda unas horas en llegar a la superficie.

Se cree que la mayor parte del material de la estrella es empujado hacia afuera por esta onda de choque y es expulsado de la estrella a muchos miles de kilómetros por segundo. La energía liberada durante este evento es cien veces mayor que la producción total del Sol durante los últimos 4600 millones de años: es la explosión de supernova. Pero lo verdaderamente sorprendente es que la luz visible que se observa en la explosión es solo alrededor del 1 % de la energía total liberada durante el evento. Además, la explosión induce a que se produzcan nuevas reacciones nucleares en las que se forman todos los elementos más pesados que el hierro, como el estaño, el zinc, el oro, el mercurio, el plomo o el uranio.

Estudios recientes han propuesto que la explosión puede expulsar hasta el 96 % del material de la estrella que se utilizará en futuras generaciones de formación estelar. A esas nubes que contienen lo que queda de la explosión se llama remanente de supernova.

¿Y qué queda del núcleo? Con el desplome pasa de ser una densa bola de hierro a una esfera superdensa de neutrones de poco más de 20 kilómetros de diámetro; es como un gigantesco núcleo atómico, cien millones de millones de veces más denso que la Tierra. Por hacernos una idea: si tomáramos el lago Baikal en Siberia, que contiene el 23 % de todo el agua dulce de la Tierra, y lo comprimiésemos del mismo modo, cabría en el lavabo del baño. Eso es una estrella de neutrones. Pero las estrellas rotan, y al reducir su tamaño la velocidad de rotación se dispara, llegando a dar mil vueltas por segundo. En estas extraordinarias condiciones la luz que emite en cualquier rango del espectro electromagnético sale por los polos magnéticos de la estrella: lo que tenemos es un púlsar. Y si la masa del núcleo que queda tras la explosión es superior a las tres masas solares, lo que se forma es un agujero negro. ■





Año
7 000 000 000 d. C.:
el
fin
del mundo

SHUTTERSTOCK
Cuando llegue el fin del mundo, el Sol habrá evolucionado hacia la fase de gigante roja, expandiéndose dramáticamente y aumentando su luminosidad hasta hacer inhabitable nuestro hogar, el planeta Tierra.

De vez en cuando llaman a la puerta de casa los miembros de alguna secta milenarista atemorizándonos con la inminente llegada del fin del mundo. Siempre nos informan que solo los justos y los buenos se salvarán y, curiosamente, los únicos hombres buenos son, con toda justicia, ellos.

Podemos dormir tranquilos. No hay ningún motivo para presuponer que esos terribles cataclismos cósmicos con los que nos pretenden asustar vayan a suceder en un futuro cercano. Sin embargo, sí es cierto que el fin del mundo llegará sobre nosotros. Claro está, no se trata de algo inminente, sino de una hecatombe que tendrá lugar dentro de 7000 millones de años, día arriba, día abajo. El culpable de todo será, ironías de la vida, quien hoy nos da la vida.

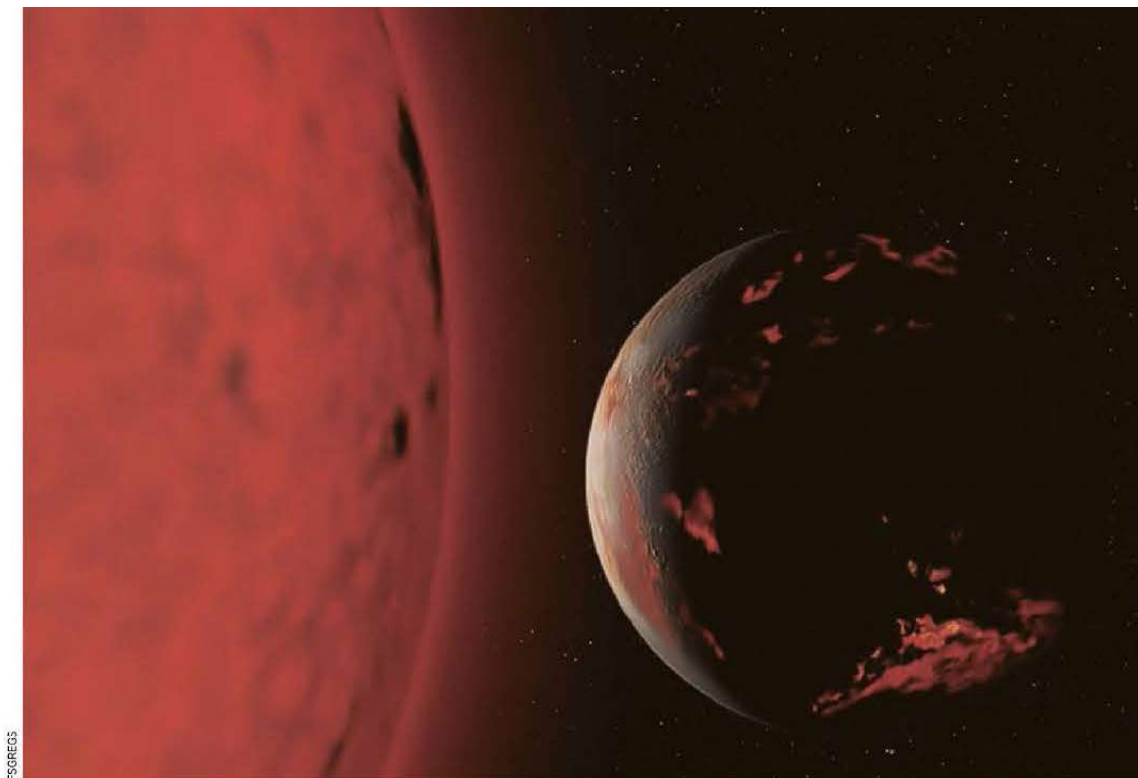
El Sol, esa inmensa bola de gas hidrógeno y helio, no siempre ha emitido la misma cantidad de energía que hoy: hace 4500 millones de años era un 30 % menos luminosa y dentro de 7000 millones será 10 veces más brillante.

SE SINCRONIZAN EL PERIODO DE ROTACIÓN CON EL DE TRASLACIÓN

El destino del Sol se conoce con bastante exactitud. Al igual que a los coches se les acaba el combustible, llegará el día en que se le terminará el hidrógeno en su centro, la zona del reactor de fusión. ¿Qué ocurrirá después? El núcleo se contraerá y la envoltura se expandirá lentamente. Y lentamente engullirá y volatilizará Mercurio, y engullirá y volatilizará a Venus. El calor liberado modificará totalmente el aspecto del sistema solar. No solo vaporizará los planetas interiores, sino que llevará la primavera al cinturón de Kuiper, un almacén de cometas, asteroides y planetoides en la órbita de Neptuno y al que pertenece Plutón. Durante la expansión, la superficie solar se irá haciendo cada vez más fría e irá adquiriendo una tonalidad rojiza. Lo que no se sabe es si alcanzará la órbita de la Tierra antes de detener su expansión. Para cualquier astrónomo extraterrestre, dentro de 7000 millones de años el Sol no será una pequeña estrella amarilla sino una gigante roja, una estrella que habrá entrado en los últimos millones de años de su vida: nuestro Sol será un anciano.

Si la Tierra sobrevive a la expansión nos encontraremos ante un infierno sin vida, brillando con un color rojo pálido. Una Tierra que siempre mostrará una de sus caras al Sol debido a un peculiar efecto gravitatorio a largo plazo llamado acoplamiento de marea, de manera que se sincronizan el periodo de rotación con el de traslación. En la parte del mundo iluminado por un Sol que cubre amenazante el cielo, pues será 250 veces más grande de lo que es hoy, la superficie estará a más de 2000 °C: un océano de magma y rocas vaporizadas en un aire inflamado por el calor. En la otra mitad de medianoche eterna las temperaturas son más difíciles de predecir: todo depende de si el planeta posee una atmósfera perceptible. En ese caso los débiles vientos transportarían el calor del hemisferio diurno convirtiendo

**DENTRO DE 7000 MILLONES DE AÑOS EL SOL
NO SERÁ UNA PEQUEÑA ESTRELLA AMARILLA,
SINO UNA GIGANTE ROJA**



Cuando el Sol se convierta en una estrella gigante roja hinchada, los océanos de la Tierra se evaporarán y se convertirá en un planeta de lava.

el lado oscuro en algo parecido a un tostador. Pero si por algún motivo no quedara una brizna de aire, el frío sería helador. El lugar más parecido es Mercurio, que con una débil atmósfera las temperaturas a mediodía alcanzan los $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ —se funde el plomo— y por la noche se desploman a $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las predicciones para la Tierra determinan que la zona oscura será aún más fría, alrededor de $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En un ambiente tan fantástico aparecen comportamientos climáticos exóticos. En el lado cálido, metales como el silicio, magnesio y hierro, junto con sus correspondientes óxidos, se evaporarán del océano de magma y pasarán a la atmósfera. En la insólita zona crepuscular, o terminador, que separa el día de la noche perpetuas, estos vapores condensarán: lloverá hierro y quizá nieve de monóxido de silicio, mientras que en el lado oscuro la nieve será de potasio y sodio. El frío allí será suficiente para congelar el dióxido de carbono, el dióxido de azufre y el argón formarán una inmensa capa bajo la cual podrá encontrarse hielo en estado puro, si es que todavía no se ha perdido toda el agua del planeta. Con suerte, en la zona crepuscular también podrá hallarse algo de agua líquida, triste recuerdo de quien en su día fuera conocido como el planeta azul.

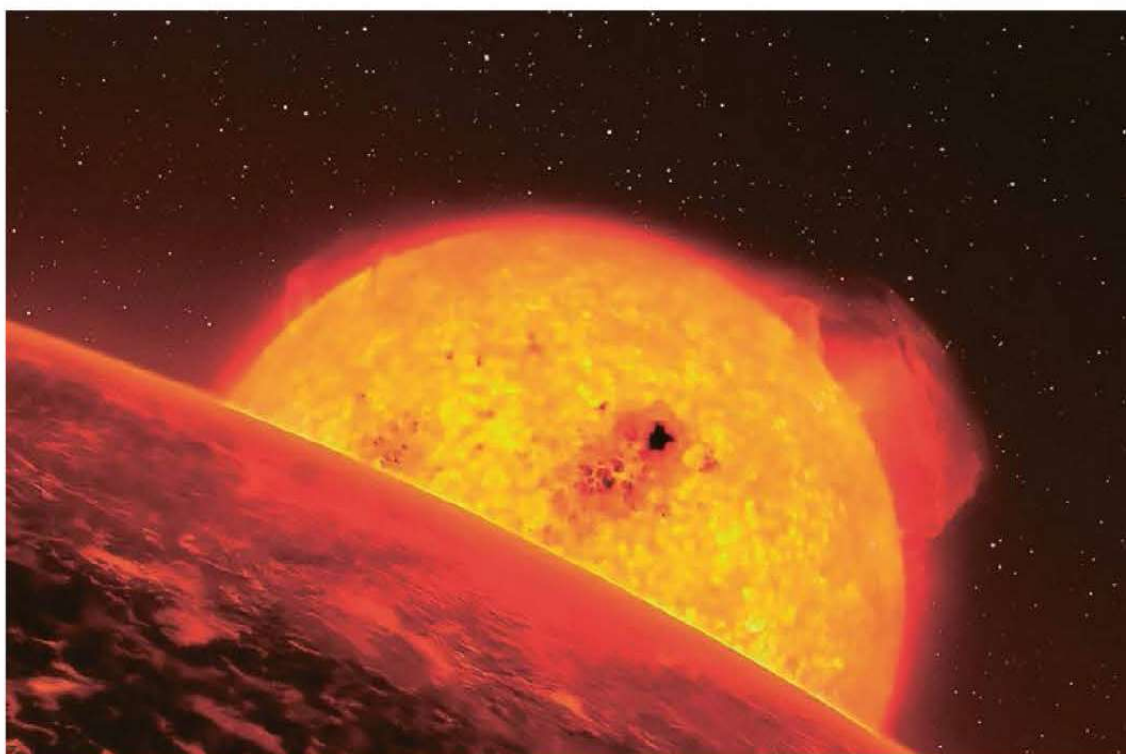
Al mirar el cielo desde los océanos de magma se observará un proceso extraordinario: las capas más externas de la estrella se irán perdiendo lentamente en el espacio en un proceso que durará varios millones de años para acabar formando una nebulosa planetaria. Los brillantes gases pasarán por nuestro planeta en lo que será un increíble espectáculo que durará millones de años y crearán una envoltura alrededor del sistema solar que acabará disipándose como un anillo de humo. Mientras, el núcleo del Sol se encogerá hasta convertirse en una enana blanca, tal y como predijo en 1931 el físico hindú Subrahmanyan Chandrasekhar: toda estrella con una masa inferior a una vez y media la masa del Sol acabará sus días como una estrella de carbono y oxígeno que se habrá contraído hasta alcanzar el tamaño de un planeta como el nuestro. La materia se encuentra tan comprimida que una sola cucharadita de enana blanca pesa más de una tonelada.

Por desgracia, es muy posible que nuestro planeta no pueda asistir a semejante espectáculo. Según los astrónomos Klaus-Peter Schröder, de la Universidad de Guanajuato (México), y Robert Cannon Smith, de la Universidad de Sussex (Inglaterra), cuando el Sol alcance su fase de gigante roja la Tierra será atraída lentamente en un movimiento espiral hacia él y se vaporizará.

Que la Tierra sea absorbida depende de la cantidad de materia que pierda el Sol. Como la gravedad que genera depende su masa, si la pérdida es significativa los planetas serán arrojados a órbitas más alejadas, de modo que la Tierra podría acabar en la posición que ocupa hoy Marte. Contra este alejamiento a posiciones más seguras lucharán las fuerzas de marea del propio Sol, que intentarán arrastrarla hacia él.

¿QUÉ SUCEDERÁ REALMENTE?

En 2001 un análisis realizado por Kacper Rybicki, del Instituto Polaco de Geofísica, y Carlos Denis, de la Universidad de Lieja, parecían dar a nuestro pobre planeta alguna oportunidad de sobrevivir. Sin embargo, Schröder y Smith creen que no la tendrá. Según sus cálculos, los más detallados hasta la fecha sobre la cantidad de masa que el Sol perderá durante la expansión, basados en las observaciones de seis gigantes rojas, cuanto más masa pierda el Sol mayor será el tamaño que alcance. Algo paradójico, pues es como si la superficie elástica de un globo se aflojara en lugar de tensarse. Sus modelos indican que el Sol perderá la tercera parte de su masa en su evolución a gigante roja en lugar de un cuarto como se creía hasta ahora. En definitiva, cuando el Sol alcance la fase de gigante roja será 256 veces más grande y 2730 veces más luminoso que hoy.



La Tierra comenzará a fundirse a medida de que el Sol, como gigante roja, se expanda y se acerque a la órbita de nuestro planeta.

LA EXTREMA REGULARIDAD DEL SISTEMA SOLAR NOS PUEDE LLEVAR A PENSAR QUE FUNCIONA COMO UN RELOJ

La calcinada Tierra, prácticamente inmersa en la cromosfera solar, producirá en ella algo parecido a un chichón de gas que seguirá a nuestro planeta en su órbita. El rozamiento resultante lo frenará y finalmente caerá hacia la estrella. Fin del viaje. Mientras, el inmutable Sol seguirá su camino hacia su muerte como enana negra.

Claro que también es probable que todo termine para la Tierra bastante antes. Si hay algo que somos capaces de hacer desde el tiempo de los babilonios es predecir los eclipses. La extrema regularidad del sistema solar nos puede llevar a pensar que funciona como un reloj, sin embargo esta idea no es del todo correcta. Desde hace varios siglos se sabe que el problema de los tres cuerpos ligados entre sí gravitatoriamente es irresoluble. Eso quiere decir que es imposible determinar con precisión el lugar donde se van a encontrar en un punto dado. Es más, el propio Isaac Newton se dio cuenta hace 300 años de que los tirones gravitacionales que los planetas se ejercen entre sí, aunque minúsculos, tienen una influencia no nula en las órbitas, como pequeños golpeteos que pueden cambiar las cosas de forma radical si se deja pasar el tiempo suficiente. Diferentes cálculos señalan que los planetas seguirán en sus órbitas por lo menos los próximos 40 millones de años. ¿Y después? No hay forma de saberlo. Estamos ante un ejemplo del conocido «efecto mariposa»: pequeñísimos errores en las observaciones actuales de las posiciones de los planetas significan enormes incertidumbres en sus situaciones futuras. A pesar de todo, cálculos realizados por Gregory Laughlin y Konstantin Batygin, de la Universidad de California, en Santa Cruz y por Jacques Laskar, del Observatorio de París, nos permiten vislumbrar qué puede llegar a suceder.

Y no es nada halagüeño; existe una probabilidad del 2 % de que la órbita de Mercurio se modifique debido a los tirones gravitacionales de Júpiter en los próximos 5000 millones de años, de modo que se acercará peligrosamente a Venus. Esto desestabilizará las órbitas de los planetas interiores y, posiblemente, las de todo el sistema solar: «Una vez que tenemos una configuración caótica, puede pasar de todo», dice Laughlin. Un planeta fácil de desestabilizar sería Marte debido a su baja masa —un 11 % la de la Tierra—, que podría chocar contra nosotros. Una colisión con el planeta rojo, además de aniquilar cualquier tipo de vida, haría brillar a la Tierra con una temperatura parecida a la de una gigante roja durante un millar de años.

Entre los distintos escenarios posibles obtenidos por los modelos desarrollados por estos investigadores encontramos algunos bastante catastróficos: en uno, dentro de 1300 millones de años Mercurio chocará con el Sol; en otro, Marte es escupido fuera del sistema solar tras 820 millones de años y, en otro, dentro de 40 millones de años chocarán Mercurio y Venus. ¿Qué sucederá realmente? Imposible saberlo, pero los astrónomos están convencidos de que hay un 98 % de posibilidades de que las cosas sigan como hasta ahora los próximos 5000 millones de años. Así que podemos esperar sentados en el jardín de casa el espectáculo de ver convertirse al Sol en gigante roja. Cuando eso ocurra, el único lugar seguro será, como mínimo, 6500 km más lejos de donde estemos. ■

3 grandes interrogantes sobre el universo

El universo sigue guardando secretos que nos intrigan: el enigma del litio que no coincide con las teorías del origen; la misteriosa materia que no podemos ver pero sostiene a las galaxias, y la gran pregunta de la vida y su origen.

ISTOCK



Materia oscura, energía oscura, universo plano, qué sucedió en el Big Bang... Muchos, y muy importantes, son los problemas a los que se enfrenta la cosmología. Pero de todos ellos hay tres especialmente llamativos, porque no se refieren a teorías físicas aún en debate, como pueden ser las que operaban en los primeros segundos de vida del Universo, sino a teorías perfectamente asentadas. A primera vista no parecen demasiado preocupantes, pero que vistos en detalle nos dicen que hay algo que se nos escapa...

Uno de ellos es la cantidad de litio que hay en el universo, ese que encontramos en las baterías de nuestros dispositivos electrónicos. Según los cálculos teóricos debería haber tres veces más del que observamos. ¿Por qué existe tal discrepancia?

EL PROBLEMA DEL LITIO FALTANTE

Cuando predecimos la cantidad de hidrógeno y de helio generado con la Gran Explosión lo hacemos francamente bien. Incluso con la cantidad de deuterio —un tipo de hidrógeno (isótopo) con un neutrón y un protón en su núcleo en lugar de solo un protón—. La teoría predice que por cada millón de núcleos de hidrógeno se formaron 25 núcleos de deuterio y las observaciones muestran que esta predicción es correcta dentro del 1,6 %. Pero con el litio la teoría falla estrepitosamente: predice que por cada diez mil millones de átomos de hidrógeno se formaron alrededor de cinco átomos de litio (estamos hablando de un isótopo de litio, Li7, que tiene tres protones y cuatro neutrones y es la forma más abundante de este elemento). Sin embargo, las mejores observaciones que tenemos muestran que hay menos de dos átomos de litio por cada diez mil millones de átomos de hidrógeno. Esto es conocido en cosmología como «el problema del litio faltante» y es una incógnita que plantea dudas sobre si sabemos lo que sucedió en el cosmos desde aproximadamente 10 segundos hasta 20 minutos después del Big Bang.

Por entonces el universo estaba muy caliente y se expandía con rapidez. Los electrones y fotones que se movían libremente por el espacio formaron un plasma con los primeros núcleos atómicos de hidrógeno, helio, litio y berilio. Desde entonces, y hasta que empezaron a brillar las primeras estrellas, la composición química del universo era así de sencilla.

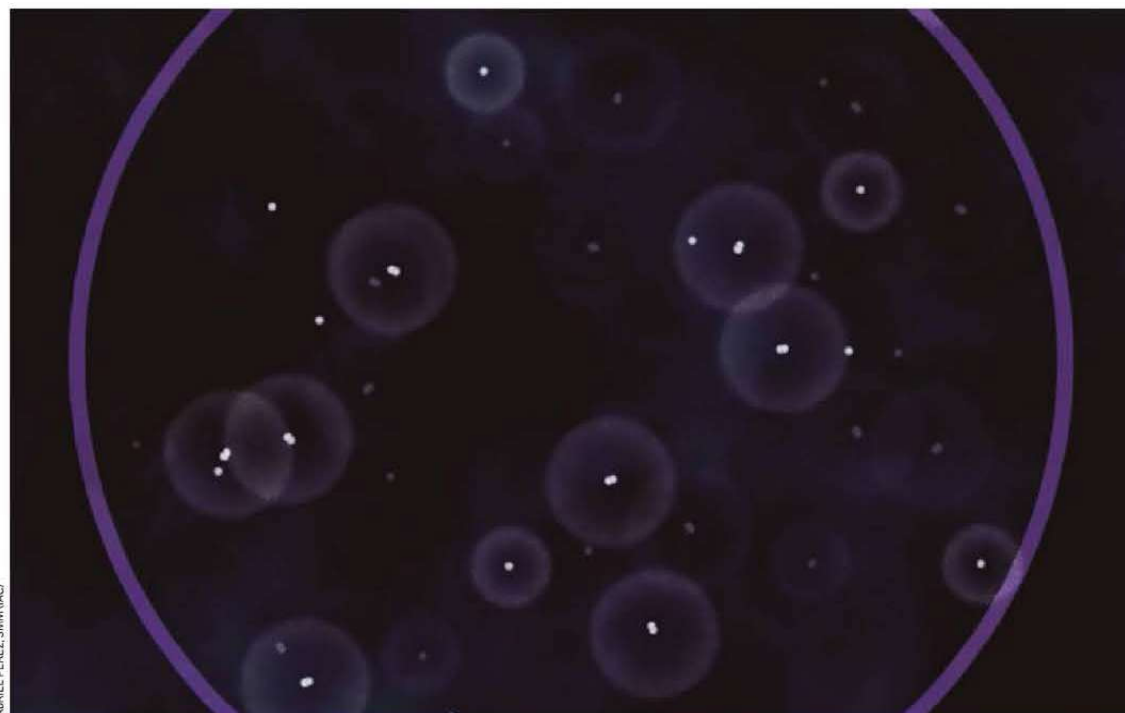
Hay diversos intentos de explicación a esta abultada discrepancia. Algunos afirman que el origen de la discrepancia está en otro sitio, en la forma que tenemos de contabilizar la cantidad de litio presente en las estrellas antiguas. Los astrónomos la calculan usando un método muy simple: observando la intensidad de sus líneas espectrales, las huellas dactilares que dejan los elementos químicos en la luz de las estrellas. A partir de ellas se puede deducir la abundancia que tiene un elemento químico: cuanto más intensa es, mayor es la cantidad que hay. Pues bien, según

**LA TEORÍA PREDICE QUE POR CADA
MILLÓN DE NÚCLEOS DE HIDRÓGENO
SE FORMARON 25 NÚCLEOS DE DEUTERIO**

un equipo de astrónomos liderado por Andreas Korn de la Universidad de Uppsala (Suecia), estas mediciones pueden inducir a error porque sus observaciones han demostrado que la proporción de litio presente en la atmósfera de las estrellas va descendiendo a medida que envejecen, pues este se hunde en el interior por acción de la gravedad. Es como la papada en los seres humanos: con el tiempo la gravedad tira de la cara hacia abajo para acabar formando el clásico «cuello de gallo». Y si el litio desaparece en el interior de la estrella, las líneas espectrales de su atmósfera no reflejan la cantidad real que existe en ella.

Hay otros teóricos que miran hacia otro lado, hacia la física de partículas. En particular hay que fijarse en las teorías que van más allá del llamado Modelo Estándar, que describe el comportamiento de las partículas elementales y sus interacciones. En este modelo las partículas se dividen en dos grandes grupos, bosones y fermiones, que tienen características muy diferentes. Por ejemplo, puedes poner todos los bosones que quieras en un mismo lugar del espacio, pero solo puede poner un fermión (nosotros seríamos fermiones, pues nadie puede ocupar el lugar en el que nosotros estamos al mismo tiempo). Esta diferencia es algo que incomoda a los físicos teóricos pues les gustaría que todo fuera más sencillo, más simétrico, y poder unificar fermiones y bosones bajo una única formulación. Para ello en la década de 1980 desarrollaron una nueva teoría: la supersimetría. Como consecuencia, apareció todo un conjunto de nuevas partículas, llamadas a la sazón partículas supersimétricas o s-partículas, que son el compañero que toda partícula ordinaria tiene; sería algo así como tener un mellizo oculto y que todavía no hemos detectado.

¿Y qué tiene que ver todo esto con la abundancia de litio en el universo? La idea básica es que sí, como creemos, el litio se originó a partir de un isótopo inestable del berilio formado después del Big Bang, si tenemos una s-partícula que suprime



ABRIEL PÉREZ, SMW (UAC)

El litio-7 fue uno de los tres elementos ligeros sintetizados durante la nucleosíntesis primordial en los primeros minutos después del Big Bang, junto con el hidrógeno y el helio.

la formación de berilio... ¡bang!, el problema del litio desaparece. También otra posibilidad es que haya una s-partícula que reaccione con el berilio, provocando su desintegración en dos isótopos del helio y no acabe derivando al litio. Esta idea tiene la ventaja de que reduce la abundancia de litio sin alterar las proporciones de hidrógeno a helio, pues esta imaginaria partícula aumentaría la abundancia de helio solo en una cantidad minúscula. Además, esta idea funciona bien si esta partícula mágica no vive demasiado y se desintegra en algo así como una hora. Pero ¿dónde está esa misteriosa y mágica s-partícula? En los modelos más allá del Modelo Estándar: el axión, una partícula postulada en 1977 y que es uno de los candidatos exóticos para explicar la materia oscura. Se han hecho muchos esfuerzos por detectarla, pero por ahora sigue en el limbo de los perdidos.

¿POR QUÉ HAY MATERIA EN EL UNIVERSO?

La cosa no queda aquí. Un grupo de investigadores del Instituto Astrofísico de Andalucía afirma que el litio que no se produjo en la nucleosíntesis primordial,⁰ se formó en las novas, unas explosiones que se producen en enanas blancas. Al parecer, en esos estallidos se generan enormes cantidades de berilio-7, que decae y se transforma en litio pasados poco más de 50 días. A la luz de este descubrimiento los astrónomos españoles apuntan que a que parte del litio que hay en el universo podría haberse generado en las novas, que aparecen cuando en un sistema binario de estrellas una de ellas es una enana blanca y arranca parte de las capas exteriores de su compañera: entonces la enana blanca estalla en una llamarada termonuclear con la que incrementa su brillo hasta en 100 000 veces.



La existencia de berilio-7 ya se había documentado en otra nova, pero la medición de la cantidad de litio que se produciría a partir de él en la nova Sagittarii 1015 N.2 resultó sorprendente.

EL CAMBIO EN LA PARIDAD OBLIGARÍA AL ANTIELECTRÓN A TENER INTERCAMBIADOS SUS POLOS NORTE Y SUR RESPECTO AL ELECTRÓN

Como podemos ver, a pesar de todos los esfuerzos por resolverlo, el universo todavía tiene un problema de litio.

El segundo problema está relacionado con la propia existencia de la materia: ¿Por qué hay materia en el universo? Puede parecer una pregunta tonta, pero es uno de los mayores retos con los que se enfrenta el modelo de la Gran Explosión. ¿Por qué? Todo tiene que ver con la antimateria y para entenderlo debemos retroceder casi un siglo en el tiempo, a octubre de 1927, y acercarnos al Instituto de Fisiología de Bruselas, donde se celebraba el quinto Congreso Solvay con el título «Electrones y Fotones». Iba a ser el más importante de la historia de la física:

17 de los 29 asistentes (se acudía exclusivamente por invitación) eran o iban a ser premios Nobel.

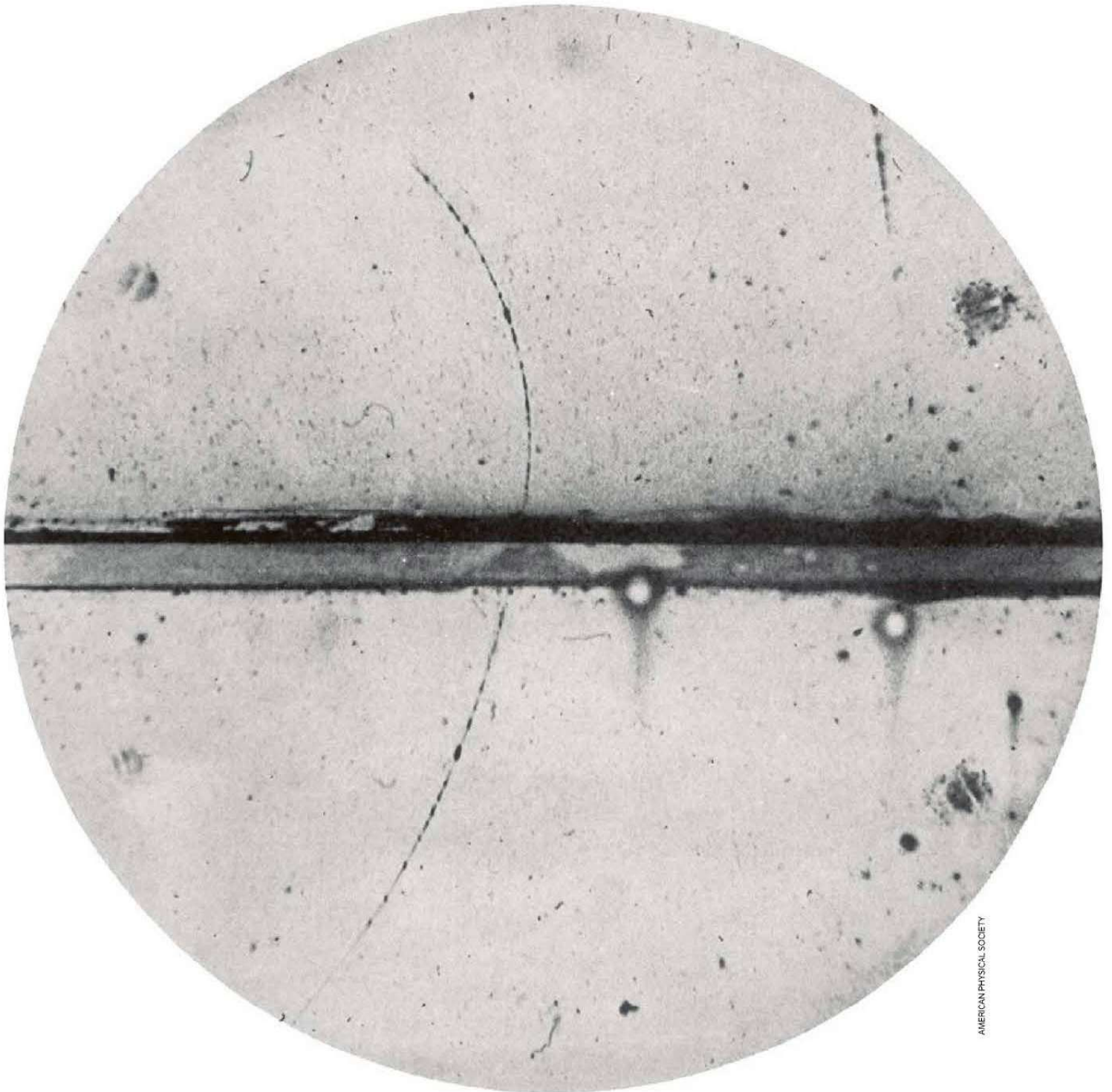
A esta mítica reunión acudió Paul Adrien Maurice Dirac, un joven físico inglés extremadamente callado y taciturno (sus amigos acuñaron el *dirac* como la unidad mínima de palabras que se pueden decir en una conversación), que trabajaba en solitario todos los días de la semana excepto el domingo, que salía a pasear... solo. Estaba obsesionado con poder unificar las dos grandes teorías de la física de principios del siglo XX: la teoría cuántica y la relatividad especial de Einstein. Durante dos años lo había intentado y fracasado, pero tras el congreso de Bruselas decidió que este sería el objetivo de su vida en los próximos años. Y lo consiguió. Gracias a un uso creativo de las matemáticas, Dirac obtuvo la primera ecuación que unificaba am-



Paul Dirac predijo la existencia de la antimateria al reconciliar la teoría cuántica con la relatividad especial.

bas teorías. Para sorpresa de Dirac, de su preciosa ecuación aplicada al electrón salió que el electrón podía estar en unos misteriosos estados de energía negativa. Esto significaba que el electrón podía saltar de su estado normal de energía positiva y carga eléctrica negativa a otro de energía negativa y carga eléctrica positiva. ¿Qué demonios era eso? Después de cuatro años devanándose la cabeza, Dirac afirmó que esas misteriosas soluciones correspondían a un nuevo tipo de partícula que tenía la misma masa que el electrón pero con carga positiva. Al

**LA CARACTERÍSTICA MÁS IMPORTANTE DE LA
ANTIMATERIA ES QUE SI SE ENCUENTRA CON
UNA PARTÍCULA DE MATERIA, SE ANIQUILAN**



Fotografía de la cámara de niebla que capturó el primer positrón observado, tomada por Carl D. Anderson en 1932. Esto le valió el premio Nobel de Física en 1936.

año siguiente, en 1932, un joven profesor norteamericano de 27 años, Carl David Anderson, encontraba esa misteriosa partícula en sus experimentos con los rayos cósmicos: acabábamos de descubrir la antimateria.

Para entenderla debemos tener en cuenta que los físicos distinguen una partícula de otra del mismo modo que nosotros distinguimos una fruta de otra, por sus propiedades: tamaño, color, olor y sabor. En el caso de las partículas subatómicas tenemos que referirnos a características como la masa, la carga, el momento angular y el momento magnético. Las dos primeras son fáciles de entender pero no así las dos segundas. Podemos asimilar momento angular a una rotación y momento magnético a que las partículas, supuestas esféricas, se comportan como la Tierra, con un polo norte y un polo sur magnéticos. Entonces, ¿qué sería un antielectrón? Primero, tiene invertida la carga, es positiva en lugar de negativa. Y lo mismo que ocurre cuando vemos girar un balón en el espejo, también su rotación, el momento angular, está invertido. A esto se le llama inversión de la paridad. Este cambio en la paridad obligaría al antielectrón a tener intercambiados sus polos norte y sur magnéticos respecto al electrón, pero como la carga también está invertida el momento magnético no cambia. Por tanto, el antielectrón, que recibe el nombre de positrón, es como el electrón pero con la carga y el momento angular invertidos. Lo mismo ocurre con el protón y su correspondiente antiprotón, pero no con el neutrón. El neutrón no tiene carga, por tanto la única inversión posible es la de paridad, lo que obliga a que su momento magnético (sus polos magnéticos) están cambiados respecto al antineutrón, y esta es la única forma que tienen los físicos de distinguirlos. De este modo tenemos las tres antipartículas necesarias para construir la antimateria. En nuestro caso, un antiprotón y un positrón formarían el átomo de antihidrógeno.

ALGO FALLA EN LA TEORÍA

La característica más importante de la antimateria es que si se encuentra con una partícula de materia, se aniquilan. Toda su masa se convierte en energía siguiendo la fórmula más famosa de la historia, $E = mc^2$. Y al revés: si tenemos energía suficiente podemos crear un electrón y un positrón, o un protón y un antiprotón. Y esto es lo que observamos siempre: una creación de pares, una partícula y su correspondiente antipartícula.

Aquí es donde entra en juego la cosmología. Con las leyes de la física en la mano, con el Big Bang tuvo que crearse tanta materia como antimateria. Pero, claro, si este 50-50 hubiera sido exacto toda la materia se habría aniquilado completamente con su correspondiente en antimateria. Y estamos aquí, ¿no? Algo debe fallar en nuestra teoría...

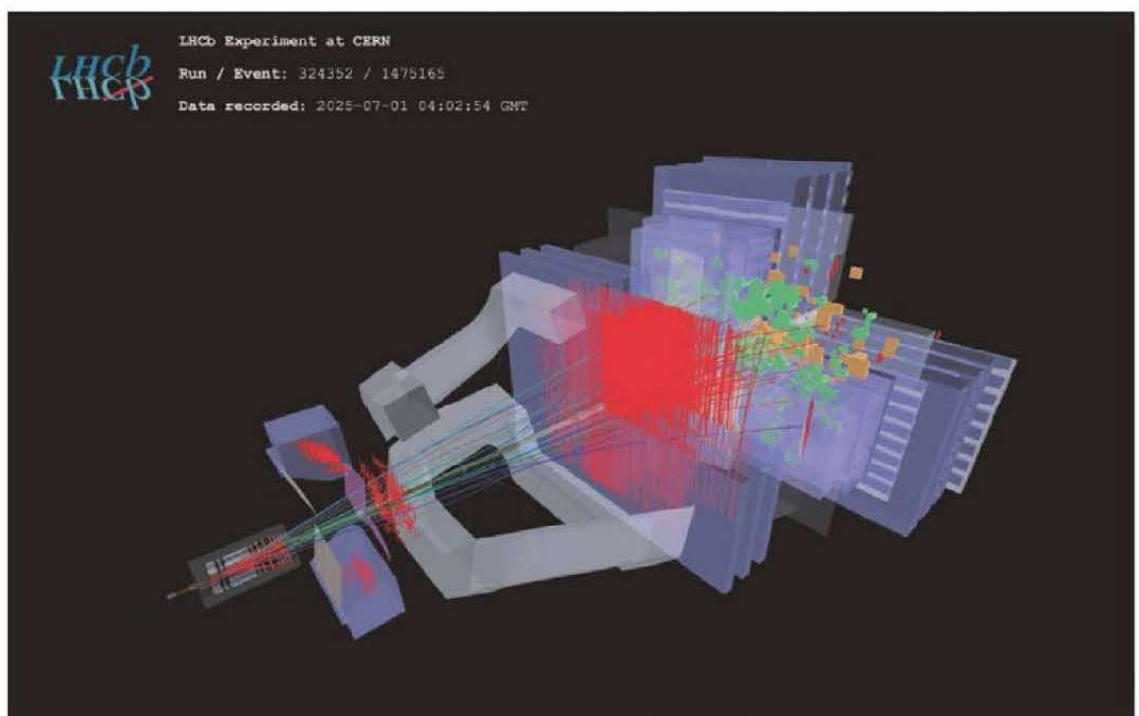
Ante semejante problema solo caben dos soluciones: primera, que nuestro universo está dividido en dos mitades, una con estrellas y planetas y la otra con antiestrellas y antiplanetas. Esta opción tiene un grave inconveniente. La frontera entre ambos universos sería una continua explosión de energía visible para nuestros telescopios espaciales de rayos gamma, algo que no se observa. La única opción posible es que ese 50-50 no fuera exacto, sino que hubo un pequeñísimo exceso de materia, alrededor de mil millones de antipartículas frente a mil millones y una de materia. De dónde vino ese exceso es algo que preocupa a los físicos desde hace más de medio siglo.

En 1967 el soviético Andréi Sájarov —el famoso disidente y padre de la bomba H rusa— demostró que la única forma de eludir este problema era que no se cumpliera la llamada simetría CP. Esta asegura que si a una partícula intercambiamos simultáneamente su carga (positiva por negativa) y su paridad (derecha por izquierda) se sigue comportando de la misma manera. Solo si esto no sucedía, razonaba Sájarov, podremos justificar que haya más materia que antimateria en el universo. Por entonces era impensable que Sájarov estuviera en lo cierto pues todos los físicos estaban convencidos de que, como dicen ellos, el universo es invariante bajo CP. Pero de finales de la década de 1960 a mediados de la de 1970 se demostró que la simetría CP no se cumplía a rajatabla, y en julio de 2025 el experimento LHCb realizado en el CERN en Ginebra puso de manifiesto un proceso increíblemente raro y jamás observado en un acelerador: la violación de la simetría CP en la desintegración de *beauty-lambda* Λ_b , un «pariente» pesado de los protones y neutrones. Es la primera evidencia de que el universo prefiere la materia a la antimateria. Por desgracia, si las cosas fueran como dice este experimento, en el universo solo habría materia suficiente para hacer una galaxia.

Se necesita encontrar otra causa que permita explicar por qué el universo está plagado de estrellas.

La existencia de la materia nos tiene guardado otro gran enigma, esta vez casi más filosófico que científico: ¿Por qué está tan finamente ajustado el universo? Esto es, ¿por qué parece que las constantes físicas del universo están perfectamente afinadas para permitir la existencia de la vida?

Entre quienes más han trabajado este tema se encuentra uno de los mejores astrofísicos del siglo pasado, el inglés Fred Hoyle. Encontró que para que el átomo de carbono fuera estable y no se desintegrara —lo que sería un desastre para la



Representación 3D del detector LHCb del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. El LHCb está especializado en el estudio de partículas que contienen *quarks beauty* (quarks b).

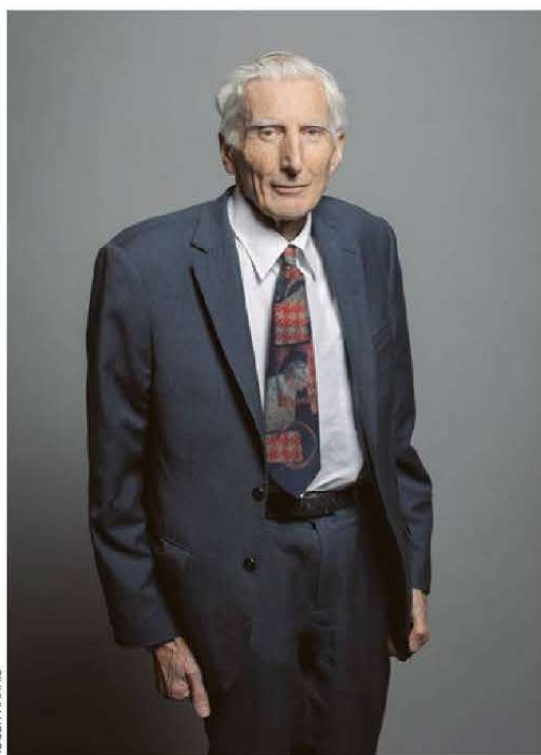
¿POR QUÉ PARECE QUE LAS CONSTANTES FÍSICAS DEL UNIVERSO ESTÁN AFINADAS PARA PERMITIR LA EXISTENCIA DE LA VIDA?

existencia de vida— tuvieron que darse un importante número de casualidades a escala atómica. Esto lleva a plantearnos una inquietante pregunta: ¿Por qué las constantes físicas fundamentales tienen el valor que tienen y no otro? Ahora bien, la cuestión de fondo no es que tengan el valor que medimos, sino que justamente ese valor (y aparentemente no puede ser cualquier otro) es el que permite la apa-

rición de vida en el universo. Dicho más claramente: si la carga del electrón o la velocidad de la luz no valieran lo que valen, probablemente la vida en el universo sería imposible.

Y esto trae de cabeza a los físicos teóricos.

Martin Rees, astrónomo real de Gran Bretaña, ha escrito profusamente sobre cómo parece que todo en el universo es muy sensible a los valores que pueden tomar las aparentemente arbitrarias e inconexas constantes naturales, como pueden ser la intensidad de la fuerza de la gravedad, la velocidad de expansión del universo o el número de dimensiones espaciales del mundo en que vivimos. Esto ha conducido a formular el llamado principio antrópico fuerte: el universo debe tener las propiedades necesarias que permitan la aparición de vida e inteligencia en alguna de sus etapas.



ROGER HARRIS

Lord Martin John Rees es una de las figuras más destacadas de la cosmología y astrofísica en la actualidad.

PRINCIPIO ANTRÓPICO COMPLETAMENTE RIDÍCULO

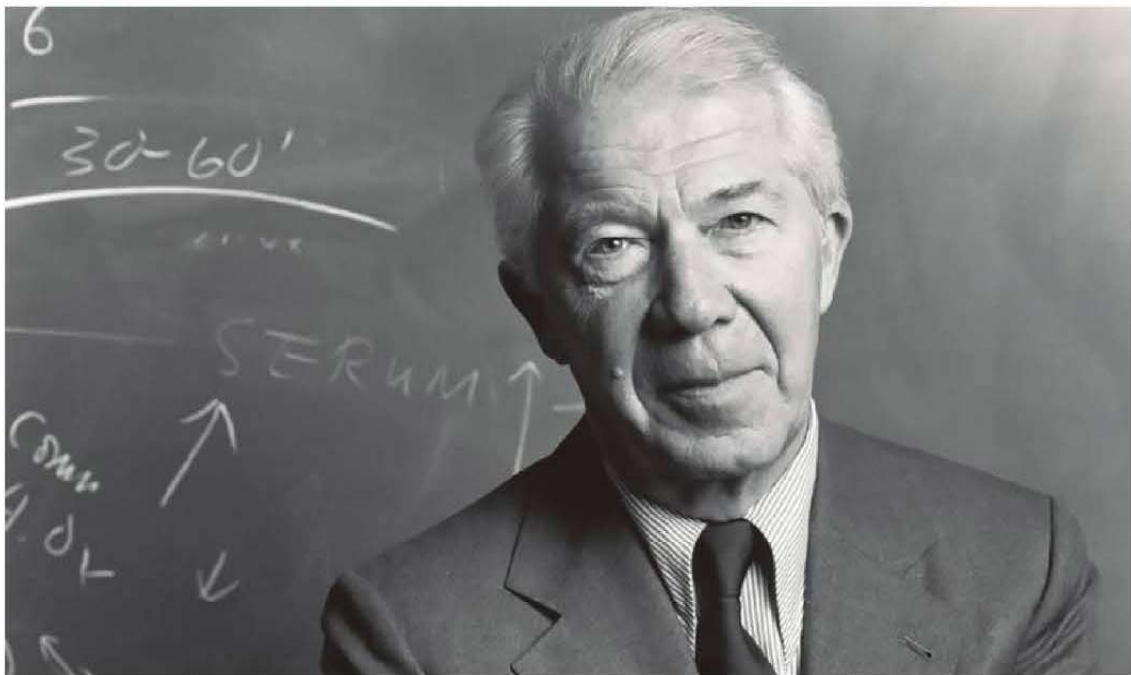
Claro que otros científicos van aún más lejos. Los físicos John Barrow y Frank Tipler crearon la teoría del Punto Omega, según la cual la evolución de la vida inteligente, caracterizada por dedicarse a almacenar cada vez mayor cantidad de información, en un futuro tomará el control de todo el universo: es el llamado principio antrópico final. Ni qué decir que muchos científicos menosprecian esta idea que han calificado como PACR, principio antrópico completamente ridículo.

Otros se sienten intrigados por el aparente empeño de la naturaleza en aumentar su complejidad y autoorganizarse. Uno de los fundadores de la ciencia de la

EL ORIGEN DE LA VIDA NO ERA ACCIDENTAL, SINO EL RESULTADO DE LAS LEYES MÁS BÁSICAS DE LA NATURALEZA

complejidad, Stuart Kaufmann, ha llegado a la conclusión de que esa propensión a la autoorganización es un atributo básico de la materia misma, que esa misteriosa fuerza que impele la aparición de sistemas cada vez más complicados puede explicar la velocidad a la que la evolución opera para llevar organismos y ecosistemas enteros a niveles de complejidad cada vez más improbables: «Debe haber algo parecido a una cuarta ley (de la termodinámica), una tendencia a la autoconstrucción de biosferas cada vez mayores», comenta Kaufmann. Su idea es que la segunda ley, que establece que el desorden de un sistema cerrado siempre crece, es importante pero no decisiva.

Para el desaparecido bioquímico y premio Nobel Christian de Duve, uno de los pensadores más creativos a la hora de unificar biología y cosmología, el origen de la vida no era accidental, sino el resultado de las leyes más básicas de la naturaleza: «La vida y la mente no emergen como resultado de accidentes aleatorios, sino como una manifestación natural de la materia». Y no solo eso. Para De Duve la consciencia es una expresión del cosmos tan fundamental como la propia vida. Por su parte, el físico y matemático Freeman Dyson elevaba a ley natural la tendencia de la consciencia a ejercer un control cada vez mayor sobre la materia inanimada y, siguiendo la estela de Barrow y Tipler, cree que esta desempeñará un papel clave en el destino final del cosmos.



Sobre estas líneas, el citólogo y bioquímico inglés Christian de Duve, profesor emérito de la Universidad Rockefeller y uno de los pioneros de la biología celular moderna.

Pero también hay otros científicos que van por otro camino. Para el experto en gravitación cuántica Lee Smolin todo el universo que nos rodea es producto de un proceso evolutivo que funciona a la mayor escala posible. Según Smolin, nuevos universos-bebés nacen en el interior de los agujeros negros gracias a los big bangs que suceden allí dentro de manera natural. Ahora bien, las constantes y leyes de la física varían sutilmente de un universo-bebé a otro siguiendo un proceso de selección natural que favorece la «reproducción» de aquellos universos que generan más universos-bebés. O lo que es lo mismo, favorece universos en los que haya estrellas que acaben sus vidas como agujeros negros. Para Smolin la vida no es más que un subproducto del verdadero objetivo de las leyes naturales: producir universos con agujeros negros. Lo que pasa es que, casualmente, el valor de las constantes universales que implican la existencia de muchos agujeros negros coincide justamente con el valor que deben tener para que nuestro universo rebose vida. Somos un «daño colateral».

Pero quien más ha reflexionado sobre este asunto es un curioso personaje que ha sido actuario judicial y senador por Oregón, James N. Gardner. Su idea

central es la hipótesis del biocosmos egoísta, una versión a escala cósmica de la hipótesis del gen egoísta de Richard Dawkins. Para Gardner nuestro universo, tan bien diseñado para albergar la vida, no es otra cosa que el resultado de la evolución de una larga serie de universos anteriores, donde cada uno ha sido cada vez más «amigable» para la vida. Estamos ante una versión evolutiva del principio antrópico fuerte. Si así fuera, debería existir una especie de código genético cósmico que evolucionaría siguiendo la selección natural...

Rizando el rizo, teóricos como Louis Crane proponen un principio medusa-antrópico según el cual una inteligencia muy evolucionada —¿nuestros lejanos descendientes?— podría insuflar



Representación artística de un agujero negro acretando materia desde un disco circunestelar.

vida al universo, no por el deseo de llenarla de tal, sino porque crearía nuevos agujeros negros y conseguiría a partir de ellos la energía necesaria para vivir.

Es aquí donde la idea de la existencia de múltiples universos viene como anillo al dedo: como hay muchos universos, cada uno con sus valores de las constantes físicas definidos, nosotros vivimos en uno donde casualmente las constantes tienen la magnitud permiten la existencia de vida. Porque si no, obviamente, no estaríamos aquí. ■

BIBLIOGRAFÍA

- ❑ ANGULO, JESÚS, *Las veinte mil caras de Julio Verne. Una aproximación a las relaciones entre el cine y su obra*, Zaragoza, Festival de Cine de Huesca-Diputación de Huesca, 2003.
- ❑ BATTANER LOPEZ, EDUARDO, *Física de las noches estrelladas*, Barcelona, Booket, 2015.
- ❑ BINNEY, JAMES JEFFREY, *Astrofísica. Una breve introducción*, Santiago de Chile, Ediciones UC, 2020.
- ❑ CLEGG, BRIAN, *Dark Matter and Dark Energy: The Hidden 95% of the Universe*, Londres, Icon Books, 2019.
- ❑ COX, BRIAN EDWARD y FORSHAW, JEFFREY ROBERT, *Black Holes: The Key to Understanding the Universe*, Londres, HarperCollins, 2022.
- ❑ CROSWELL, KEN, *The Alchemy of the Heavens. Searching for Meaning in the Milky Way*, Nueva York, Doubleday, 1995.
- ❑ CROSWELL, KEN, *The Lives of Stars*, Honesdale (PA), Boyds Mills Press, 2009.
- ❑ DOMÍNGUEZ AGUILERA, MARÍA INMACULADA, *Supernovas. La muerte de las estrellas*, Barcelona, RBA, 2019.
- ❑ GRIBBIN, JOHN R., *Galaxies: A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2008.
- ❑ HATHAWAY, NANCY, *El universo para curiosos*, Barcelona, Booket, 2012.
- ❑ HOGAN, CRAIG J., *El libro del Big Bang*, Madrid, Alianza Editorial, 2005.
- ❑ KINNEY, WILLIAM HENRY (WILL), *An Infinity of Worlds: Cosmic Inflation and the Beginning of the Universe*, Cambridge (MA), MIT Press, 2023.
- ❑ KIPPENHAHN, RUDOLF, *Cien mil millones de soles. Estructura y evolución de las estrellas*, Barcelona, Salvat, 1993.
- ❑ KRAUSS, LAWRENCE MAXWELL, *Lo que sabemos que no sabemos: los misterios no resueltos del cosmos*, Madrid, Editorial Pasado Presente, 2023.
- ❑ KIRSHNER, ROBERT P., *El universo extravagante*, Madrid, Siruela, 2006.
- ❑ LEVIN, JANNA, *Cómo sobrevivir a un agujero negro*, Madrid, Editorial Pasado y Presente, 2017.
- ❑ MACK, KATHERINE J. (KATIE), *The End of Everything (Astrophysically Speaking)*, Nueva York, Scribner, 2020.
- ❑ MANRIQUE CASTAÑO, DANIEL, *Fundamentos de cosmología, la ciencia del universo*, Córdoba, Guadalmazán, 2024.
- ❑ MEE, NICHOLAS, *The Cosmic Mystery Tour: A High-Speed Journey Through Space & Time*, Oxford, Oxford University Press, 2019.
- ❑ MERSINI-HOUGHTON, LAURA, *Before the Big Bang*, Londres, Bodley Head, 2022.
- ❑ PAGE, LYMAN, *The Little Book of Cosmology*, Princeton, Princeton University Press, 2020.
- ❑ PANEK, RICHARD, *The 4 Percent Universe*, Nueva York, Houghton-Mifflin-Harcourt, 2011.
- ❑ POTTER, CHRISTOPHER, *Usted está aquí. Una historia del universo*, Barcelona, Crítica, 2018.
- ❑ RANDALL, LISA, *La materia oscura y los dinosaurios*, Barcelona, Acantilado, 2016.
- ❑ REES, MARTIN J., *Just Six Numbers*, Nueva York, Basic Books, 1999.
- ❑ SAGAN, CARL EDWARD, *Cosmos*, Barcelona, Planeta/Crítica, 2020.
- ❑ SEEDS, MICHAEL A. y BACKMAN, DANA, *Horizons: Exploring the Universe*, Boston, Cengage Learning, 2018.

❑ SPARKE, LINDA S. y GALLAGHER, JOHN S. III, *Galaxies in the Universe: An Introduction* (3.ª ed.), Cambridge, Cambridge University Press, 2020.

❑ THORNE, KIP STEPHEN, *Agujeros negros y tiempo curvo*, Barcelona, Crítica, 2019.

❑ TYSON, NEIL deGRASSE, *Astrofísica para jóvenes con prisa*, Barcelona, Paidós, 2022.

❑ TYSON, NEIL DE GRASSE; STRAUSS, MICHAEL A.; y GOTT, J. RICHARD, *Bienvenidos al universo. Un breve paseo por la astrofísica*, Madrid, Alianza Editorial, 2025.

❑ WHEELER, J. CRAIG, *Cosmic Catastrophes: Supernovae, Gamma-Ray Bursts and Adventures in Hyperspace*, Cambridge, Cambridge University Press, 2000.

ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

Ó escanea el código QR:



REDACCION

Directora: **Carmen Sabalete** (csabalete@zinetmedia.es)
Subdirectora: **Cristina Enriquez** (cenriquez@zinetmedia.es)
Coordinador de Diseño: **Oscar Alvarez**
Muy Interesante Digital:
Christian Pérez (cperez@muyinteresante.com)

Autor de los textos: **Miguel Angel Sabadell**.
Colaboradores: **Javier Alvaredo** (edición y corrección),
Manuel Arrubarrena (maquetación y documentación).

DIRECCION Y TELEFONO

C/ Alcalá 79 1º A - 28009 Madrid; tel.: 810 58 34 12
Suscripciones: suscripciones@zinetmedia.es



Consejera Delegada: **Marta Ariño**

Director General Financiero: **Carlos Franco**

Director Comercial: **Alfonso Jullá** (ajulia@zinetmedia.es)

Brand Manager: **Marta Espresate** (mespresate@zinetmedia.es)

Editada por **Zinet Media Global, S.L.**

Distribuidor exclusivo en España: Logista Publicaciones
Distribuidor exclusivo en México: Sefeco México, S.A. de C.V.,
con domicilio en calle Corona No. 23, Colonia Cervecera Modelo,
Municipio Naucalpan de Juárez, Estado de México. CP. 53330.
Tel. (55) 7586 5532. Número de Certificado de Reserva de
derechos al uso exclusivo del Título MUY INTERESANTE:
04-2025-011715474400-102 de fecha 17 de enero de 2025
ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

IMPRESO EN ESPAÑA. EDICION: 12/2025

Esta publicación es miembro de
la Asociación de Revistas de Información (ARI).



Depósito Legal: M-4343-2020. ISSN 1130 - 4081 © Copyright 2017
Zinet Media Global, S.L. Prohibida su reproducción total o parcial sin
autorización expresa de la empresa editora.

**«Este cosmos, que es
el mismo para todos,
no ha sido hecho por
ninguno de los dioses ni
de los hombres, sino que
siempre fue, es y será un
fuego eterno y vivo que
se enciende y se apaga
obedeciendo a medida»**

Heráclito de Éfeso (c. 500 a. C.),
filósofo griego presocrático



muy
INTERESANTE